

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované ekologie



Návrh využití odpadního plastu pro výrobu
polyesterových pryskyřic

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jan Lukačik

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Lukačik

Regionální environmentální správa

Název práce

Návrh využití odpadního plastu pro výrobu polyesterových pryskyřic

Název anglicky

Proposal for the use of waste plastic for the production of polyester resins

Cíle práce

Cíle diplomové práce vycházejí z literární rešerše současné problematiky technologických zařízení pro zpracování a využití recyklovaných plastů. Metodický postup práce bude vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců, charakteristiky legislativy v dané oblasti odpadového hospodářství, popisu a návrhu technologie a techniky vhodné ke zpracování a využití recyklovaných plastů.

Praktická část práce zahrnuje analýzu technických zařízení na zpracování a využití odpadního plastu pro výrobu polyesterových pryskyřic. Bude uskutečněn návrh technologie na využití recyklovaných plastů v chemické výrobě s ekonomickým posouzením. Student vypracuje posouzení návrhu s ohledem na fyzikálně-chemické vlastnosti vzorků recyklovaných plastů.

Metodika

Diplomová práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Výchozí podmínky řešení
5. Návrh řešení a dosažené výsledky
6. Diskuse a závěry
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

Recyklační technologie, termoplasty, reaktoplasty, chemické složení

Doporučené zdroje informací

Ducháček, V.; Hrdlička, Z.: Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.
Chotěborský, R. Nauka o materiálu. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
Muller, M.: Zpracovny nekovového odpadu. ČZU, Praha, 2008, 154 s.
Smejtková, A., Dobiáš, J.: Obaly a obalová technika. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2004. ISBN 80-213-1315-3.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 8. 4. 2021

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 12. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Návrh využití odpadního plastu pro výrobu polyesterových pryskyřic" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 24.03.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Janu Malat'ákovi, Ph.D, za odborné vedení a cenné rady při vytváření této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Igoru Lukačikovi, za jeho cenné rady a znalosti.

Návrh využití odpadního plastu pro výrobu polyesterových pryskyřic

Abstrakt

Výsledkem diplomové práce je navrhnutí výrobního procesu výroby nenasycených polyesterových pryskyřic za použití recyklovaného PETu jakožto vstupní suroviny. Výsledkem je zároveň navržení tří možných inovací pro zlepšení výrobního procesu a snížení produkce odpadů. Tato diplomová práce se zabývá využitím recyklovaného odpadního plastu v chemické výrobě, konkrétně ve výrobě polyesterových pryskyřic. V úvodu práce je popsána legislativa odpadového hospodářství, jsou zde vypsány především jednotlivé zákony a vyhlášky, které jsou spjaty s odpadovým hospodářstvím. Následuje část charakterizující odpad, obal a jednotlivé pilíře odpadového hospodářství. Největší důraz je v této části kladen na recyklační technologie odpadního plastu. Následná část práce věnuje popis a rozdělení makromolekulárním látkám. V této části jsou popsány jednotlivé podruhy makromolekul, jejich formy a konkrétní látky týkající se výroby polyesterových pryskyřic z recyklovaného plastu. Metodická část se zabývá podrobným popisem výroby nenasycených polyesterových pryskyřic z recyklovaného PETu. Následná část je zaměřena na metodiku měření vstupních a výstupních surovin ve výrobě. Zároveň je v této části obsaženo posouzení LCA analýz dvou výrobních procesů polyesterových pryskyřic. V poslední části jsou sepsány a porovnány jednotlivé návrhy na zlepšení výrobního procesu, co se týče snížení produkce odpadů a snížení negativního vlivu výroby na životní prostředí.

Klíčová slova: Recyklační technologie, termoplasty, reaktoplasty, chemické složení

Proposal for the use of waste plastic for the production of polyester resins

Abstract

The result of the diploma thesis is to design a production process for the production of unsaturated polyester resins using recycled PET as an input raw material. The result is also the design of three possible innovations to improve the production process and reduce waste production. This diploma thesis deals with the use of recycled waste plastic in chemical production, specifically in the production of polyester resins. The introduction describes the legislation of waste management, there are listed mainly individual laws and decrees that are related to waste management. The following part characterizes the waste, packaging and individual pillars of waste management. The greatest emphasis in this section is on waste plastic recycling technologies. The following part of the thesis deals with the description and distribution of macromolecular substances. This section describes the individual subspecies of macromolecules, their forms and specific substances related to the production of polyester resins from recycled plastic. The methodological part deals with a detailed description of the production of unsaturated polyester resins from recycled PET. The following part is focused on the methodology of measuring input and output raw materials in production. At the same time, this section contains an assessment of LCA analyzes of two production processes of polyester resins. In the last part, individual proposals for improving the production process in terms of reducing waste production and reducing the negative impact of production on the environment are written and compared.

Keywords: Recycling technologies, thermoplastics, thermosets, chemical composition

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíl práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Zákonodárství odpadového a obalového hospodářství v ČR	10
3.2	Základní předpisy pro nakládání s odpady a obaly v ČR	10
3.2.1	Zákon o odpadech	10
3.2.2	Zákon o obalech	10
3.2.3	Zákon o výrobcích s ukončenou životností.....	11
3.2.4	Zákon o chemických látkách a chemických směsích.....	11
3.2.5	Další právní předpisy	11
3.3	Odpadové hospodářství ČR	12
3.4	Předcházení vzniku odpadů	13
3.5	Odpadní plast	14
3.5.1	Obaly	15
3.5.2	PET odpad.....	15
3.6	Energetické využití plastového odpadu	16
3.7	Recyklace plastového odpadu	17
3.8	Recyklační technologie odpadního plastu	18
3.8.1	Třídění odpadu	18
3.8.2	Mechanické zpracování.....	19
3.8.3	Fyzikální recyklace	21
3.8.4	Opětovná recyklace.....	22
3.8.5	Chemická recyklace	22
3.9	Odpady z chemické výroby	23
3.10	Makromolekulární látky	24
3.10.1	Lineární seskupení	25
3.10.2	Rozvětvené seskupení	25
3.10.3	Sít'ované seskupení	26
3.11	Polymery	27
3.12	Elastomery	28
3.12.1	Kaučuky	28
3.12.2	Termoplastické Elastomery.....	28
3.13	Plasty	29
3.13.1	Termoplasty	29
3.13.2	Reaktoplasty.....	30

3.14	Vznik polymerů	31
3.14.1	Polymerace.....	31
3.14.2	Polykondenzace	31
3.14.3	Polyadice.....	31
3.15	Syntetické pryskyřice	32
3.16	Nenasycené Polyesterové pryskyřice	32
3.16.1	Polyethyltereftalát	32
3.16.2	Monoethylenglykol	33
3.16.3	Octan Zinečnatý	33
3.16.4	Kyselina fosforečná.....	34
3.16.5	Maleinanhydrid	34
3.16.6	Styren	35
4	Výchozí podmínky řešení	36
4.1	Výrobní proces nenasycených polyesterových pryskyřic z R-PET	36
4.2	Primární výrobní proces.....	37
4.3	Rozdělený výrobní proces.....	39
5	Metodika měření.....	44
5.1	Měření vlastností vstupních surovin.....	44
5.1.1	Výsledky měření a statistické porovnání vstupních hodnot.....	48
5.2	Měření vlastností finálního produktu.....	51
5.3	LCA analýza nenasycených polyesterových pryskyřic.....	53
5.4	Inovace výrobního procesu.....	55
5.4.1	Magnetická separace	55
5.4.2	Separace nerozloženého PETu z filtračních pytlů	57
5.4.3	Vícestupňová destilace odpadních vod	58
5.4.4	Zhodnocení navrhovaných inovací	61
6	Diskuse.....	62
7	Závěr.....	64
8	Literatura	67
9	Seznam obrázků.....	70
10	Seznam tabulek	I

1 Úvod

Plastový odpad je nebezpečí, které už dnes musí vidět opravdu každý. Synteticky vyrobené plasty zahlcují řeky a oceány po celém světě. Na tuto hrozbu již odpověděly vyspělé státy snahou o omezování produkce odpadu a jeho zpětné recyklaci. Právě předcházení vzniku je ten nejdůležitější pilíř v odpadovém hospodářství. Nebude-li odpad vznikat, nemusí se s ním následně nijak nakládat. Pokud jeho vzniku nelze zamezit, je nutno jej znovu využít (recyklovat). Jestliže nelze umožnit ani jednu z možností, potom je zapotřebí odpad příslušně a co nešetněji odstraňovat. Plast je fenomén, který svými vlastnostmi předčil ostatní materiály. Využívá se především jako obalový materiál k ochraně spotřebního produktu. Je zapotřebí postupně přecházet na šetrnější možnosti ochrany výrobků, či efektivně třídit a recyklovat plastové obaly. Jedním z hlavních představitelů plastových obalů je PET (láhev). Díky svým vlastnostem dokáže PET perfektně izolovat a ochránit produkt (především nápoje). Tyto unikátní vlastnosti zároveň způsobují to, že tento druh odpadu v přírodě přetrvává několik stovek let, než se zcela rozloží. Při takto dlouhé době rozkladu a v minulosti nešetřnému hospodaření s odpady (v nevyspělých státech dodnes), je právě PET jedním z hlavních příčin zahlcování naší planety odpady.

Tato práce je zaměřena právě na plastový odpad, jeho původ, složení a takové nakládání, které vede k jeho znovuvyužití. Po podrobném rozboru plastového odpadu a jeho zpracovávání je součástí práce rozbor chemické charakteristiky plastů.

V diplomové práci je následně popsáno a zkoumáno využití upraveného odpadního PETu v chemické výrobě. Konkrétně ve výrobě nenasycených polyesterových pryskyřic, kdy právě recyklovaný PET představuje vstupní a dílčí jednotku celé výroby.

2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je učinit návrh chemického zpracování recyklovaného plastu při výrobě nenasycených polyesterových pryskyřic s komplexní analýzou vstupních a výstupních jednotek a navrhnout možná opatření pro zlepšení výrobního procesu a omezení produkci odpadů. Dalším cílem této práce je seznámit se s problematikou odpadního plastu, jeho následným zpracováním a využitím. Úvodní část diplomové práce se zabývá právními předpisy a legislativou odpadového hospodářství v České republice. Následně jsou zde popsány termíny jako odpad, obal a struktura odpadového hospodářství. V úvodní části dojde také k seznámení s recyklační technologií odpadního plastu a s jejími druhy. Dále navazují informace o odpadech z chemické výroby a komplexní popis makromolekulárních látek, kde jsou popsány jednotlivé druhy polymerů a následně i konkrétní sloučeniny, které se týkají metodického výrobního procesu.

V praktické části diplomové práce je na úvod podrobně popsán výrobní proces nenasycených polyesterových pryskyřic, a to jak v primární formě, tak i ve formě rozdružené. Následně jsou v práci popsány vlastnosti a měření vstupních/výstupních surovin. Vstupní suroviny jsou laboratorně přeměřeny a následně vyhodnoceny. Zároveň je v této části vyhodnocena LCA analýza popsaného výrobního procesu s procesem, kde vstupní jednotku nepředstavuje recyklovaný PET, ale jiná synteticky připravená látka. Na závěr jsou v práci navrženy možné inovace, které by napomohly ke snížení odpadů a tím i k šetrnějšímu výrobnímu procesu.

Cílem je tedy seznámit se s odpadním plastem, jeho zpracováním a znovuvyužitím v chemické výrobě.

Diplomová práce je tedy sestavena metodicky z těchto úkonů:

- Charakteristika plastového odpadu a odpadového hospodářství
- Využívané technologie na zpracování plastů
- Charakteristika plastového odpadu
- Charakteristika makromolekulárních látek
- Technologie výroby
- Popis měření vstupních a výstupních surovin
- Porovnání LCA analýz
- Návrh inovací výrobního procesu

3 Literární rešerše

3.1 Zákonodárství odpadového a obalového hospodářství v ČR

Tato část diplomové práce obsahuje základní přehled legislativy, která je ústředním bodem pro veškerou činnost spojenou s odpadem a jeho nakládáním. V ČR je problematika odpadu a odpadních obalů stanovena a upřesněna řadou vyhlášek a zákonů, které jsou zároveň v souladu s podmínkami Evropské unie.

3.2 Základní předpisy pro nakládání s odpady a obaly v ČR

Mezi základní zákony, které se zabývají tématem odpadů a obalů jsou Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech a Zákon č. 477/2001 Sb., o obalech. Neméně důležitý je i Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností a Zákon č. 350/2011 Sb., o chemických látkách a chemických směsích. Následně se problematikou odpadů a obalů zabývají více, či méně i ostatní zákony a vyhlášky, které jsou uvedeny v kapitole „Další právní předpisy“.

3.2.1 Zákon o odpadech

Zákon č. 541/2020 Sb., je zaměřen na vysokou úroveň ochrany životního prostředí, zdraví lidí a na trvale udržitelné využívání přírodních zdrojů předcházením vzniku odpadů. Dále je zákon zaměřen na smysluplné nakládání s odpadem, které je v souladu s hierarchií odpadového hospodářství za současné ekonomické přijatelnosti a sociální únosnosti tak, aby se dosáhlo určených cílů odpadové hospodářství a byl umožněn následný přechod k oběhovému hospodářství. [Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech]

3.2.2 Zákon o obalech

Zákon č. 477/2001 Sb., je zaměřen na ochranu životního prostředí předcházením přebytečných odpadů z obalů. Pojednává o snižování hmotnosti, objemu, škodlivosti a o obsahu chemických látek v obalech, vše v souladu s právem Evropské unie. Zákon o obalech dále stanovuje práva a povinnosti podnikajících fyzických a právnických osob, dále také působnost správních úřadů při veškerém nakládání s obaly a jejich uváděním na trh nebo do oběhu. Při následném zpětném odběru a při dalším využití odpadu z obalů

stanovuje poplatky, ochranná opatření, opatření k eventuální nápravě přestupku. [Zákon č. 447/2001 Sb., o obalech]

3.2.3 Zákon o výrobcích s ukončenou životností

Tento Zákon č. 542/2020 Sb., zpracovává určité předpisy Evropské unie a taktéž přímo navazuje na konkrétní použitelné předpisy Evropské unie. Zákon o výrobcích s ukončenou životností upravuje pravidla pro předcházení vzniku odpadu z vybraných výrobků, upravuje práva a povinnosti všech výrobců při uvádění konkrétních výrobků na trh. Následně tento zákon upravuje povinnosti a práva všech osob, které nakládají s výrobky, u nichž byla ukončena jejich životnost. V neposlední řadě je zákon zaměřen na působnost správních orgánů v oblasti předcházení vzniku odpadu z určitých výrobků v oblasti nakládání s vybranými výrobky s již ukončenou životností. [Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností]

3.2.4 Zákon o chemických látkách a chemických směsích

Zákon č. 350/2011 Sb., o chemických látkách zpracovává a navazuje na přímo použitelné předpisy Evropské unie. Upravuje práva a povinnosti právnických a podnikajících fyzických osob při výrobě, klasifikaci, balení, označování, zkoušení nebezpečných vlastností, uvádění na trh, vývozu a dovozu chemických látek, nebo látek obsažených ve směsích a předmětech. Dále upravuje správnost laboratorní praxe a působnost správních orgánů při zajišťování ochrany před škodlivými účinky látek a směsí. [Zákon č. 350/2011 Sb., o chemických látkách]

3.2.5 Další právní předpisy

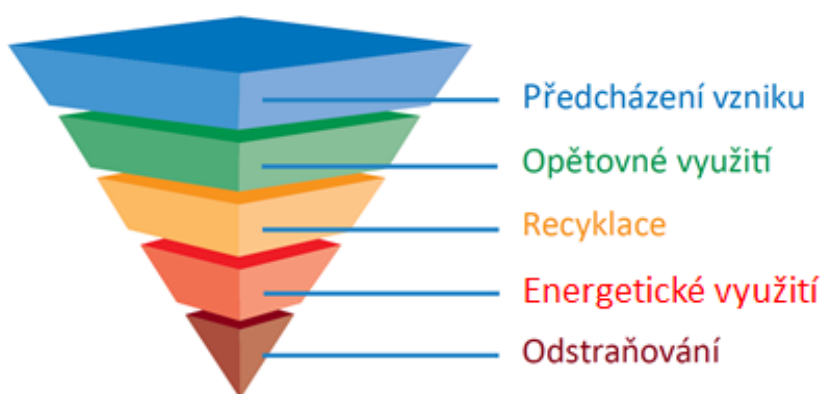
- Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí
- Zákon č. 123/1998 Sb., o právu na informace o životním prostředí
- Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivu na životní prostředí
- Zákon č. 167/2008 Sb., o předcházení ekologické újmy a o její nápravě a o změně některých zákonů
- Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)
- Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší
- Zákon č. 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech

- Zákon č. 383/2012 Sb., o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů
- Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsi a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č. 103/2010 Sb., o provedení některých ustanovení zákona o právu na informace o životním prostředí
- Vyhláška č. 163/2012 Sb., o zásadách správné laboratorní praxe
- Vyhláška č. 376/2001 Sb., Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadu
- Vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích
- Vyhláška č. 93/2016 Sb., Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadu, postup pro zařazení odpadu podle Katalogu odpadů a náležitosti návrhu obecního úřadu obce s rozšířenou působností na zařazení odpadu podle Katalogu odpadů
- Vyhláška č. 383/2001 Sb., Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady
- Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu
- Vyhláška č. 94/2016 Sb., o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů
- ČSN EN 77 0003 Obaly - Obalové odpady a životní prostředí
- ČSN 64 003 Plasty – zhodnocení plastového odpadu

3.3 Odpadové hospodářství ČR

Problematikou odpadů se legislativa České republiky začala zabývat až v devadesátých letech minulého století. Konkrétně v roce 1991 vznikl první zákon o odpadech. Dnes se již nakládání s odpady zabývá nový zákon 541/2020 Sb., o odpadech, který je zmíněn již v předešlé kapitole o zákonodárství v odpadovém hospodářství. Základem odpadového hospodářství je několik pilířů, které jsou zachyceny na obrázku číslo 1.

Prioritou odpadového hospodářství je především předcházení vzniku odpadů, pokud nám nebude vznikat odpad, nebude nutno ho zpracovávat, odstraňovat a jinak s ním nakládat. Pokud nelze předejít vzniku odpadu, měl by se následně využít k jeho opětovnému využití. Nelze jej znovu využít, pak odpad recyklovat a využít jinak. Jako předposlední možnost se bere energetické využití odpadu (spalování). Pouze odpad, který nelze zpracovat jednou ze tří zmíněných variant, lze potom odstranit například skládkováním. Tato varianta se nachází na spodním cípu obrácené pyramidy a to z důvodu její extrémní nešetrnosti k životnímu prostředí. [MŽP, 2020]



Obr. 1 Pyramidová hierarchie nakládání s odpady
[<http://www.automotoenvi.cz/>]

3.4 Předcházení vzniku odpadů

Předcházení vzniku odpadů je ta nejefektivnější a nejbezpečnější cesta, jak celosvětově omezit produkci a celkový počet odpadů na naší planetě. Předcházením vzniku se rozumí přijetí takových opatření, která zamezí změně movitých věcí v odpad. Díky těmto opatření se omezí nežádoucí dopad lidské zdraví a životní prostředí. Implementací těchto opatření do odpadového hospodářství lze zamezit nadbytečné produkci materiálního odpadu a přispět tak celkovému poklesu odpadů a jejich nebezpečných vlastností. Předcházení vzniku odpadů se netýká pouze výrobního sektoru, ale i vzdělání (osvěty), těžebního sektoru, veřejných a soukromých potřeb. Evropská unie vytvořila směrnici 2008/98/ES o odpadech, díky které mají všechny členské státy povinnost zhotovit jednotlivé národní programy na předcházení vzniku odpadů. [MŽP, 2020]

3.5 Odpadní plast

Plastový odpad zřejmě představuje největší problém dnešní doby, co se týče odpadové problematiky. Plastové výrobky mají natolik kvalitní vlastnosti, že je hromadně nelze nahradit jinou přírodní, či syntetickou látkou. Hlavní problém je ve množství a udržitelnosti plastového odpadu. Problém je i v rychlosti expanze využívání plastových výrobků. V roce 1950 byla celosvětová produkce plastových výrobků přibližně 1,5 milionu tun, roku 2018 dosahovala produkce 360 milionu tun plastu. Za 68 let se celosvětová produkce syntetických výrobků zvýšila 240 krát. Většina vyspělých zemí se již naučila kvanta syntetického odpadu zpracovávat, ale v méně rozvojových oblastech je to stále velký problém a zahrnuje se tímto odpadem příroda a především světový oceán.

Plast díky svým skvělým fyzikálním vlastnostem odolává úspěšně času a k jeho rozkladu dochází až po několika desítkách i stovkách let. Například plastové lahve z PETu se rozkládají v přírodě přibližně 100let, výrobky z polystyrenu až 10 000 let. Plastické výrobky vynikají svými vlastnostmi (tvrdost, tepelná odolnost, pružnost) a to je předurčuje být tak potřebnými a využívanými v široké škále různých odvětví. Nejčastěji jsou syntetické hmoty využívány jako obaly pro jiné produkty (plastové lahve, sáčky, fólie), a právě to znásobuje jejich potenciál z hlediska produkce odpadu. V legislativě ČR se plastovým odpadům, včetně jiných odpadů, věnuje zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech. [<https://www.trideniodpadu.cz/>]



Obr. 2 Plastový odpad [<https://www.setri.sk/>]

3.5.1 Obaly

Obal představuje takovou část produktu, která slouží k jeho izolaci a ochraně před vnějšími faktory. Tato ochrana se snaží zachovat produkt v identické podobě, od doby kdy byl vytvořen, až do doby jeho spotřebování. Obaly mohou být z různých materiálů (např. papírové, skleněné, nebo plastové), podle potřeby výrobce a spotřebitele, nebo různou četností použití, tedy jednorázové a opakovaně použitelné. Z hlediska snahy o předcházení vzniku odpadů, jsou v dnešní době upřednostňovány právě obaly, které lze znovu použít. V ČR je problematika obalů upravena zákonem číslo 447/2001 Sb., o obalech. Tímto zákonem jsou stanoveny práva a povinnosti fyzických a právnických osob při uvádění obalů na trh a do oběhu. Pokud obal přestane plnit svůj účel, stane se z něj odpad. Pro zamezení vzniku přebytečného odpadu je zapotřebí znovu využívat obalový odpad, a to znovu jako obal, nebo jej zpracovat a využít na výrobu jiných výrobků. [MŽP, 2020]



Obr. 3 Plastové obaly [<https://maxivyber.sk/>]

3.5.2 PET odpad

Odpady z polyethylentereftalátu (PETu) jsou jednoznačně nejvíce skloňovaným plastickým odpadem. Jejich zástupcem jsou plastové lahve, které většina z nás používá každý den, nebo s nimi aspoň přijde do styku. Výrobky z PETu jsou díky svým unikátním vlastnostem velmi využívány a upřednostňovány. Mezi jejich hlavní výhody

patří perfektní izolovanost produktu, lehkost, nerozbitnost, tepelná odolnost a v dnešní době především recyklovatelnost.

Plastové lahve z PETu vznikají vstřikováním (vyfoukáváním) termoplastického polyethylentereftalátu do předem připravených forem. Tento proces probíhá za vyšších teplot, aby se syntetická látka roztavila a dalo se s ní dobře manipulovat. Po zchlazení a zpětném ztuhnutí dostává výrobek svůj typický tvar i vlastnosti.

Každý plastový výrobek lze odlišit pomocí číslice ohraničené třemi šipkami, které na sebe navzájem navazují. Na následujícím obrázku číslo 4 je uvedeno šest základních druhů plastů s číselným označením. Pro výrobky z PETu je určena číslice 1, pod ní patří i další termoplastické výrobky, jako jsou různé fólie, sáčky a polyesterové oblečení. [TRÍDĚNÍODPADU.CZ, 2022]

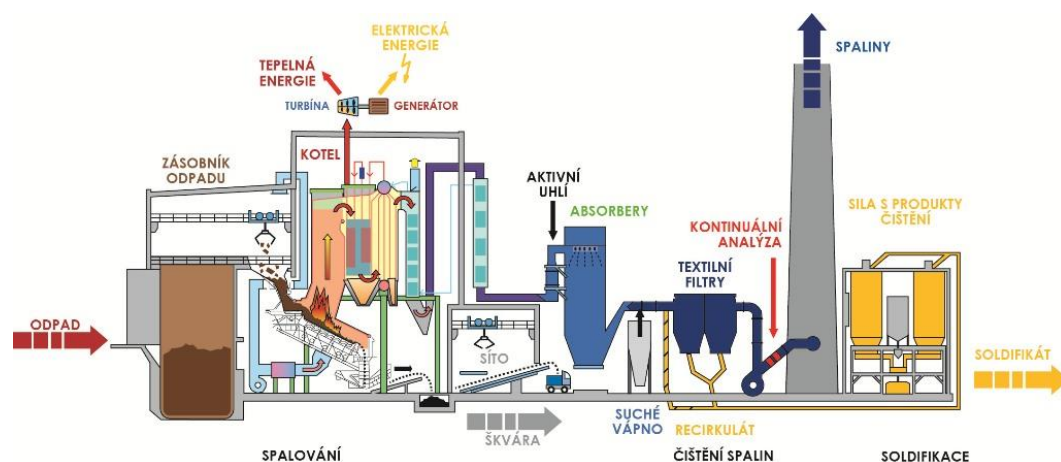


Obr. 4 Značení plastových obalů [<http://www.jihocesketrideni.cz/>]

3.6 Energetické využití plastového odpadu

Na území české republiky je trend spalování odpadu rok od roku vyšší. Je to dáno politikou EU, která se snaží odpadní materiál využít šetrněji, než jej skládkovat. Spalovny pro energetické využití odpadu jsou novodobou alternativou doposud používaných spaloven fosilních paliv. Každý materiál (odpad) má různou energetickou hodnotu při procesu spalování, čím větší nastane reakce materiálu (reakce s kyslíkem), tím vyšší produkce tepla a díky tomu i vyšší zdroj energie. Koeficient energetické účinnosti odpadu musí být větší než 65%, aby mohl být spalován v energetických spalovnách odpadu, tedy ne každý odpad je vhodné spalovat.

Plastový odpad, který nelze opětovně využít nebo jej recyklovat, je možné aspoň energeticky využít. Plasty na rozdíl například od papíru, mají vysokou teplotu spalování, a to až 900 °C. Díky svému molekulárnímu složení vynikají plasty i vysokou energetickou výhřevností. Plast je tedy energeticky dobře využitelný odpad. Hodnota výhřevnosti plastů je například 43 MJ/kg u PE, 44 MJ/kg PP, 23 MJ/kg PET a přibližně 18 – 26 MJ/kg u PVC. Polyvinylchlorid je problematický z hlediska spalování, právě při tomto procesu se z PVC uvolňuje velké množství chlorovodíku, který je vysoce rizikový pro lidské zdraví a životní prostředí. [JANOŠKO, 2011]



Obr. 5 Schéma ZEVO elektrárny [https://www.sako.cz/]

3.7 Recyklace plastového odpadu

Recyklace je proces, který vede k opětovnému využití odpadního materiálu. Je to tzv. cyklický proces, ve kterém dostane použitý odpad zpět do výrobního procesu. Recyklace lze rozdělit do dvou kategorií, na recyklaci přímou a nepřímou. Přímá recyklace spočívá v tom, že se odpad znovu využije bez nutných mechanických či jiných úprav. Nepřímý způsob recyklace již ale vyžaduje úpravu odpadního materiálu a jeho celkové znovuzpracování.

Recyklační proces plastových odpadů má stejný mechanismus, jako jiné odpady. U většiny plastového materiálu dochází během recyklace ke zhoršení jeho vlastností, tento fakt může stále u většiny výrobků upřednostňovat plast nově vyrobený. I přesto podíl recyklovaného plastu roste a v zemích Evropské unie se recykluje 1/3 veškerého odpadního plastu. Snahou je i nadále zvyšovat procentuální podíl recyklovaného plastu na úkor energetického využití a nešetrného ukládání na skládky.

Bohužel nelze označit recyklační proces jako ekologicky nezávadný. Během procesu stále vnikají odpady, které se nijak nevyužívají, je tedy nutné s nimi nakládat jiným nešetrným způsobem. Zároveň při recyklačním procesu vzniká velké množství odpadních vod, spotřebovává se elektrická energie a při převozu odpadu a výsledného recyklátu nežádoucí faktor nákladní silniční dopravy. I přes všechny zmíněné nežádoucí body je stále tento proces velice záslužný a pomáhá snižovat množství odpadního plastu, tím napomáhá zlepšovat stav životního prostředí a lidského zdraví. [TRÍDĚNÍODPADU.CZ, 2022]



Obr. 6 Znak recyklace [<https://www.siegl.cz/>]

3.8 Recyklační technologie odpadního plastu

V této části diplomové práce je popsán recyklační proces plastového opadu v jednotlivých částech. Od prvotního sběru přes mechanickou úpravu až po jednotlivé recyklační procesy, které přetvářejí odpadní plast do nového výrobku a uzavírají tím cyklický proces znovu využitých syntetických výrobků.

3.8.1 Třídění odpadu

Recyklační proces začíná u třídění odpadu. Princip třídění spočívá v rozdělování odpadu podle jeho materiální struktury. Odpad se tedy rozděluje na směsný, papírový, plastový, kartonový, kovový a nebezpečný. Podle typu odpad vyhodíme do příslušného kontejneru, pro plastový odpad je určen žlutý kontejner. Obsah kontejneru pravidelně

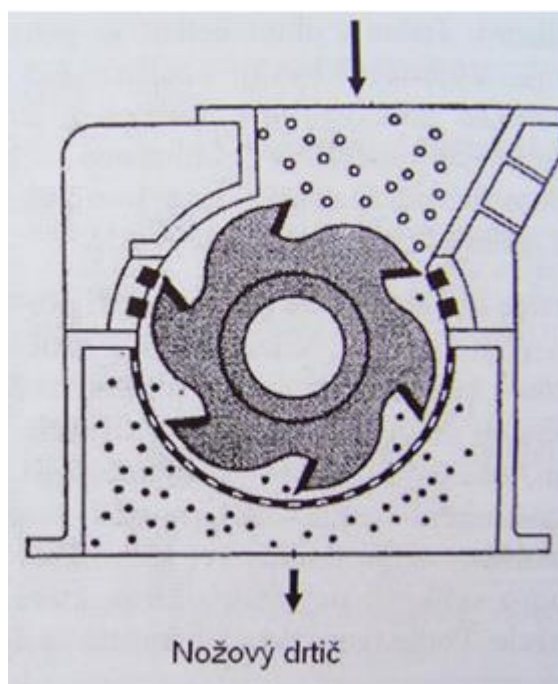
vyprazdňují pověřené osoby a svozovým vozem jsou přemístěny do třídírny odpadů. Pomocí dopravních pásů jsou odpady dopraveny k třídící lince, kde následuje jejich sekundární separace. Příslušné osoby vybírají z pásů konkrétní odpady a vhadzují je do boxů umístěných poblíž pracovníků. Například u plastového odpadu se rozlišují čiré PET lahve, barevné PET lahve, neprůhledné lahve, čiré fólie, barevné fólie, čiré a barevné obaly od chemie (mýdla, šampóny), krabice potahované hliníkem a další. Jedná se tedy o optickou separaci jednotlivých odpadních materiálů. Rozdružený materiál pokračuje do další sekce, kde je již mechanicky upravován. [TŘÍDĚNÍODPADU.CZ, 2022]



Obr. 7 Druhy tříděného odpadu [<https://www.dewolf.cz/>]

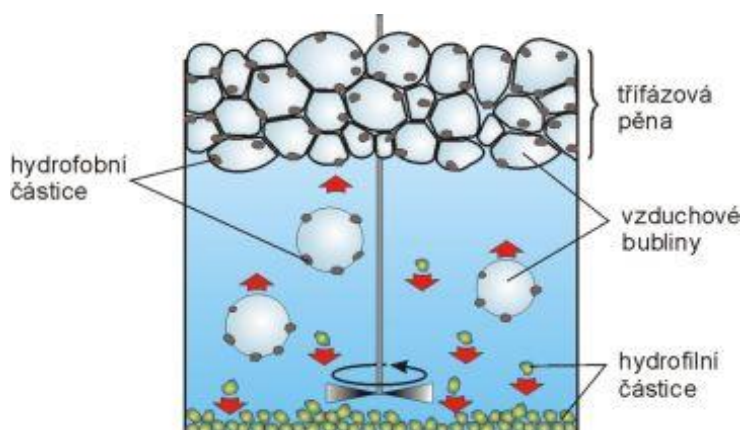
3.8.2 Mechanické zpracování

Po prvotní separaci plastového odpadu pomocí třídící linky je odpad sveden k mechanické úpravě. Nejprve probíhá drcení plastového odpadu za pomoci hrubého drtiče. Za pomoci dvouhřídelového drtiče (ocelové segmenty otáčející se naproti sobě) je plast rozdrcen na menší (ne finální) fragmenty. Zdrobnělý odpad následně pokračuje do nožového drtiče. Plastový odpad je přiveden pásovou dopravou do drtícího prostoru, kde se nachází rotující hřídel, na které jsou připevněny ostré nožové segmenty. Pod rotující hřídelí je připevněno kovové síto s předem určenou velikostí otvorů. [MÜLLER, 2008]



Obr. 8 Nákres nožového drtiče [MÜLLER, 2008]

Po drcení následuje sekundární separace plastového odpadu. Ta je nejčastěji prováděna pomocí flotační technologie, která je založena na rozdílné „smáčlivosti“ jednotlivých materiálů. Odpad je přiveden do jednotky naplněné vodou, která je provzdušňována a to způsobuje snižování hustoty prostředí v separační jednotce. Vznikají zde vzduchové bubliny, které se zachytávají na hydrofobní povrch plastových složek a vytlačují je směrem nahoru k hladině. Odpad s hydrofilním povrchem se usadí u dna. Díky tomuto procesu lze například vyseparovat nežádoucí kusy PVC od zbytku PETu. [ZÁVADA 2015, MÜLLER 2008]



Obr. 9 Flotační metoda [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/]

Rozdružování drcených složek může probíhat i za pomoci vzduchu v hydrocyklónech, či pomoci elektrostatického rozdělování. Rozsekaný a vyseparovaný plast (flakes) propadává sítím a je plněn do textilních pytlů o velikosti přibližně 1 – 1,5 m³. Rozemletý odpadní plast je potom připraven na další recyklační proces. [ZÁVADA 2015, MÜLLER 2008]

3.8.3 Fyzikální recyklace

Pomocí fyzikální recyklace se původní výrobek (následný odpad) pomocí fyzikálních procesů přepracuje na novou a vlastnostmi odlišnou surovinu. V tomto procesu nedochází ke změně strukturního vzorce jednotlivých plastů. Dobrým příkladem fyzikální recyklace je výroba umělého textilního vlákna z rozdrčeného PET odpadu (flakes). Mechanicky upravený plastový odpad směřuje do násypky, odkud dopravníkem pokračuje přes magnet (ten zbavuje směs nepotřebných kovů) a několika stupňovou sušičku, kde se plast při 100 – 150 °C vysuší. Vysušené flakes pokračují do topné zóny, kde dojde při 285 °C k roztavení vstupního produktu. Žhavá tavenina je následně pomocí chladících trysek rozdružována (na jednotlivá vlákna) a současně chlazená. Vzniklé „vlákno“ je několikrát dlouženo a změkčováno nanášenou aviváží. Roztáhané a změkčené vlákno je nakonec vysušeno, pýchováno a nastříháno. Vzniklé textilní vlákno se již jen slisuje do balíků o velikosti 1 m³ a je připraveno k exportu do oděvních, automobilových a jiných firem. Při fyzikálním procesu tedy dochází především k sušení a tavení, tavenina je následně schlazena a dloužena, nebo jiným způsobem zpracována do požadované podoby. Nutností těchto postupů je co nejvyšší kvalita vstupního plastu. Plast by měl být perfektně separován a očištěn před vstupem do tohoto procesu. [BOŽEK 2003]



Obr. 10 Přeměna PET odpadu na umělé vlákno. Upraveno dle
[<https://www.zalohujme.cz/>]

3.8.4 Opětovná recyklace

Proces opětovné recyklace, též nazýván i primárním recyklačním procesem, má stejnou podstatu jako předešlý fyzikální. Pouze s tím rozdílem, že vyhozený a zpracovaný odpad je znovuzpracován a znovu využit, jako původní plastový výrobek. Je snaha zachovat stejnou, nebo aspoň podobnou kvalitu původního odpadu/obalu. Odpadní plast je pomocí mechanických procesů rozdružen a rozdrčen na drobný granulát, ten se následně vysuší a roztaví. Do taveniny se často přidává i částečný podíl nového syntetického granulátu, tedy plastu, který byl chemicky připraven jako původní výrobek, ze kterého vyrábíme recyklát. Poměrem nového plastu upravujeme požadovanou a výslednou kvalitu vzniklé suroviny. Tavenina je stejně jako u předešlého procesu chlazená a dle potřeby dloužena, nebo odlívána do potřebných forem. Proces opětovné recyklace je nejšetrnější k cirkulárnímu procesu odpadového hospodářství. Odpad lze znovu a znovu využívat ve stejném odvětví a nevzniká zde tolik odpadního plastu nutného jinému zpracování, především k energetickému využití. [BOŽEK 2003]

3.8.5 Chemická recyklace

Chemický typ recyklace je založen na úplně jiném principu, na rozdíl od předešlých postupů. V procesu chemické recyklace dochází k přeměně molekulárního vzorce. Pevné makromolekuly jsou rozděleny na drobnější sloučeniny (uhlovodíky), se kterými lze příslušně nakládat.

Vše probíhá nejčastěji pomocí termických procesů, konkrétně pyrolýzy. Právě pyrolýzou je míněn rozklad organických sloučenin bez přítomnosti kyslíku. K rozkladu dochází za vysokých teplot, díky kterým je pevný materiál štěpen na drobnější uhlovodíkové segmenty. Výsledný produkt je dále zpracováván především v chemickém průmyslu, nejčastěji v petrochemickém, který se zaměřuje na zpracování jednoduchých organických sloučenin (např. ropy).

Další variantou molekulového rozdělení polymerních řetězců je chemický proces za působení rozpouštědla a katalyzátoru. Za teplot podobných bodu tání určitých plastů, se rozpuštěný plast v reaktoru smíchá s rozpouštědly a katalyzátory, které rozbourají polymerní řetězec a rozdělí jej na drobnější segmenty (oligomery). Výsledný produkt lze dále chemicky upravovat na požadovaný výrobek. Tento recyklační proces se konkrétně týká výroby syntetických pryskyřic, kterému je podrobně věnována metodická část práce. [FIEDOR JIŘÍ, 2012]

3.9 Odpady z chemické výroby

Již při prvotní výrobě syntetických látek vzniká odpad, ten na rozdíl od hotového výrobku v podobě PET lahve nelze znovu využívat, či jej efektivně a ekologicky odstraňovat. U tohoto odpadu je zapotřebí především pozměnit samotný výrobní proces, aby docházelo co k nejmenší produkci těchto odpadů.

Většinu světové výroby tvoří anorganické chemikálie, při jejichž produkci vzniká velké množství plynného a kapalného odpadu. Jako plynné odpady jsou nejčastěji produkovány chlór, flór, sulfan, oxid siřičitý a spousta dalších včetně oxidů dusíku. Odpadní kapaliny tvoří především výrobní odpadní vody. Ty jsou plně organických sloučenin a látkami anorganického původu. Tyto vody vždy vyžadují důsledné přečištění, v horším případě nešetrné odstranění. Kromě zmíněného kapalného a plynného odpadu, je součástí těchto procesů i odpad tuhý. Nejčastějším tuhým odpadem z anorganické výroby je sádrovec, zelená skalice a síran sodný. Jen opravdu malá část ze všech odpadů se druhotně opět využívá. Většina těchto látek je nešetrně odstraňována, především spalována ve spalovnách pro nebezpečný odpad. [FIEDOR JIŘÍ, 2012]

Organické chemické výrobní procesy, jako je především petrochemie a jiné zpracování ropy, produkuje stejně jako anorganická spousta druhů odpadů. Organické procesy jsou zaměřeny konkrétně na výrobu barev, laků, pesticidů, celulózy, léčiv a polymerních pryskyřic. Hlavním zdrojem jsou zde především kapalné odpady v podobě odpadních vod. Tyto vody jsou toxické a obsahují stejně jako předchozí vody mnoho organických a anorganických sloučenin. Tyto tekavé vody je nutno podrobit biologickému přečištění, které však nestačí vždy a vody je tak nutné neekologicky odstranit. Dále zde vznikají odpadní kaly, které především v minulosti směřovali do stojatých lagun, což způsobilo řadu ekologických problémů a někdy i katastrof. Kaly se dnes především spalují ve vhodných spalovnách, kdy se následně strusky ukládají na skládky vhodného typu. Jako nejčastější tuhý odpad je samotný plastový odpad. Ten vzniká z výroby plastů, pryží a kaučuků. Může se jednat o různé odřezky, zmetky a vyseparovanou sušinu. Na rozdíl od předešlých druhů odpadů, lze tento druh snadněji využívat. Veškerý vyseparovaný plastový odpad lze opět využít ve výrobním procesu s přihlédnutím k možnému snížení kvalit finálního výrobku. [FIEDOR JIŘÍ, 2012]

3.10 Makromolekulární látky

Makromolekulární látky jsou jakýmsi symbolem novodobé historie. Dnes jsou tyto látky každodenní součástí lidských životů. V minulosti se lidstvo po stovky a tisíce let spoléhalo na používané materiály přírodního charakteru, jako je například dřevo, kámen a kovy. S nástupem vědy se lidstvo začalo více a více zaměřovat na syntetické (umělé) látky a jejich výrobu. Uměle vyrobené materiály začaly nahrazovat ty přírodně původní, a to především díky stejným a lepším vlastnostem, které nabízely. Syntetické makromolekulární látky zaujaly své místo prakticky ve všech průmyslových odvětvích. S masivní výrobou syntetických látek je spojen i problém se zatěžováním životního prostředí. Dnes je proto kladen velký důraz na snižování výroby umělých produktů, na jejich recyklaci a na co nejšetrnější energetické či jiné využití. [MEISSNER, ZILVAR, 1987]

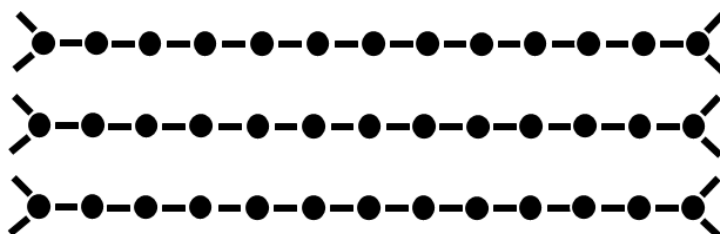
Makromolekulární látky se skládají z dlouhých řetězců opakujícího se monomeru. Jedná se tedy o monomerní řetězce složené z mnoha jednotlivých stavebních jednotek neboli monomerů, tyto řetězce lze také nazývat polymery. U každé polymerní látky se

označuje jeho polymerační stupeň, ten udává daný počet jednotlivých monomerů v makromolekulovém řetězci. Polymery lze rozdělit podle struktury na kopolymery a homopolymery. Jak z názvu vyplývá, tak homopolymery se skládají z jedné a té samé molekuly, která se ve dlouhém řetězci opakuje. Naopak kopolymery jsou tvořeny minimálně ze dvou odlišných molekul. [MEISSNER, ZILVAR, 1987]

Makromolekulární řetězce se dále rozdělují podle jejich tvaru a struktury na řetězce lineární, rozvětvené a síťované. Jednotlivé typy těchto řetězců jsou popsány v následujících odstavcích.

3.10.1 Lineární seskupení

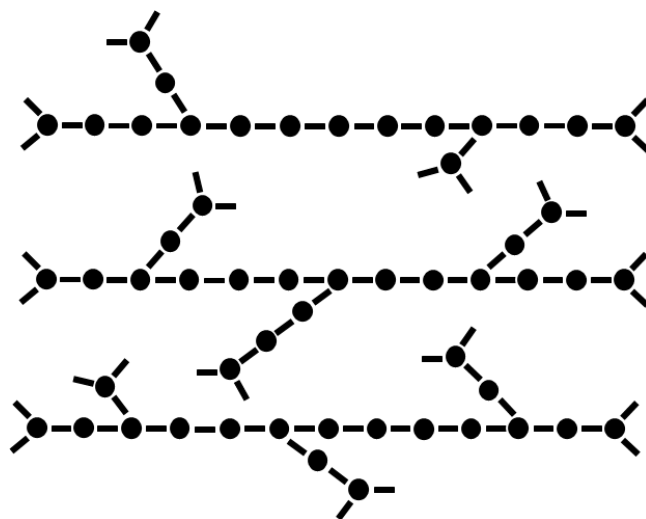
Lineární polymery jsou tvořeny z velkého množství jednotlivých monomerních jednotek, které na sebe navzájem navazují a jsou tedy uspořádány v jedné dlouhé linii. Toto seskupení vzniká díky na sobě vázaným monomerům. Lineární polymery i díky své jednoduchosti mají lepší fyzikální vlastnosti, než níže zmíněné rozvětvené polymery. [BĚHÁLEK, 2015]



Obr. 11 Lineární schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.10.2 Rozvětvené seskupení

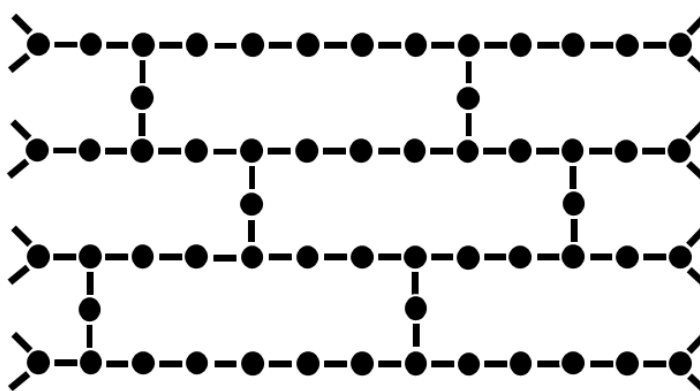
Makromolekuly tvořící rozvětvenou strukturu mají na prvotním (lineárním) řetězci přidané boční substituenty (připojený atom, ze kterého vede postranní řetězec). Tyto krátké postranní výčnělky způsobují vzájemné oddalování jednotlivých makromolekulárních řetězců. Tento jev následně způsobuje pokles sil mezi řetězci a tím i degradaci mechanické tvrdosti či pevnosti polymeru. [BĚHÁLEK, 2015]



Obr. 12 Rozvětvené schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.10.3 Síťované seskupení

Zesíťované seskupení makromolekul vzniká z již zmíněných lineárních řetězců. Dochází ke spojení nejbližších linií na různých místech pomocí nově vytvořených vazeb. Díky propojení makromolekul se značně omezí jejich pohyblivost. Nově vytvořené zesíťované polymery ztrácí schopnost rozpustnosti a tavitelnosti. Na druhou stranu se několikanásobně zvýší tvrdost a teplotní odolnost. Zmíněné vlastnosti vždy budou souviset s konkrétní hustotou zesíťování daného polymeru. Síťového seskupení lze například dosáhnout vytvrzováním polyesterových pryskyřic. [BĚHÁLEK, 2015]



Obr. 13 Síťované schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

Lineární	Rozvětvené	Síťované
Vyšší pevnost	Nižší pevnost	Vysoká pevnost
Vyšší hustota	Nižší hustota	Vysoká hustota
Vyšší pružnost	Nižší pružnost	Vyšší pružnost
Nízká tažnost	Vyšší tažnost	Nízká tažnost
Vyšší teplotní odolnost	Nižší teplotní odolnost	Vysoká tepelná odolnost

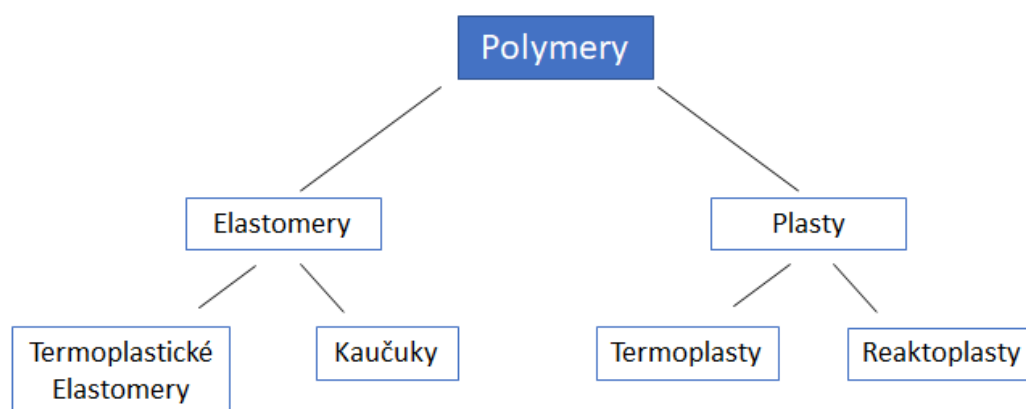
Tab. 1 Porovnání vlastností seskupení. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.11 Polymery

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, které oplývají řadou neobvyklých a významných vlastností. To co dělá z polymerů tak neobvyklou látku, je především díky charakteru a velikosti jejich molekul. Velké molekuly neboli makromolekuly tvoří strukturu polymeru, každá makromolekula se skládá z drobných jednotek (mer), které se nesčetněkrát opakují a tvoří dlouhý molekulový řetězec.

Polymery patří pod záhlaví organické chemie a obsahem jejich molekul jsou tedy především atomy vodíku, uhlíku, kyslíku, dusíku a dalších jiných prvků. Stav polymerů je znám především ve finální a užitkové verzi, a to jako pevný či elastický produkt. V určitých stádiích výroby jsou však polymery za působení vysokých teplot kapalné a lze s nimi díky tomu lépe nakládat. Právě za pomoci tlaku a tepla se určuje finální (požadovaný) tvar pevného polymeru.

Polymery rozdělujeme do dvou základních skupin na plasty a elastomery. Plasty dále rozdělujeme na reaktoplasty a termoplasty, zatímco elastomery se dále dělí na kaučuky a termoplastické elastomery. [DUCHÁČEK, 2006]



Obr. 14 Rozdělení polymerů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.12 Elastomery

Elastomery vynikají vysokou pružností a nízkou tuhostí, můžeme je tedy lehce deformovat bez rizika jejich porušení, deformace je tedy vratná. Typickými představiteli jsou kaučuky a termoplastické elastomery, které jsou popsány v následujícím odstavci. [CHOTĚBORSKÝ, 2011]

3.12.1 Kaučuky

Kaučuky jsou přírodní i syntetické látky. V přírodě je lze získávat z tropického stromu kaučukovníku brazilského. Nařezáváním jeho kůry z něj lze dostat syrový kaučuk, který se dále upravuje a zpracovává na přírodní pryž. Syntetické kaučuky (pryže) jsou vyráběny z ropy. Tyto polymerní látky jsou významné pro podíl reaktivních míst (dvojných vazeb) ve svém makromolekulárním řetězci. Tyto vazby umožňují vznik chemické reakce, konkrétně vulkanizace. Vulkanizace spočívá v reakci mezi kaučukem a vulkanizačním činidlem (nejvíce využívaným činidlem je síra). Při teplotách od 140 °C do 200 °C za přítomnosti činidla dochází k reakci a původní kaučuková směs se mění v pryž. Vzniká specifický polymer, který vyniká svými fyzikálními vlastnostmi. Pryže mají schopnost vysoké elastické deformace (ta není přímo úměrná napětí), díky které se odlišují od ostatních druhů polymerů, a dává pryžím skvělé vlastnosti, jako je elektroizolační funkce, chemická odolnost, odolnost vůči opotřebení, nepropustnost plynů a mnoho dalších. [CHOTĚBORSKÝ, 2011]

3.12.2 Termoplastické Elastomery

Termoplastické elastomery (TPE) jsou svou strukturou velmi podobné pryžím. Již z názvu lze usoudit, že se jedná o kombinaci termoplastů a elastomerů. Jedná se o polymer, který je zastoupen jak tvrdšími segmenty (termoplasty), tak i měkčími částmi tvořenými z elastomerů. TPE jsou tvořeny zesíťovanou strukturou polymerních řetězců. Za působení vysokých teplot se TPE taví a mění svůj stav v kapalný a lze s nimi nakládat stejným způsobem jako s termoplasty. Tento hybridní polymer nemá tak dobré tvarové a elastické vlastnosti jako příbuzná pryž, zato je ale lépe recyklovatelný a lze s ním nakládat podobným způsobem jako s termoplasty. [BĚHÁLEK, 2015]

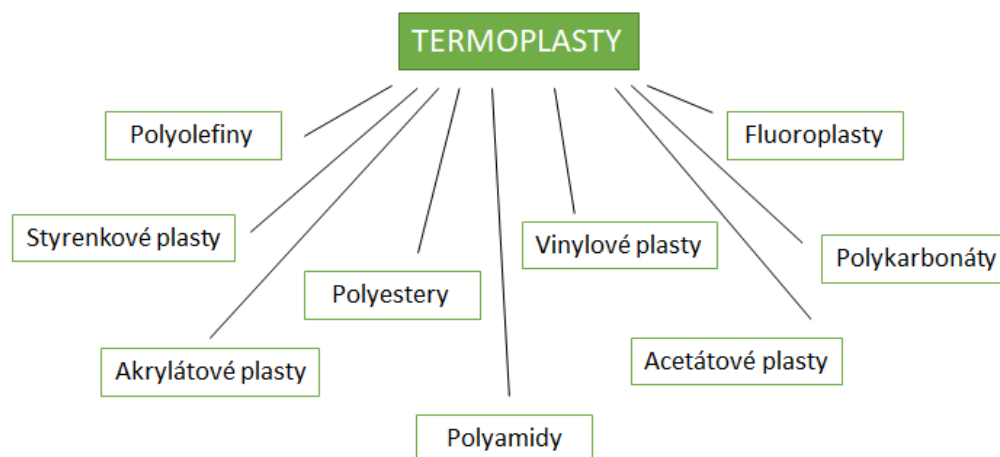
3.13 Plasty

Plasty jsou po Elastomerech druhou základní skupinou polymerů. Hlavním rysem, který odlišuje plasty od elastomerů, je především nevratné poškození při působení vnějších sil na konkrétní plastový polymer. Především se jedná o tvrdý či křehký materiál, který se při zvýšeném tlaku nevratně poškodí. Plasty dále rozdělujeme podle reakce při zahřívání, a to na reaktoplasty a termoplasty. [BĚHÁLEK, 2015]

3.13.1 Termoplasty

Termoplastické látky jsou syntetické materiály, které se vyznačují výbornými fyzikálními vlastnostmi. Při zahřívání termoplasty měknou až do bodu, kdy je plast kompletně roztaven. Teplota tání bývá u každého druhu plastu různá. Při zpětném ochlazení dochází k postupnému návratu taveniny do původního stavu před zahříváním. Při tomto procesu nedochází k žádným chemickým reakcím a nemění se tedy ani polymerní struktura daného plastu. Veškeré materiální změny jsou pouze na bázi fyzikálních procesů. Jedná se tedy o plast, který lze znovu a znovu zkapalňovat a zpětně ztvrdovat. Tento způsob zpracovávání je hlavním rozdílem mezi termo a reaktoplasty.

Termoplasty jsou buď amorfni nebo semikrystalické. Amorfni forma spočívá v náhodném seskupení struktury daného polymeru, tedy jeho molekulových řetězců. Semikrystalické uskupení představuje pravidelně rozdělenou strukturu molekulových řetězců v polymeru. Termoplasty se dále rozdělují do jednotlivých podskupin, ty jsou znázorněny na obrátku číslo 15. Typickými zástupci termoplastických látek jsou polystyren (PP), polypropylen (PP), polyethylen (PP) a v životě nejpoužívanější polyethylentereftalát (PET). [BĚHÁLEK, 2015]

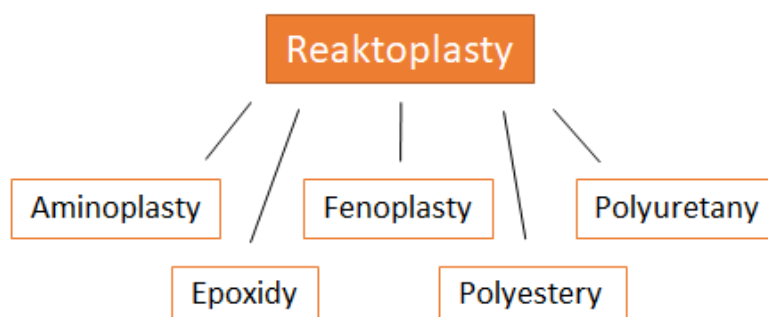


Obr. 15 Rozdělení termoplastů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.13.2 Reaktoplasty

Podstata reaktoplastů spočívá v jejich tvarovatelné struktuře, která je možná jen po určitou dobu zahřátí. Během dalšího zahřívání a zpracovávání reaktoplastů, dochází ke změnám struktury. Makromolekulární řetězce obsažené v plastu se zasítují a ztuhnou, z roztavené (kapalné) hmoty se stane hmota netavitelná a nerozpustná, plast již tedy nelze znovu stejně zpracovat. Tento reakční proces se nazývá vytvrzování. Vstupním a původním tekutým polymerem je tzv. pryskyřice, která se za pomoci stimulačních látek vytvrdí do pevného stavu. Finální produkt je extrémně tuhý, tvrdý a vyznačuje se vysokou tepelnou odolností.

Reaktoplasty patří mezi amorfní polymery, nemají tedy pravidelně uskupenou strukturu, ale pouze náhodnou. Vytvrzené finální produkty reaktoplastů jsou zastoupeny v mnoha odvětvích. Produktem je například záchodové prkénko, bowlingová koule, trup jachet a lodí, nebo vodovodní roury. Reaktoplasty se dále rozdělují na fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany. [CHOTĚBORSKÝ, 2011]



Obr. 16 Rozdělení reaktoplastů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

3.14 Vznik polymerů

Polymery vznikají za pomoci tří základních reakcí. Tyto jednotlivé reakce způsobí seskupení jednotlivých monomerů a tím vznik polymerního řetězce.

3.14.1 Polymerace

Polymerace je zřejmě tou hlavní a reprezentativní reakcí ze všech tří zmíněných. Jedná se o chemickou řetězovou reakci spousty monomerů, díky které vznikají dlouhé a spojené řetězce makromolekul polymeru. Na rozdíl od dalších reakcí, u této nevznikají žádné vedlejší produkty. Složení vzniklé makromolekuly je stejné jako chemické složení jednotlivých monomerů. Pro spuštění polymerační reakce, je zapotřebí přivést aktivační energii. Tato energie přivede k aktivaci ty částice, které jsou schopny následně reagovat. K aktivaci lze použít záření, teplo, či konkrétní látkou, která tuto reakci vyvolá (iniciátor). Celý proces se rozděluje do tří částí, počáteční iniciace, růstová reakce (propagace) a končící terminace. Polymerace se dále rozděluje na tři druhy podle aktivačních částic a to na radikálovou, iontovou a koordinační polymeraci. [DUCHÁČEK, 2006]

3.14.2 Polykondenzace

Při polykondenzační reakci vzniká alespoň ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a s ním zároveň i jiná látka, kterou je nejčastěji voda. Na rozdíl od předchozí polymerace, kde má vzniklý polymer stejné složení jako původní monomer, má polykondenzační produkt (výsledný polymer) jiné složení, než původní látka ze které vznikl. Při této reakci je tedy zapotřebí počítat vždy s vedlejším produktem. Jedním z typických příkladů je reakce ethylenglykolu s kyselinou tereftalovou. Právě tato reakce vede ke vzniku polyethylentereftalátu, ze kterého jsou následně vyráběny PET produkty. [DUCHÁČEK, 2006]

3.14.3 Polyadice

Polyadice jsou schopny takové sloučeniny, jejichž jednotlivé molekuly obsahují násobné vazby, tyto molekuly jsou kromě spojení schopny i tzv. adiční reakce s ostatními sloučeninami, ve kterých jsou obsaženy příslušné funkční skupiny. Pokud jsou v molekulách sloučenin zastoupeny alespoň dvě funkční skupiny, lze pomocí

mnohonásobné adice vytvořit polymerní řetězec. Oproti polymeraci nevzniká polymer s totožným složením, ale s odlišnou strukturou od původních látek. Avšak stejně jako u zmíněné polymerace nevzniká vedlejší produkt. [DUCHÁČEK, 2006]

3.15 Syntetické pryskyřice

Syntetické (uměle vytvořené) pryskyřice patří do odvětví viskózních látek, tyto látky mají schopnost přeměny do pevného stavu pomocí vytvrzovacího procesu. Díky tomuto procesu polymer nenávratně změní své skupenství a stane se pevným. Při syntetickém procesu se chemickou reakcí rozloží polymerní řetězce a vznikne nová forma syntetického polymeru, ten poté díky reakčnímu činidlu ztuhne do finální podoby vytvrzené pryskyřice. [DUCHÁČEK, 2006]

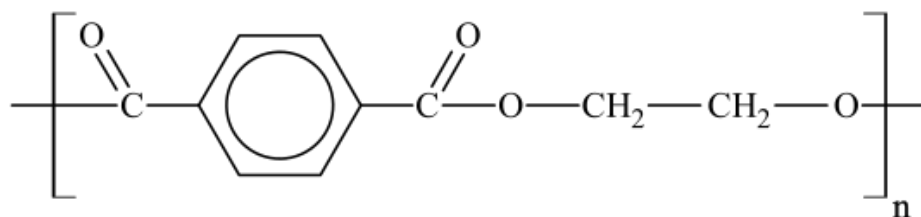
3.16 Nenasycené Polyesterové pryskyřice

Jedná se o soustavu termoplastických polymerů, které se používají na výrobu kompozitních materiálů. Z polyesterových pryskyřic se nejčastěji vyrábí tvrzené potrubí, umělý mramor, knoflíky a například i záchodové prkénka. Nejčastější způsob výroby nenasyčených polyesterů je pomocí polykondenzační reakce dikarboxylové kyseliny s glykolem, a to při teplotách 180 – 250 °C v interní (uzavřené) atmosféře reaktoru. Kompletní výrobní proces polyesterových pryskyřic je popsán níže v kapitole Metodika. Následně jsou pod touto kapitolou popsány jednotlivé látky, které patří mezi nedílné složky výroby nenasyčených polyesterových pryskyřic. Tato práce je zaměřena na výrobní proces nenasyčených polyesterových pryskyřic z R-PETu (recyklovaný polyethyltereftalát), jednotlivý popis je tedy zaměřen na látky obsažené v tomto konkrétním procesu. Při používání jiných, převážně syntetických vstupních jednotek, mohou být kromě odlišné vstupní suroviny zastoupeny i jiné stabilizační a reakční látky. [DUCHÁČEK, 2006]

3.16.1 Polyethyltereftalát

Polyethyltereftalát (PET) patří do skupiny termoplastů konkrétně do polyesterů. PET se může vyskytovat v semikrystalické i amorfní (beztvaré) formě. Pro výrobu PET se používají dva výrobní procesy, výroba z kyseliny tereftalové a dimethyltereftalátový proces. Výsledný polyethyltereftalát je především využíván pro výrobu umělých vláken a plastových folií. Umělá vlákna jsou využívána převážně

v textilním průmyslu, zároveň slouží i při vyztužování jiných polymerů, jako jsou například pneumatiky a dopravní pásy. Nejvýznamnějším produktem z PET jsou vyfukované plastové lahve, které jsou široce využívány po celém světě kvůli jejich izolačním a jiným vlastnostem. Veškeré výsledné produkty mají dobré kluzké, izolační i pevnostní vlastnosti a díky teplotě tání okolo 260 °C se mohou výrobky z PETu trvale používat až do 100°C. [BĚHÁLEK, 2015]



Obr. 17 Strukturální vzorec Polyethyltereftalátu (PETu)

[<https://www.wikiwand.com/>]

3.16.2 Monoethylenglykol

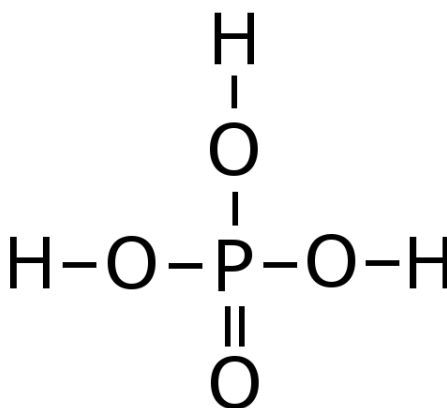
Monoethylenglykol (MEG) je dvou funkční alkohol, zároveň se jedná o organickou sloučeninu. MEG je ve své původní formě bezbarvá kapalina, bez vedlejšího a nežádoucího zápachu. Hlavní využití nalézá především v automobilovém průmyslu (pro výrobu nemrznoucích kapalin) a v chemickém průmyslu pro její reakční schopnosti. Jedná se o vysoce odolný roztok vůči mrazu, kdy při 70% MEG a 30% vody dokáže odolat i teplotám okolo – 50 °C. Při výrobním procesu polyesterových pryskyřic se tento alkohol používá při výrobě PET-Glykolizátu (meziprodukt ve výrobním procesu polyesterových pryskyřic). Společně s ním se při výrobě používají i další glykoly, jako je monopropylenglykol a diethylenglykol. [Malá encyklopédia chémie, 1980]

3.16.3 Octan Zinečnatý

Jedná se o organickou sloučeninu, konkrétně o sůl z kyseliny octové, která je lehce toxická a v původní formě krystalická. Využívá se v potravinářském průmyslu pro výrobu potravin a v chemickém průmyslu jako katalyzátor při výrobním procesu nenasyčených polyesterových pryskyřic. Dále se octan zinečnatý používá při impregnaci dřeva, nebo při výrobě jiných solí s obsahem zinku. [Malá encyklopédia chémie, 1980]

3.16.4 Kyselina fosforečná

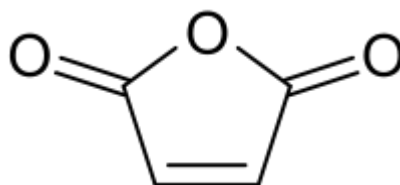
Kyselina trihydrogenfosforečná je bezbarvá (čirá) krystalická látka, jejíž bod tání dosahuje 42 °C. Kyselinu lze neomezeně mísit s vodou a tím měnit její viskozitu. Čím větší procentuální zastoupení kyseliny, tím větší viskozita roztoku, například při 80 – 90% zastoupení má kapalina již sirupovitý charakter. Zároveň platí, čím větší zastoupení kyseliny a menší vody, tím vyšší bod tání. Komerčně se kyselina fosforečná vyskytuje ve třech základních koncentrátech, a to 75, 80 a 85% roztok kyseliny. Kyselinu lze připravit termickou a extrakční výrobou ze samotného fosforu. [Malá encyklopédia chémie, 1980]



Obr. 18 Strukturální vzorec Kyseliny fosforečné [<https://www.wikiskripta.eu/>]

3.16.5 Maleinanhydrid

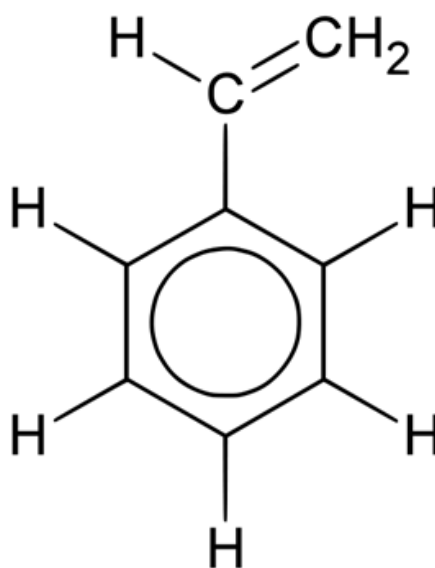
Jedná se o bezbarvou organickou sloučeninu se silným zápachem, kdy vzhledově připomíná již zmíněný octan, či kyselinu fosforečnou (bílé krystaly). Maleinanhydrid (MA) dosahuje teploty tání při 57 °C a teploty varu až 202 °C. MA se vyrábí oxidací butanu nebo benzenu. Zmíněné látky jsou vhněny teplým vzduchem na již zahřátý katalyzátor (reakční sloučeninu), kde látky oxidují a vzniká nový MA. Výsledný anhydrid se následně používá například při výrobě umělých pryskyřic. [Malá encyklopédia chémie, 1980]



Obr. 19 Strukturální vzorec Maleinanhydridu [<https://cs.m.wikipedia.org/>]

3.16.6 Styren

Nažloutlá aromatická kapalina se silným zápachem je využívána především při výrobě plastů, pryskyřic, barviv, lepidel, inkoustů a v gumárenském průmyslu. Při nižších koncentracích není styren nijak dráždivý, čím vyšší koncentrace, tím je zápach pronikavější a dráždivější. Jako nesnesitelná je označována koncentrace okolo 1300ppm. Teplota tání dosahuje přibližně $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota varu $146\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve výrobě polyesterových pryskyřic je styren používán jako reaktivní rozpouštědlo. [Malá encyklopédia chémie, 1980]



Obr. 20 Strukturální vzorec styrenu [<https://cs.m.wikipedia.org/>]

4 Výchozí podmínky řešení

Tato část diplomové práce je zaměřena na podrobný popis a vysvětlení procesu výroby syntetických polyesterových pryskyřic. Veškeré poznatky jsou získány na základě konzultace s odborníky, kteří se zabývají chemickou výrobou syntetických pryskyřic.

4.1 Výrobní proces nenasycených polyesterových pryskyřic z R-PET

Proces výroby pryskyřic z recyklovaného polyethyltereftalátu lze rozdělit do dvou základních procesů. Primární proces výroby spočívá v jednotné výrobě, kdy veškeré vstupní složky vstupují do jednoho (stejného) reaktoru. Jedná se o jednodušší, časově ale náročnější proces. Rozdělený výrobní proces již podle názvu značí rozdělení výroby na více fází. V první etapě za pomoci primárního reaktoru dojde k výrobě meziprojektu, který je pak používán při výrobě finálního produktu ve druhém reaktoru. Díky tomu dojde ke zrychlení chemických reakcí při výrobě a k efektivní úspoře času. Obě varianty jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.



Obr. 21 Vzorek vstupní suroviny

4.2 Primární výrobní proces

Podstatou primárního procesu výroby polyesterových pryskyřic je použití pouze jednoho reaktoru, ve kterém se celý postup výroby odehrává.

Vše začíná u recyklace odpadního PETu. Ten je pečlivě vyseparován a mechanicky nadrcen na drobné vločky (flakes) o velikosti 1x1 cm. Ve většině případech si chemické podniky nechávají plast předem rozdružit a rozdrtit. Kvalitu PET recyklátu tedy zajišťuje dodavatel, výrobce už jen zjišťuje požadovanou jakost suroviny. Pro kvalitní zpracování PETu je důležitá nízká vlhkost flakes, nulové zastoupení víček z polypropylenu, zbytku lepidel, etiket a jiné další kontaminace (dřevo, kovy). Flakes jsou dováženy a skladovány ve vakách o hmotnosti 600 – 1000 kg, nejlépe v blízkosti příslušného reaktoru.



Obr. 22 Vaky se vstupní surovinou

Výrobní proces začíná vstupem první základní suroviny, a to glykolu (nejčastěji mopolopylenglykolu). Monopropylenglykol (MPG) je vmíchán do reaktoru, který je postupně zahříván na teplotu 100 – 105 °C. Proces už od počátku probíhá v interní atmosféře N₂ (dusíku). Dusík je do reaktoru vstřikován za účelem odstranění přebytečného kyslíku (O₂) a zabránění tím riziku možného vznícení. Při dosažení zmíněné teploty je do reaktoru přidáván octan zinečnatý (Ac₂Zn) a zamíchán s MPG. Po přidání octanu je teplota v reaktoru zvýšena na ± 150 °C. Po dosažení požadované teploty je do reaktoru nasypána první část recyklovaných flakes. Dávkování vždy záleží na objemu reaktoru, lze tedy flakes dávkovat po více sekvencích, nejčastěji jsou dávky rozděleny do tří – dvou částí. Podle velikosti reaktoru taktéž záleží na celkovém množství použitého PETu. Na rozdíl od rozděleného procesu výroby glykolizátu, kdy PET tvoří až 75% veškerého obsahu, je procentuální zastoupení flakes v primárním procesu pouze 20 – 30%. Pokud by tedy byl reaktor dimenzovaný na stejný objem jako reaktor na výrobu glykolizátu, nemohl by zpracovávat stejné množství vstupních flakes.

Po přidání první dávky PETu se interní teplota zvýší na 200 – 210 °C, při této teplotě se první dávka flakes roztaví. Po rozpuštění první dávky se reaktor ochladí na 180 °C a přidá se další (finální) dávka rozdrčených flakes. Teplota se poté opět zvýší, tentokrát už na 220 – 230 °C, tato teplota je udržována po takovou dobu, dokud se veškerý plast zcela nerozpustí. Proces rozpouštění obou (všech) dávek flakes trvá dohromady přibližně 3-4 hodiny.

Po kompletním rozpouštění všech složek je reaktor opět ochlazen na 170 – 180 °C, v tomto okamžiku se do směsi přidá kyselina fosforečná, ta se po dobu 20 – 25 minut homogenizuje a hned poté je do reaktoru nasypána další složka, a to Maleinanhydrid (MA). Po přidání dalších dvou složek je teplota v reaktoru udržována okolo 180 °C po dobu jedné hodiny. Následně se teplota zvyšuje na 200 °C a po dosažení této teploty jsou odebrány první vzorky, u kterých se zjišťuje jejich číslo kyselosti. Cílem je dostat kyselost pod hodnotu 30 mg KOH/g, po zjištění vhodné kyselosti se proces esterifikace ukončí a teplota se sníží na 160 °C. Při snížené teplotě se do směsi přidávají stabilizátory, které slouží ke stabilizaci vzniklého roztoku polyesterové pryskyřice ve styrenu, který by bez příslušných stabilizátorů způsobil nenávratné ztuhnutí hmoty. Jako stabilizátor je například používán Hydrochinon (HQ) a Terbutylcatechol (TBC).

Po stabilizaci pryskyřice dojde k finálnímu ochlazení reaktoru na 100 – 115 °C a naředění vzniklé směšeniny styrenem. Ochlazená pryskyřice je z reaktoru spuštěna do ředící kádě s předloženým styrenem. Po dokonalém rozmíchání je finální roztok

polyesterové pryskyřice odčerpán do zásobníku nebo je plněn do sudových i jiných obalů. Přečerpávání vždy probíhá přes textilní vaky, které oddělí poslední zbytky nečistot a sraženin od finální pryskyřice. Produkt je v této fázi připraven k distribuci zákazníkům. Během výrobního procesu vzniká reakční voda, ta je z reaktoru odváděna a následně příslušně zpracovávána.



Obr. 23 Vytvrzený zásobníky z nenasycené polyesterové pryskyřice

4.3 Rozdělený výrobní proces

Rozdělený proces výroby začíná podobně jako předešlý, a to odběrem již předem vyčištěné vstupní suroviny. Drobné flakesy jsou předem vyčištěny a v blízkosti reaktoru 1 uskladněny ve vakách o hmotnosti 600 – 1000 kg. Na obrázku číslo 24 je vyfocena násypka, do které se přesype obsah připravených vaků.



Obr. 24 Násypka pro PET recyklát

Samotná výroba začíná rozehráním prvního reaktoru na 150 °C a přidáním monopropylenglykolu (MPG). Za stálého míchání je do reaktoru k MPG přidáván octan zinečnatý. Po smíchání obou prvotních činidel a dosažení požadované teploty 150 °C, je do reaktoru postupně přidávána vstupní surovina (flakes). Rozdrcený PET je dávkován ve třech fázích o stejném poměru. Dávkování je rozděleno kvůli rychlejšímu rozpouštění vstupní suroviny a kapacity reaktoru, při vyšších dávkách by docházelo k horšímu rozpuštění a celkově časově delšímu procesu. V průběhu rozpouštění se sleduje rychlost otáček míchání (odpor míchací jednotky) a celková teplota v reaktoru. Pokud je překročena zátěž míchadla, je nutno zpomalit otáčky, nebo po nutnou dobu přerušit dávkování.

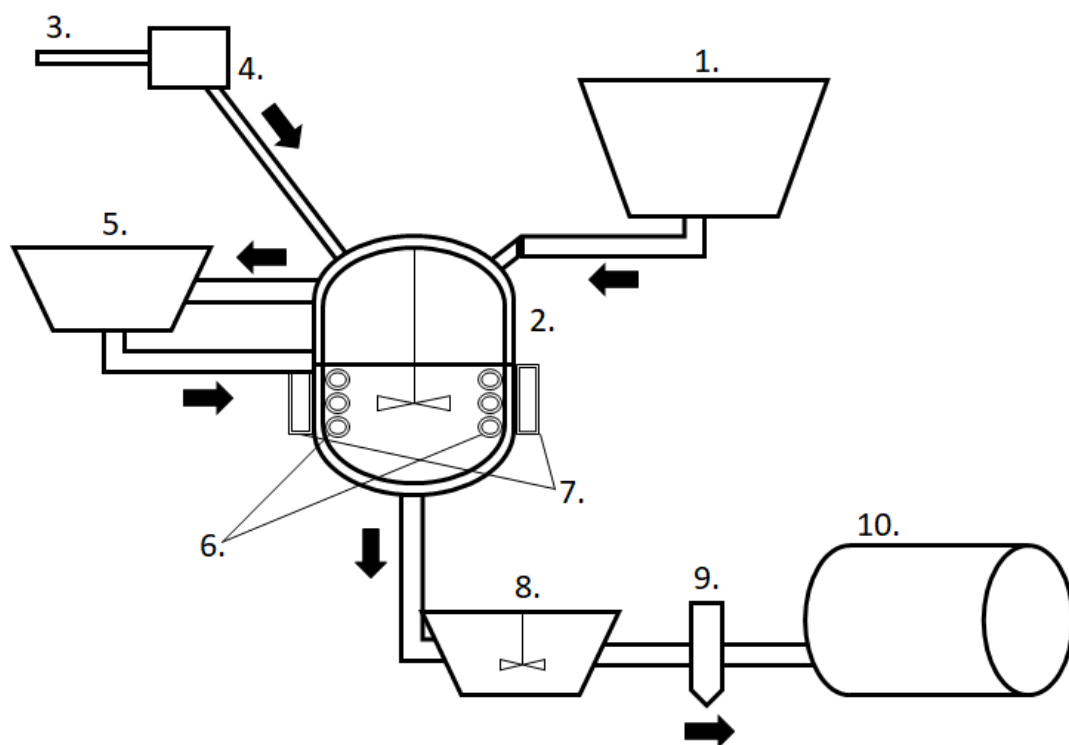


Obr. 25 Reaktor 1 na výrobu PET-glykolizátu

Při překročení hraniční teploty $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ v průběhu míchání a dávkování vstupní suroviny, je nutno dočasně odstavit vytápění reaktoru a snížit teplotu. Při těchto procesech dochází k destilaci přebytečné vody a vstupního MPG. Vydestilovaná kapalina se po rozpuštění veškerého PETu vrací zpět do reaktoru, i díky tomu při tomto procesu nevzniká žádná odpadní voda.

Po rozpuštění veškerých surovin a dosažení maximální teploty v reaktoru se po dvou hodinách odeberou první vzorky výsledného PET-glykolyzátu. Po zjištění vhodné kvality (efektivního rozpuštění) je samotná glykolýza ukončena a reaktor je ochlazen na $110\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při odebrání vzorků je pozorována kyselost, hydroxylové číslo a viskozita vzniklého produktu. Po ochlazení je PET-glykolyzát přečerpáván přes textilní filtry do zásobníku, kde je uskladněn pro další výrobní proces. Filtry slouží k zachycení nerozpuštěných složek, jako jsou nerozpuštěné flakes, nebo zbytky kovů a jiných nečistot, které dodavatel vstupní suroviny nezvládl zachytit.

Ze zásobníků ve kterých je výsledný meziprodukt udržován při teplotě 90 – 100 °C, probíhá přečerpání do druhého reaktoru, kde následně pokračuje druhá část rozděleného výrobního procesu. V této části výroby je používán stejný reaktor, jako při primárním procesu. Jedná se tedy o úplně stejný proces s tím rozdílem, že do reaktoru vstoupí již předpřipravený PET-glykolizát. V reaktoru probíhají stejné polykondenzační reakce (slučování) s ostatními složkami (kyselina fosforečná, maleinanhydrid a příslušné stabilizátory). Během procesu je reaktor patřičně zahříván a ochlazován v závislosti na přidávání daných složek. Během celé doby výroby se sledují fyzikální vlastnosti taveniny a její kyselost. Po dosažení požadovaných vlastností pryskyřice a přimíchání patřičných stabilizátorů (HQ, TBC), je tavenina vmíchána do monomerního rozpouštědla (styrenu). Výsledný produkt je znovu přečerpán přes textilní vaky do zásobníků, odkud je připraven k distribuci. Stejně jako u primárního procesu zde vniká i velké množství reakční vody, ta se na rozdíl od první fáze výroby nevrací zpět do reaktoru, ale je z něj odstraňována. S reakční (odpadní) vodou následně chemický podnik příslušně nakládá.



Obr. 26 Schéma reaktoru 1 na výrobu PET glykolizátu

Na obrázku 26 je znázorněno schéma výrobního procesu PET glykolizátu. Číslo 1. představuje násypku vstupní jednotky (PETu), číslo 2. už samotný reaktor, kde dochází k výrobě meziproduktu. Číslo 3 znázorňuje přívod všech ostatních látek,

4. odvážka, 5. je jednotka, do které směřuje odpařená voda a ze které po zkondenzování pokračuje zpět do reaktoru, 6. vodní chlazení reaktoru, 7. mediální ohřev reaktoru, 8. ředící jednotka se styrenem, 9. filtrační vaky, 10. zásobním finálního produktu.



Obr. 27 Vzorke finálního PET glykolyzátu

5 Metodika měření

Tato část práce je zaměřena na podrobný popis měření vstupních a výstupních surovin výrobního procesu. Tato měření jsou nedílnou součástí výroby polyesterových pryskyřic, zajišťují požadovanou kvalitu finálního produktu. Veškeré informace byly získány po konzultaci s odborníky, kteří se měřením a výrobou polyesterových pryskyřic přímo zabývají.

5.1 Měření vlastností vstupních surovin

Jakožto vstupní surovina ve zmíněném výrobním procesu je stanoven rozdrcený PET (flakes). Měření fyzikálně-chemických vlastností vstupních surovin probíhá ještě před vstupem flakes do výrobního procesu. Měření většinou probíhá před odkupem požadovaného množství rozdrcených vloček, společnost nejdříve na jedné vzorové šarži otestuje požadované vlastnosti a až poté dojde k odkupu zbylých dodávek. V následujících očíslovaných odstavcích jsou sepsány a vysvětleny jednotlivé měrné parametry.

1) Druh PET recyklátu: Základem výroby polyesterových pryskyřic z R-PETu je určení konkrétního druhu. Pro výrobu se používá buď bezbarvý (čistý) PET nebo barevná směs. Jako u jiného zpracování recyklátu platí, že bezbarvé flakes jsou pro výrobní proces daleko vhodnější a žádanější.



Obr. 28 Vzorek čistého (bezbarvého) PETu

2) Sypká hmotnost: Při stanovování sypké hmotnosti se do předem připravené kádinky o objemu 800 – 1000 ml naváží 250 g recyklátu a orientačně se odečte objem navážky. Jestliže je výsledný objem recyklátu menší než 1000 ml, sypká hmotnost vyhovuje. Pokud je objem rozdrčených vloček větší, sypká hmotnost vzorku nevyhovuje.

3) Velikost vloček: Požadovaná velikost vloček se zjišťuje optickou metodou. Vzorek flakes o hmotnosti 250 g se rozsype a rovnoměrně rozprostře na filtračním papíru o velikosti 50x50 cm. Na povrchu papíru jsou hledány kusy větší než 10 mm, tyto kusy jsou následně odděleny a zváženy. Matematicky se pak zjistí podíl velkých (nevyhovujících) částic ve směsi.

4) Obsah hnědého PETu: Stejně jako u předešlého měření se použije vzorek 250 g rozdrčeného PETu. Vzorek se opět vysype na filtrační papír o velikosti 50x50 cm, drť se rovnoměrně rozprostře a vyhledávají se flakes hnědé barvy. U vzorku čirého PETu se vyhledávají jakékoliv jiné barvy, které neodpovídají průhlednému recyklátu. Vyseparované hnědé kusy se následně zváží a matematicky se určí jejich procentuální zastoupení ve zkoumaném vzorku.

5) Obsah kovů: Pro zjištění obsahu kovů ve směsi se použije stejná gramáž vzorku, jako u předešlého měření. Směs se znovu vysype na totožný filtrační papír a rovnoměrně se rozprostře. Optickou separací je oddělen přebytečný kovový odpad, ten

je následně zvážen a určen jeho hmotnostní podíl. Rozprostřenou směs lze projet i menším magnetem, který nám pomůže najít drobnější kovové částice.

6) Obsah papíru: Stejným způsobem, jako u předešlých měření, se zjistí i obsah papíru ve směsi. Po optické separaci je papír zvážen a zjistí se jeho hmotnostní podíl ve zkoumané navážce.

7) Nealkoholizovatelný zbytek: Do připravené baňky se naváží 50 g rozdrčeného PET recyklátu s přesností 0,01 g. Následně se přidá 100 g diethylenglykolu a 0,5 g příslušného katalyzátoru. Naplněná baňka se přikryje tepelným štítem a začne se zahřívat. Teplota směsi se zahřeje na 245 °C a drží se do úplného rozpuštění flakes (přibližně dvě hodiny). Celý proces zahřívání a rozpouštění probíhá bez interní atmosféry (na rozdíl od výrobního procesu). Po rozpuštění recyklátu dochází k ochlazování roztoku (na 100 °C) a k jeho filtraci přes předem zvážené síto. Síto se následně promyje acetonem, nechá uschnout a opět zváží. Zjistí se rozdíl hodnot a usoudí se množství zastoupení jiných (nežádoucích) plastů ve směsi. Při optické kontrole výsledného vzorku glykolizátu lze posoudit přítomnost drobných a nežádoucích sraženin a jiných anomálií. To by opět mohlo znamenat vyšší zastoupení nežádoucích plastů v roztoku. Zastoupení jednotlivých druhů plastů se následně určuje níže popsanými postupy.

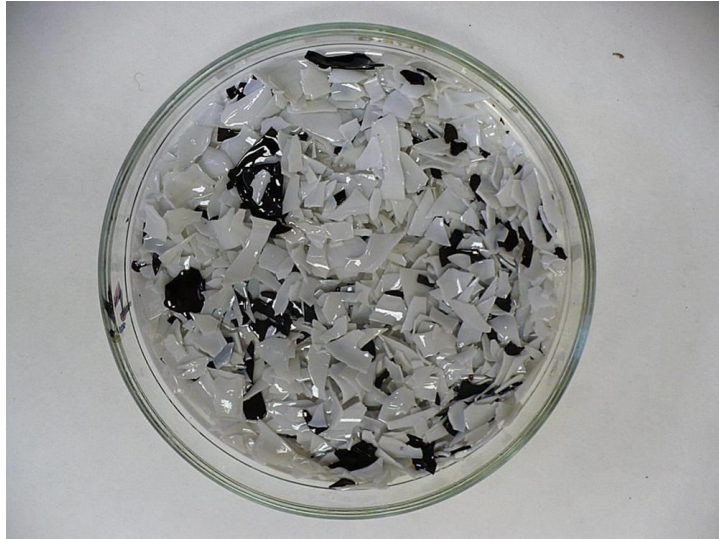
8) Obsah jiných polymerů: Častým problémem rozdrčeného PETu bývá nežádoucí obsah jiného plastu. Nejčastěji se do drti dostává například PP, PC, PS a další. Primární metodou zjišťování zastoupení jiných druhů plastů, je tzv. flotační metoda. Princip flotace spočívá v rozdílných specifických hmotnostech jednotlivých typů plastů. Proces probíhá v baňce zalité vodou nebo roztok NaCl (chloridu draselného). Pro oddělení plastů s nižší hmotností než 1 g/cm³ se použije roztok vody. Pro oddělení plastů s vyšší hmotností než 1 g/cm³ se použije zmíněný roztok NaCl. V tabulce číslo 2 jsou sepsány jednotlivé plasty a jejich specifické hmotnosti. Vzorek 50 g rozdrčeného PETu se nejprve odmastí pomocí saponátu, propláchne vodou a následně vysuší. Vzorek se nasype do určeného roztoku a pečlivě se promíchá. Podle zbytků na hladině se určí zastoupení nežádoucích plastů v recyklované směsi.

Druh plastu	Zkratka	Specifická hmotnost
Polypropylen	PP	0.90-0.93
Polyethylen (nh)	LDPE	0.93-0.95
Polyethylen (vh)	HDPE	0.95-0.98
Polystyren	PS	1.05-1.08
Polymethylmetakrylát	PMMA	1.17-1.22
Polykarbonát	PC	1.20-1.24
Polyvinylchlorid	PVC	1.30-1.45
Polyethylentereftalát	PET	1.34-1.40

Tab. 2 Specifická hmotnost plastů

9) Obsah PVC: Obsah PVC nelze zjistit flotační metodou jako u všech ostatních druhů plastů. Z tabulky 2 lze vyčíst, že specifická hmotnost jak PETu, tak PVC je velice podobná.

Zkouška zastoupení PVC se odehrává v Petriho misce o průměru 10 cm. Do misky se nasype vzorek PETu, tak aby naplnil přibližně jednu polovinu objemu misky. Vzorek se takto vloží do sušárny, která je předehřátá na 200 °C. Směs se nechá sušit přibližně půlhodiny. Po vyndání misky lze opticky vyseparovat PVC, které během sušení (na rozdíl od PET) zčernalo. Výsledek zkoušky je zobrazen na obrázku č. 29.



Obr. 29 Přítomnost PVC v Petriho misce

10) Vlhkost: Do předem zvážené a vyčištěné Petriho misky se naváží a nasype vzorek rozdrčeného PETu. Miska společně se vzorkem se vloží do přehřáté sušárny na 105 °C. Po cirká hodině sušení se vzorek vyndá a nechá se vychladit na laboratorní teplotu. Po vychlazení se miska s plastem zváží a zjistí se poměr odpařené vody.

5.1.1 Výsledky měření a statistické porovnání vstupních hodnot

Za účelem zjištění požadovaných hodnot vstupní suroviny, bylo změřeno a zaznamenáno šest vzorků rozdrčeného PETu. Měření probíhalo v souladu s postupy, které jsou sepsány v předchozí kapitole. V první tabulce číslo 3 jsou evidovány specifické meze, které musí vstupní surovina splňovat, aby její použití bylo vhodné pro výrobní proces nenasyčené polyesterové pryskyřice.

Analýza	Limit
Vlhkost [%]	< 2
Sypká hmotnost [kg/m ³]	> 250
Obsah kovů [ppm]	< 50
Obsah papíru [ppm]	< 50
Obsah hnědého PET [%]	< 10
Nealkoholyzovatelný zbytek [%]	< 0,3

Tab. 3 Specifikační hodnoty vstupní suroviny

V následující tabulce číslo 4 je zaznamenáno měření jednotlivých vzorků vstupních surovin.

Analýza	Vzorek 1)	Vzorek 2)	Vzorek 3)	Vzorek 4)	Vzorek 5)	Vzorek 6)
Vlhkost [%]	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Sypká hmotnost [kg/m ³]	833	625	714	625	555	625
Obsah kovů [ppm]	30	0	10	0	0	35
Obsah papíru [ppm]	0	0	0	0	0	0
Obsah hnědého PET [%]	0	3,0	5,0	0	0	0
Nealkoholyzovatelný zbytek [%]	0,1	0,03	0,07	0,4	0,14	0,12

Tab. 4 Měření vstupní suroviny

Po zjištění hodnot vstupní suroviny, lze při porovnání výsledků se stanovenými specifikačními hodnotami usoudit splnění prakticky všech vzorků. Pouze u vzorku číslo 4 došlo k překročení procentuální hodnoty u nealkoholizovatelného zbytku. Při tomto zjištění obvykle dochází k přeměření šarže za použití dalšího vzorku. Pokud se potvrdí zvýšený podíl nežádoucích plastů, je čistě na výrobci pryskyřice jak bude s touto informací nakládat. Pokud jsou limity překročeny minimálně (jako u vzorku číslo 4), je dovezená šarže použita k výrobě. Popřípadě lze tuto várku promíchat s jinou a tím zmírnit nežádoucí poměr měřených šarží.

Za zmínku stojí i zjištěné měření obsahu kovů, kdy limit sice překročen nebyl, ale poukazuje to na pravidelné zastoupení kovů ve směsích. Právě kovy jsou poté jednou z hlavních složek filtračních pytlů na konci výrobního procesu.

V následující tabulce číslo 5 je provedeno statistické měření naměřených dat z předchozí tabulky číslo 4.

Analýza	Průměr	Rozptyl	Směrodatná odchylka
Vlhkost [%]	1,033	0,0055	0,0745
Sypká hmotnost [kg/m ³]	662,83	7916,139	88,97
Obsah kovů [ppm]	12,5	214,583	14,64866
Obsah papíru [ppm]	0	0	0
Obsah hnědého PET [%]	1,333	3,888	1,972
Nealkoholizovatelný zbytek [%]	0,143	0,0144	0,12

Tab. 5 Statistické měření vstupních dat

V druhém sloupci tabulky 5 je vypočten aritmetický průměr měření. Ten představuje typickou hodnotu, která vystihuje soubor všech společných hodnot. Rozptyl ve třetím sloupci udává průměrnou hodnotu druhé mocniny všech odchylek, které jsou získané pomocí aritmetického průměru všech hodnot. Směrodatná odchylka v posledním sloupci představuje výsledek druhé odmocniny ze získaného rozptylu.

5.2 Měření vlastností finálního produktu

Stejně jako je důležitá analýza vstupních surovin, je nedílnou součástí výrobního procesu i analýza finálního produktu. Již předem se stanovují požadované fyzikálně-chemické vlastnosti produktu, které je nutné na konci výrobního procesu splnit. V následující části diplomové práce jsou popsány jednotlivé postupy měřených vlastností.

1) Viskozita: Jedná se o fyzikální veličinu, která určuje vnitřní tření v kapalině. Toto tření je způsobováno přitažlivou silou mezi jednotlivými částicemi v roztoku. Čím větší přitažlivou sílu částice mají, tím je silnější tření a tedy i vyšší viskozita. Viskozita se měří v mPas (milipascas sekund) a nejčastěji se u nenasyčených polyesterových pryskyřic pohybuje v rozmezí 200 – 2000 mPas. V laboratorních podmínkách se provádí viskozitní test finálního produktu, při použití vzorku pryskyřice a příslušných komponentů.

Do předem připravené nádoby o určitém objemu se odměří vzorek tekuté polyesterové pryskyřice (finálního produktu). Nádoba se vzorkem se umístí do temperovací lázně (vodní) při stále udržované teplotě 23 °C. Vzorek se ponechá v lázni přibližně 30 – 45min, dokud teplota pryskyřice nedosáhne stejné teploty vodní lázně, tedy v tomto případě 23 °C. Teplota měřeného vzorku se kontroluje teploměrem.

Do vytemperovaného vzorku se následně vloží vřetenem požadovaného typu a průměru. Je důležité, aby pod vloženým vřetenem nezůstávaly vzduchové bubliny, které by mohly zkreslit výsledek měření. Vřetenem se připojí k přístroji, který po zapnutí začne pomalu otáčet vřetenem, které míchá s pryskyřicí. Rychlost otáček vřeten se předem nastaví (např. 12 ot/min). Na stupnici přístroje se odčítá hodnota viskozity po deseti otáčkách (např. 300 mPas). Pro různé produkty se používají různé čísla vřeten (průměr) a rychlost otáček. Přístroj digitálně zaznamená aktuální viskozitu vzorku pryskyřice.

2) Geltime: Geltime neboli doba želatinace, je učení rychlosti, za kterou pryskyřice dosáhne takové hustoty, při které jí již nelze míchat. Proces zkoušky probíhá se vzorky v laboratorních podmínkách.

Do připravené nádoby se naváží požadované množství pryskyřice (např. 100 g) a vzorek se vytemperuje ve vodní lázni na 23 °C. Ke vzorku se přidávají vytvrzovací komponenty (např. urychlovač na bázi kobaltu) a síťovací činidla (organický peroxid).

Jednotlivé komponenty se zamíchávají postupně do připravené pryskyřice. Po dokonalém rozmíchání všech komponentů se zapnou stopky. Po zapnutí stopky se vzorkem postupně míchá pomocí ručního míchadla (dřívka) a pozoruje se narůstající hustota vzorku. Stopky se zastaví ve chvíli, kdy již nelze ručně se vzorkem míchat. Výsledný čas nám udává zjištěnou dobu želatinace.

3) Doba vytvrzení (reaktivita): Podobným způsobem jako u Geltime se provádí i metoda zjištění reaktivity finální pryskyřice. Rozdíl je v tom, že zde už se zkouška neprovádí manuálně, ale je zapotřebí vhodný přístroj na měření potřebných dat. Tato metoda popisuje měření maximální reakční teploty a doby dosažení maximální teploty během postupného vytvrzování nenasycené pryskyřice.

Do předem připravené zkumavky se naváží určité množství pryskyřice (25 g), ke které se přidají vytvrzovací a síťovací jednotky (viz. Geltime). Po rozmíchání všech komponentů se zkumavka umístí do vodní lázně o teplotě 23 °C. Do zkumavky se poté vloží termočlánek, který měří teplotu. Termočlánek je napojen k přístroji, který zaznamenává narůstající teplotu a čas. Měření trvá do doby, kdy teplota pryskyřice dosáhne maxima a dojde k finálnímu vytvrzení (vytvoření husté prostorové sítě).

4) Kyselost: Kyselost konkrétně číslo kyselosti slouží k evidenci obsahu nezreagovaných karboxylových (COOH) kyselin ve finální pryskyřici. Číslo kyselosti se udává v miligramech KOH (hydroxid draselný) na gram pryskyřice.

Metoda stanovení čísla kyselosti spočívá v titraci rozpuštěného vzorku pryskyřice hydroxidem draselným (KOH). Do titrační baňky se naváží přibližně 1g pryskyřice, k té se přidá směs příslušných rozpouštědel. Po zahřátí a kompletním rozpuštění vzorku se přidá indikátor bodu ekvivalence (např. fenolftalein). Vzniklá směs se poté titruje (přikapává) za stálého míchání roztokem KOH, až dobu ekvivalence. Bod ekvivalence nastane v okamžiku, kdy je do vzorku přidáno právě takové množství roztoku KOH, až dojde k reakci a zbarvení indikátoru (např. z bezbarvé do fialové). V tento okamžik se titrace zastaví a přikapané množství odměrného roztoku se zaznamená pro výpočet čísla kyselosti. Číslo kyselosti u nenasycených polyesterových pryskyřic se pohybuje od 5-30 mgKOH/g.

5) Podíl sušiny: Podíl sušiny má podobný princip, jako metodika zjišťování vlhkosti u vstupní suroviny. Nejprve se naváží a vyčistí nádoba, do které se následně

umístí vzorek pryskyřice. Nejčastěji se při zkoušce používá Petriho miska. Do misky se následně naváží vzorek pryskyřice (např. 2-5 g). Petriho miska se vzorkem se poté umístí do předehřáté sušárny, která má teplotu 100 – 120 °C. Sušení trvá přibližně 30 – 45min, následně je objekt se vzorkem vyndán a nechá se vychladnout na laboratorní teplotu (cca 21 °C). Po vychladnutí se vysušený vzorek zváží a zjistí se podíl sušiny, tedy rozdíl mezi zjištěnou hmotností původní pryskyřice a hmotností vysušeného vzorku.

5.3 LCA analýza nenasycených polyesterových pryskyřic

Life cycle analysis (LCA) představuje analytické hodnocení výrobku a jeho dopadu na životní prostředí. Proces LCA posuzuje komplexně celou dobu „života“ výrobku, od prvotní těžby surovin, až do finální podoby výrobku. Tento způsob posuzování dopadu výrobku na životní prostředí je součástí norem ISO 14000. Z metodického hlediska je struktura analýzy rozdělena do čtyř základních fází. První fáze se týká definice a rozsahu cíle, druhou fází je tzv. inventurní analýza, ve třetí fázi probíhá již stěžejní analýza dopadu a celkové hodnocení vlivu a ve čtvrté části se již jen interpretují výsledky a možné návrhy na zlepšení procesu. Metoda LCA tedy poskytuje významné podklady a informace pro následné rozhodnutí, které přispěje k environmentální šetrnosti cyklu výrobku po celou jeho dobu existence. I přes svou významnost nemá metoda LCA rozhodovací charakter, nýbrž pouze podpůrný a informační. Získávání informací může být časově náročné, a proto jsou již dnes dostupné databáze, které obsahují zjištěné informace o cyklech konkrétních materiálů.

Každý výrobní proces tedy může mít jiný dopad na životní prostředí, i když se na první pohled může jednat o zdánlivě stejný proces. [<http://eko-net.cir.cz>]

V této části práce jsou porovnány dva interní výrobní procesy polyesterové pryskyřice pomocí LCA analýzy. Data analýz byla poskytnuta chemickou společností, která se zabývá výrobou obou výrobních procesů uvedené v tabulce číslo 6. Samotná metoda LCA obsahuje řadu dílčích metod. Námi porovnávané pryskyřice byly vyhodnoceny metodou CLM 2001 a EPID 2003. Každá ze zmíněných metod pozoruje určitý počet faktorů, které jsou obsaženy v tabulce číslo 6.

LCA metoda	Limit	Hodnoty polyesterové pryskyřice na bázi R-PETU	Hodnoty standardní polyesterové pryskyřice na bázi Ortoftálu	Rozdíl hodnot
CML 2001	acidification potential, generic	9,66E-03 kg SO2-Eq	0,01 kg SO2-Eq	0,00034kg
CML 2001	climate change, GWP 100a	3,26 kg CO2-Eq	3,58 kg CO2-Eq	0,32kg
CML 2001	eutrophication potential, generic	3,23E-03 kg PO4-Eq	3,71E-03 kg PO4-Eq	0,48E-03 kg
CML 2001	photochemical oxidation (summer smog), high NOx POCP	6,02E-04 kg ethylene-Eq	8,21E-04 kg ethylene-Eq	2,19E-04 kg
CML 2001	photochemical oxidation (summer smog), low NOx POCP	3,47E-04 kg ethylene-Eq	4,98E-04 kg ethylene-Eq	1,51E-04 kg
CML 2001	stratospheric ozone depletion, ODP 10a	2,50E-07 kg CFC-11-Eq	3,68E-07 kg CFC-11-Eq	1,18E-07 kg
EPID 2003	land filling, bulk waste	0,23 kg	0,25 kg	0,02 kg
EPID 2003	land filling, hazardous waste	3,81E-05 kg	4,97E-05 kg	1,16E-05 kg
EPID 2003	land filling, radioactive waste	4,76E-05 kg	6,10E-05 kg	1,34E-05 kg
EPID 2003	land filling, slag and ashes	2.33E-03 kg	4,05E-03 kg	1,72E-03 kg

Tab. 6 LCA analýza

V tabulce 5 jsou sepsány jednotlivé metody včetně jejich specifických analýz. V prostředním zeleném sloupci jsou sepsány výsledné hodnoty jednotlivých analýz u polyesterové pryskyřice na bázi recyklovaného PETu, zatímco čtvrtý (žlutý) sloupec zleva obsahuje získané hodnoty polyesterové pryskyřice na bázi Kyseliny ftalové. V posledním nazelenalém sloupci je zaznamenán rozdíl měrných hodnot obou pryskyřic. Již podle barvy a zapsaných výsledků je evidentní, že rozdíl hodnot hraje ve prospěch pryskyřice na bázi R-PETu.

Veškeré zaznamenané hodnoty jsou posuzovány k výrobě 1kg pryskyřice. Tedy například: pokud činí hodnota analýzy 3,26 kg CO2-Eq, znamená to, že na výrobu 1kg pryskyřice se vypustí do atmosféry 3,26 kg oxidu uhličitého. Tato hodnota udává celistvý proces výroby včetně těžby surovin, dopravu, výrobu glykolů, kyselin a dalších nezbytných procesů pro výrobní proces. Tuto celistvost určuje i zkratka Eq, ta představuje ekvivalent dopadu konkrétního skleníkového plynu na globální oteplování

a životní prostředí. V hodnotách lze nalézt i písmeno E doplněno o konkrétní číslo. To vyjadřuje exponent vynásobeným číslem zatím. Například $4,76E-05$ značí 0,0000476.

Při porovnání CLM metody je zjištěna u polyesterové pryskyřice na bázi R-PETu o $3,4E-04$ kg nižší produkce SO_2 (oxid siřičitý), o 0,32 kg nižší produkce CO_2 (oxid uhličitý), o $0,48E-03$ kg produkce PO_4 (fosforečnan), o $2,19E-04$ kg menší produkce vysokého NO_x (oxidu dusíku), o $1,51E-04$ kg menší produkce nízkého NO_x a celkově o $1,18E-07$ kg nižší produkce CFC (chlór-fluorované uhlovodíky).

U následujícího porovnávání metodou EPID je zjištěna u polyesterové pryskyřice na bázi R-PETu nižší produkce skládkování velkoobjemového odpadu o 0,02kg, nižší produkce nebezpečného odpadu o $1,16E-05$ kg, menší produkce radioaktivního odpadu o $1,34E-05$ kg a taktéž menší produkce strusky a popela o $1,72E-03$ kg.

Z celkové posouzení LCA analýzou lze konstatovat, že výroba polyesterové pryskyřice z recyklovaného polyethylentereftalátu je ve značné míře environmentálně šetrnější, než standartní polyesterové pryskyřice. A to jak v produkci skleníkových plynů, tak i v tvorbě odpadu.

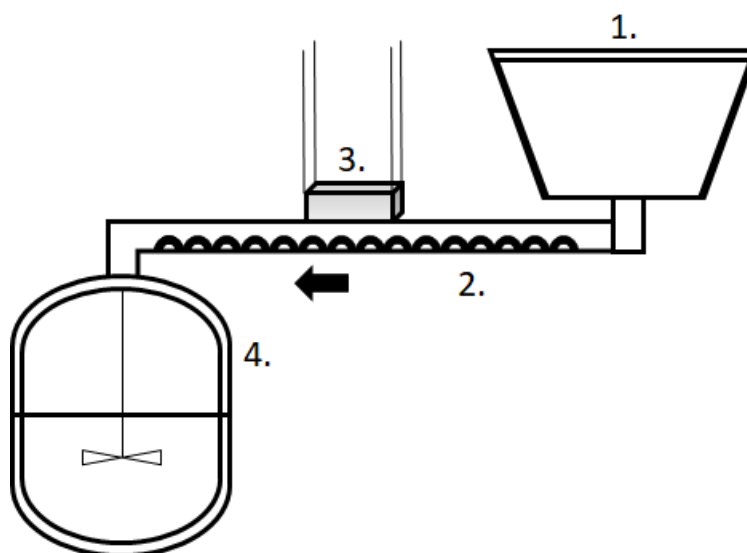
5.4 Inovace výrobního procesu

I přes nevyhnutelný fakt, že díky výrobnímu procesu nenasycených polyesterových pryskyřic z odpadního plastu, dochází k masivnímu zpracování odpadního PETu, což napomáhá znovu využívat nepotřebný odpad, který stále čím dál víc zahlcuje svět, se přesto najdou ve výrobním procesu drobné nuance, které mohou mnohdy zapříčiňovat horší kvalitu finálního produktu, a ty které nepřispívají odlehčování a nápravě stavu životního prostředí. V následujících kapitolách jsou navrženy a popsány inovace, které mohou zlepšit kvalitu finálního produktu a zároveň o něco více pozvednout environmentální význam výrobního procesu.

5.4.1 Magnetická separace

Již při měření vstupní suroviny, byly nalezeny zbytky kovových částic ve směsi rozdrceného PETu. Při výrobním procesu jsou právě kovy jednou z hlavních složek filtračních vaků, které filtrují pryskyřici před umístěním do zásobníků.

Inovace magnetické separace spočívá v umístění vhodného feritového magnetu před vstupem rozdrčených flakes do reaktoru. Mezi násypkou a reaktorem bude implementovaný pneumatický pás, který bude přivádět vstupní surovinu do reaktoru. Právě v prostoru tohoto pásu bude umístěn závěsný magnet o vhodné velikosti. Díky magnetické separaci dojde k rapidnímu snížení magnetického odpadu v textilních vacích. Tedy k celkovému snížení množství odpadních složek z výroby polyesterových pryskyřic. Zároveň dojde ke zkvalitnění výrobního procesu a v neposlední řadě i v nezávislosti chemické společnosti na kvalitě dodávaných vstupních surovin z hlediska obsahu kovových částic. Implementovaná magnetická separace do výrobního procesu je znázorněna na obrázku 30.



Obr. 30 Schéma magnetické separace

Na obrázku číslo 30 je znázorněno zjednodušené schéma inovace magnetické separace vstupní suroviny. Číslem 1. je na obrázku označena násypka, do které je přesypán rozdrčený PET a odkud následně pokračuje do výroby. Číslo 2. znázorňuje přidanou pneumatickou dopravu, která přesune drť pod magnetem do reaktoru. Číslem 3 je označen závěsný magnet, který bude zachytávat zbytky kovových částic, 4. představuje reaktor, do kterého směřuje vstupní jednotka.

V následující tabulce číslo 7 jsou odhadnuty jednotlivé ekonomické a provozní údaje vzniklé inovace na separaci magnetického odpadu.

Analýza magnetické inovace	Celkem
Investiční náklady [Kč]	950 000
Stavební úpravy [Kč]	360 000
Provozní náklady [Kč/rok]	530 000
Účinnost [%]	98
Podíl na snížení produkci odpadů (objem odpadu)	Nízký

Tab. 7 analýza magnetické inovace

5.4.2 Separace nerozloženého PETu z filtračních pytlů

Ať už u přímé nebo rozdělené výroby je finální produkt z reaktoru přepravován do zásobníků přes textilní filtrační pytle. Tyto vaky zachycují veškeré nečistoty, které v pryskyřici během procesu zůstaly. Nejčastěji jsou zachycovány zbytky neseparovaných kovů a části dokonale nerozpuštěné vstupní suroviny. Tu úplně největší složku tvoří právě nedokonale rozpuštěný PET. S použitými vaky je poté nakládáno jako s nebezpečným odpadem a jsou proto ve vhodné spalovně spalovány.

Principem inovace je použité vaky vyčistit a vyseparovat znovupoužitelný nerozpuštěný PET. Jelikož vaky proudí produkt v tekutém stavu, je jejich přímá separace značně nevhodná. Je zapotřebí použité filtrační vaky promýt v organickém rozpouštědle (v tomto případě nejlépe styren, který se využije i ve výrobě polyesterových pryskyřic), díky čemuž dojde k odstranění rozpustných složek. Poté se filtrační vak vyjme z organického rozpouštědla a vysuší. Zůstatkový nerozpuštěný PET se následně mechanicky odstraní z filtračního vaku a lze jej znovu využít při výrobě polyesterových pryskyřic, či PET glykolizátu. Díky této inovaci dojde k maximálnímu využití vstupní suroviny a zároveň dojde k efektivnímu snížení množství odpadu z výroby.

V následující tabulce 8 jsou odhadnuty ekonomické a provozní údaje o provozu nové inovační jednotky.

Analýza separační inovace	Celkem
Investiční náklady [Kč]	740 000
Stavební úpravy [Kč]	240 000
Provozní náklady [Kč/rok]	445 000
Účinnost [%]	90
Podíl na snížení produkci odpadů (objem odpadu)	Vysoký

Tab. 8 Analýza separační inovace

5.4.3 Vícestupňová destilace odpadních vod

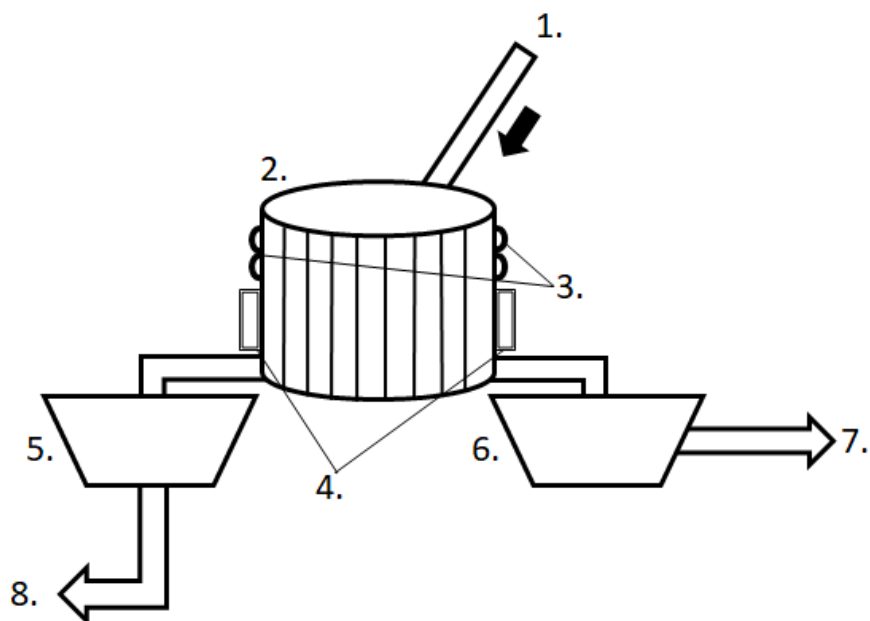
Při výrobním procesu polyesterových pryskyřic vzniká vedlejší produkt v podobě odpadní průmyslové vody, která je odsávána z reaktoru během několikahodinového vaření a míchání všech komponentů finální pryskyřice. Z kapitoly 4.3 (Rozdělený výrobní proces) lze vyčíst, že při výrobě PET-glykolizátu, neboli meziprojektu, dochází k návratu zkondenzované vody zpět do reaktoru, kde je smíšena se směsí a nevzniká tak tedy žádná odpadní voda. Proces výroby meziprojektu je tedy velice vhodný jak z hlediska kvality procesu, tak z hlediska nulové produkce odpadních vod. Jenže tento proces je pouze vloženu (přidanou) inovací, tak či onak proces pokračuje do další fáze výroby polyesterových pryskyřic, kde stejně jak z primárního procesu vzniká odpadní voda. Vmíšena voda do meziprojektu tedy nezmizí, ale je později vyseparována v další části výroby, tedy nám stejně vznikne. Při výrobě polyesterových pryskyřic je výsledkem z 90 – 96% finální produkt a zbylá procenta zastupuje právě odpadní voda. Tedy například v reaktoru o objemu 10t, kdy je reaktor naplněn do maximální kapacity, se vyprodukuje přibližně 9 000 – 9 600 kg pryskyřice a 400 – 1000 kg odpadní vody. Při každodenním provozu například dvou reaktorů, kdy každý by byl schopen vyprodukovat denně tři šarže pryskyřice o maximálním objemu (10t), dosahovaly by hodnoty 2 190 t za rok, s přihlédnutím na nejvyšší možnou produkci vody.

Procesní odpadní vody jsou zkalené a disponují vysokou toxicitou, která je evidentní již ze štiplavého zápachu. V těchto vodách se nenachází pouze zbytky nerozpuštěných sloučenin z výrobního procesu, ale řada dalších organických látek, které při výrobním procesu vznikly. Pro představu lze zmínit například Butanal,

Diethylendioxid nebo třeba Phenol. Tyto látky se mohou během procesu uvolnit, jako řada dalších a podobných organických látek.

Při následném zpracování odpadních vod, dochází nejčastěji ke spalování. A to především kvůli vysoké koncentraci nežádoucích organických látek v odpadní vodě. Kdy je podíl nežádoucích organických látek ve vodě 7-5 % z celkového množství odpadní vody.

Navržená inovace vícestupňové destilace odpadních vod spočívá v odlišnosti bodu varu u jednotlivých organických sloučenin. Vyseparovaná voda by byla nahnána do destilačního reaktoru, kde by se proces započal nejprve nízkou stupňovou destilací. Voda by se nejdříve zahřála přibližně na 75 °C, kdy by již docházelo k destilaci některých alkoholů a aldehydů. Odpařené látky by byly odváděny do odpadního zásobníku. Následovala by destilace pod bodem varu vody, přibližně okolo 95 – 97 °C, v tento moment by docházelo k odstraňování zbylých látek, které mají stanovenou teplotu varu po 100 °C. Následovala by přesně 100 °C destilace vody, která by vydestilovanou vodu odváděla do druhého zásobníku, určeného pro již nově separovanou vodu. Po důkladné destilaci veškeré vody by se proces ukončil. Zbylé látky, které mají vyšší teplotu varu, by zůstaly v destilačním reaktoru a byly by přepuštěny do prvního zásobníku, do kterého směřovali látky při nízkou stupňovou destilaci. Obsah toho zásobníku by byl příslušně odstraňován (spalován) jako nebezpečný odpad. Vydestilovaná voda by se ve druhém zásobníku ochladila a mohla být zpětně použita ve výrobním procesu (chladičí kapalina), nebo by proces čištění pokračoval do příslušné čističky odpadních vod. Tento proces by zajistil snížení objemu odpadu během výrobního procesu, zároveň by napomohl znovu využít odpadní vodu v procesu chlazení a tím snížit náklady a objem nové chladičí kapaliny.



Obr. 31 Schéma destilačního procesu odpadních vod

Na obrázku číslo 31 je znázorněno jednoduché schéma vícestupňového destilačního procesu odpadních vod. Číslo 1. představuje výstup vody z procesního reaktoru a zároveň vstup do destilační jednotky 2., 3. představuje vodní chlazení a 4. topné zařízení. Číslo 5. znázorňuje jednotku vydestilovaných a vyseparovaných odpadních látek, které jsou následně příslušně odstraněny 8., číslo 6. představuje jednotku, do které je vydestilovaná voda a ta je následně příslušně znovu využita 7.

Následující tabulka číslo 9 znázorňuje ekonomický a provozní odhad destilační jednotky.

Analýza destilační inovace	Celkem
Investiční náklady [Kč]	4 200 000
Stavební úpravy [Kč]	450 000
Provozní náklady [Kč/rok]	2 300 000
Účinnost [%]	90-95
Podíl na snížení produkci odpadů (objem odpadu)	Vysoký

Tab. 9 Analýza destilační inovace

5.4.4 Zhodnocení navrhovaných inovací

Každá z navrhovaných inovací vede ke snížení vzniku odpadů při výrobním procesu polyesterových pryskyřic. Z hlediska ekonomického se však nejedná o levné projekty, minimálně u destilační jednotky pro odpadní vodu. Vybudování samotné jednotky by znamenalo vysokou investici. I když by se dokázalo vyseparovat přes 90 % odpadních vod a znovu využít například pro chlazení, náklady na vybudování tohoto systému by zcela jistě nenahradilo množství vody, které by nahradilo dosavadní čerpanou vodu na chladič systémy. Proto tato inovace má převážně environmentální význam. Z hlediska produkce odpadních vod určených k odstranění, by se jednalo o vysoké snížení produkce z výrobního procesu.

Co se týče inovace, která spočívá v umístění magnetu nad pneumatický dopravník, je ekonomický faktor poměrně výhodnější. Investice by zdaleka nedosahovala takových výší jako předešlá vícestupňová destilace. Zároveň by napomohla ke zkvalitnění výrobního produktu, který by neobsahoval ani stopkové zastoupení drobných kovů. Tato inovace počítá i se snížením odpadních kovů ve filtračních jednotkách a to znamená i celkové snížení produkce odpadů z výrobního procesu. Na rozdíl od ostatních inovací by snížené množství celkové produkce odpadu, nedosahovalo takových hodnot, už jen pro to, že by docházelo k odstraňování zbylých a drobných kovových částic.

Inovace založená na separaci nerozloženého PETu ve filtračních vácích má opět především environmentální význam. Zavedení separační linky by nebyla tak nákladná investice vzhledem k tomu, že by zde byl jako organické rozpouštědlo použit styren, který je běžně používán v příslušné chemické výrobě. Navíc by však byl nutný personál, který by manuálně vaky čistil. Vyseparovaná nerozpuštěná vstupní jednotka by mohla být znovu využita ve výrobním procesu, tento malý podíl by však chemický podnik nijak ekonomicky neoceníl. Z hlediska produkce odpadů to má však význam a produkce nebezpečného odpadu nutného k odstranění by se tak vysoce snížila.

6 Diskuse

Tato diplomové práce poukazuje na problematiku plastového odpadu a jeho negativního dopadu na životní prostředí. Efektivnost při jeho následném zpracování bude hrát nesmírnou roli pro udržitelnost kvality životního prostředí. Proto je zapotřebí začít tomuto druhu odpadu předcházet, tím můžeme nejvíce zbrzdit zamořování této planety plastem. Pokud nelze předejít jeho vzniku, tak ho po spotřebě opět využít, či zpracovat a využít pro další účel. Od vzniku prvního polymeru uběhlo mnoho let a dnes se vyrábí široká škála obalových plastů. Je zapotřebí neustále vyvíjet recyklační technologie na zpracování co nejvíce druhů těchto odpadních plastů. Zcela se ztotožňuji s výrokem: „Objem výroby plastových výrobků každoročně narůstá a z plastu se postupem času stal dobrý sluha, ale zlý pán.“ [SEDLÁKOVÁ A, 2019]. Plast je nepochybně dobrým sluhou právě pro jeho výjimečné izolační a ochranné vlastnosti. Proto by se plastový obal měl postupně nahrazovat ekologičtějšími obaly, které nebudou tolik zatěžovat životní prostředí. Významností plastového odpadu z hlediska zátěže na ŽP se ve své práci zabývala i [SEDLÁKOVÁ A, 2019], její práce byla zaměřena především na charakteristiku plastu a podrobný popis jeho recyklace. Je zapotřebí se tomuto tématu věnovat a navrhnout možná řešení ke zpracování a znovu využití odpadního materiálu.

V této diplomové práci je kladen důraz především na jeden konkrétní plastový obal a to PET (polyethylentereftalát). Tento druh plastu je vlajkovou lodí mezi ostatními plasty. Tomuto plastu zasvětila svou diplomovou práci i [KABELÍKOVÁ L, 2017]. Její práce na rozdíl od mé popisuje daleko podrobněji výrobu PETu a rozdrčených PET vloček, či granulátu. Značná část této práce je věnována jakosti vloček (flakes) a testování kvality vybraných PET lahví. Je zapotřebí o tomto materiálu vědět co nejvíc a díky tomu s ním i co nejlépe nakládat. Dnes již PET najde opětovné využití v mnoha odvětvích. Jednou z možností je tento materiál použit na fyzikální zpracování a výrobu umělého vlákna. Toto vlákno lze využít v oděvním nebo v automobilovém průmyslu. Převážná část mé práce je zaměřena na využití polyethylentereftalátu na výrobu nenasyčených polyesterových pryskyřic. Tento proces využije velké množství odpadní PETu a napomáhá tak k jeho znovuvyužití. Smyslem a součástí této práce bylo podrobně popsat výrobní proces nenasyčené polyesterové pryskyřice z recyklovaného PETu a seznámit tak čtenáře s možným řešením při recyklaci a znovuvyužití plastového odpadu. Zároveň byl účel práce provést metodické přeměření rozdrčených flakes,

porovnání dvou podobných výrobních procesů z hlediska poškozování životního prostředí a v neposlední řadě bylo účelem navrhnout možná opatření (inovace), pro zvýšení šetrnosti výrobního prostředí z hlediska produkce odpadů.

Právě inovativnost je v průmyslu a odpadovém hospodářství nesmírně důležitá. Každá nová technologie, která povede k šetrnějšímu procesu výroby a nakládání má svůj smysl. Zároveň by se společně s tím mělo přihlížet i na soulad společenské, hospodářské a přírodní hodnoty. Pouze s přihlížením ke všem těmto třem faktorům, lze dosáhnout trvale udržitelného rozvoje a zachovat tak lidstvo i přírodu ve vhodném udržitelném stavu.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá využitím odpadního plastu pro výrobu syntetických nenasycených polyesterových pryskyřic. V úvodu práce byl uveden popis legislativy, která se týká odpadů jako takových. Následně byly popsány jednotlivé pilíře odpadového hospodářství, zvláště ty které napomáhají k omezování vzniku, či k dalšímu využití odpadu. Celá práce je zaměřena na plastový odpad, takže i zmíněný popis určitého druhu nakládání je věnován především tomuto druhu odpadu. Největší prostor je v úvodní práci věnován recyklaci plastového odpadu. Je zde popsán prvotní proces třídění, mechanické separace až po různé druhy znovuvyužití plastového odpadu. Posléze jsou rozebrány odpady přímo z chemické výroby. Na tyto odpady navazuje v práci část, která se věnuje komplexnímu rozboru makromolekulárních látek. V této části jsou důkladně popsány jednotlivé druhy makromolekul. Obsaženy jsou zde konkrétní druhy řetězců a následné podruhy syntetických látek. Jsou zde zároveň definovány jednotlivé druhy vzniku makromolekul. Poslední část literární rešerše obsahuje stručný popis syntetický pryskyřic, ke kterým je přiřazen i popis jednotlivých komponentů výrobního procesu nenasycených polyesterových pryskyřic. Tyto látky jsou zde popsány právě kvůli tomu, že jsou později zmíněny v metodické části diplomové práce.

Metodická část se věnuje podrobnému popisu výrobního procesu nenasycených polyesterových pryskyřic z recyklovaného PETu. Právě PET zde hraje významnou roli a jako hlavní vstupní jednotka nahrazuje jiné synteticky připravené látky. Celý proces je rozdělen do dvou výrobních procesů. První primární proces spočívá v přímé výrobě nenasycené polyesterové pryskyřice. Tento proces se celý odehrává v jedné reaktoru, kde dochází k tavení vstupní suroviny a následnému míšení s příslušnými látkami. Druhý rozdělený proces spočívá v rozdělení výroby do dvou sekcí. Zapotřebí jsou zde dva reaktory, kdy první připravuje ze vstupní suroviny meziprodukt (PET-glykolizát) a druhý následně používá vzniklý meziprodukt pro výrobu finální pryskyřice. Tento rozdělený proces napomáhá k celkově rychlejší a efektivnější výrobě.

Následně je v diplomové práci sepsána poslední část a to metodika měření. V této části jsou podrobně sepsány jednotlivé metody měření vstupních a výstupních jednotek procesu výroby nenasycených polyesterových pryskyřic. U vstupní suroviny (PETu) je provedeno měření šesti vzorků. U každého vzorku bylo zkoumáno 6

vlastností, které se následně porovnali se specifickým limitem pro výrobu pryskyřic z R-PETu.

Jako další část metodiky měření je LCA analýza nenasycených polyesterových pryskyřic. V této kapitole je popsána a porovnána LCA analýza dvou pryskyřic, kdy jedna pryskyřice je vyráběna z recyklovaného PETu, zatímco druhá ze synteticky připravené látky konkrétně z kyseliny Ortoftalové. LCA analýzu zde zastupují dvě metody, metoda CLM 2001 a EPID 2003. Tyto dvě metody byly poskytnuty pro analýzu v této diplomové práci. Při porovnání obou metod bylo zjištěno, že při procesu výroby pryskyřice z R-PETu, dochází k nižšímu poškozování životního prostředí. Každá z uvedených hodnot R-PET pryskyřice činila menší produkci škodlivé látky. Lze tedy uvést, že výroba pryskyřice z recyklátu má příznivější vliv na životné prostředí, než výrobní proces pryskyřice ze synteticky připravené látky.

Závěrečná část metodiky měření obsahuje navržené inovace pro výrobní proces polyesterových pryskyřic. Tyto inovace jsou zaměřeny především na snížení produkce odpadů ve výrobním procesu. První inovace spočívá v umístění pásu a magnetu, mezi násypku a reaktor. Pásová doprava vstupní suroviny by dopravovala PET do reaktoru přes závěsný magnet. Tento magnet by efektivně zbavoval drť od drobných kusů kovů, které nebyli předtím řádně vyseparovány. Tato inovace by napomohla snížení obsahu nevhodných kovů v reaktoru a následně i ve filtračních vacích. Právě v těchto vacích tvoří jednu z hlavních odpadních složek kov. Druhá inovace spočívá v důkladném pročištění zmíněných filtračních pytlů. Tyto pytle (vaky) jsou umístěny na konci výrobního procesu před zásobníkem. Po každé jednotlivé výrobě jsou měněny tak aby docházelo k efektivnímu zachytávání veškerých nečistot. Následně je s nimi nakládáno tak, jako s nebezpečným odpadem a jsou bez jakékoliv separace spalovány v příslušných spalovnách. Námi navržená inovace by vedla k důkladnému pročištění. Největší část zachyceného odpadu tvoří nerozpuštěné hrudky vstupního produktu. Právě tato část by byla odejmuta a navrácena zpět do procesu výroby, kde by došlo k jejímu rozpuštění a znovuvyužití. Tímto vyčištěním by došlo ke snížení množství odpadů z procesu výroby. Při primárním výrobě, či při druhé fázi rozděleného výrobního procesu, dochází během vaření směsi v reaktoru k uvolňování odpadní vody. Tato voda obsahuje velké množství těkavých a jiných látek. Voda je následně spalována nebo nákladně přečišťována a ředěna. V poslední inovaci je popsán návrh na znovuvyužití odpadních vod ve výrobním procesu. Voda by podléhala několika stupňové destilaci, kde by došlo k oddělení vody a ostatních nevhodných (toxických) složek. Celý proces

destilace tedy spočívá v rozdílnosti bodu varu jednotlivých látek. Vyseparovaná voda by se následně mohla znovu využít jako chladicí kapalina. Sloužila by tedy například ke snižování teploty zahřátého reaktoru.

8 Literatura

- 1) Analýza životního cyklu (LCA) | Inovace výrobků a životní prostředí | Nástroje a návody | Eko-Net CIR. *Aktuality / Eko-Net CIR* [online]. Copyright © 2006 [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: <http://eko-net.cir.cz/analyza-zivotniho-cyklu-lca->
- 2) Běhálek L, Polymery [online], © Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2015, ISBN 978-80-88058-68-7. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- 3) BEŇO, Zdeněk. *Recyklace: efektivní způsoby zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2011. ISBN 978-80-214-4240-5.
- 4) BOŽEK, František, Rudolf URBAN a Zdeněk ZEMÁNEK. *Recyklace*. Vyškov: [Vysoká vojenská škola pozemního vojska], 2003. ISBN 80-238-9919-8.
- 5) ČERNÁ, Břetislava a Radomil GREGOR. *Úvod do technologie plastů*. Brno: Univerzita J.E. Purkyně, 1988.
- 6) DASARI, Aravind, Yiu-Wing MAI a Zhong-Zhen YU. *Polymer Nanocomposites: Towards Multi-Functionality*. Imprint: Springer, 2016. Engineering Materials and Processes. ISBN 9781447168096.
- 7) DIRNER, Vojtech. *Ochrana životního prostředí: základy, plánování, technologie, ekonomika, právo a management*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997, 333 s. ISBN 80-7078-490-3.
- 8) Ducháček Vratislav.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- 9) DUPLIKOVÁ, Michaela. *Problematika recyklace PET lahví: Současný stav a perspektivy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16737/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí.
- 10) FIEDOR, Jiří. *Odpadové hospodářství I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2573-1.
- 11) GOWARIKER, V. R. *Polymer science*. New York: John Wiley, 1986. ISBN 0-470-20322-6.
- 12) HANH, Filip. *Kompozity na bázi přírodních vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/21464/final->

- thesis.pdf?sequence=6. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Příkryl, Radek.
- 13) CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
 - 14) Internationally Peer Reviewed Chemical Safety Information [online] [cit. 2021-11-12]. Dostupné z <https://inchem.org/#/>
 - 15) Jak-se-recykluje-plast, [online]. Dostupné z <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-plast>, © 2007 - 2022 TRÍDĚNÍODPADU.CZ | CONCEPT42. [cit. 2022-01-12]
 - 16) JANOŠKO, Ivan. *Odpadní plasty - odstraňování a recyklace*. *Komunalweb* [online]. © 2011 Profi Press s. r. o. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://komunalweb.cz/odpadni-plasty-odstranovani-a-recyklace/>
 - 17) KABELÍKOVÁ, Lucie. *Posouzení vhodnosti PET drtě firmy PETKA CZ, a.s. pro výrobu granulátu k potravinářským účelům* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/qn490f/>.
 - 18) KAŠPÁRKOVÁ, Věra. *Charakterizace polymerních roztoků a částicových soustav: On the characterization of polymer solutions and particulate systems : teze habilitační práce*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2010. ISBN 978-80-7318-970-9.
 - 19) KOO, Joseph H. *Polymer nanocomposites: processing, characterization, and applications*. Second edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 9781260132311.
 - 20) LUKAČIK, Jan. *Využití recyklovaných plastů v chemické výrobě*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta životního prostředí, Katedra aplikované ekologie.
 - 21) *Malá encyklopédia chémie*. 2. preprac. a dopl. vyd. Bratislava: Obzor, 1980. Malé encyklopédie.
 - 22) Meissner B, Zilvar V, *Fyziky polymerů – Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL, ALFA, Praha 1987, ISNB 04-634-87
 - 23) Ministerstvo životního prostředí. *Mzp.cz* [online]. [cit. 2021-11-17].
 - 24) MRKVIČKOVÁ, Simona. *Modifikace nenasyčených polyesterových pryskyřic*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/36765>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce Blaha, Antonín.

- 25) MÜLLER, Miroslav. Zpracovny nekovového odpadu. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, katedra materiálu a strojírenské technologie, 2008. ISBN 978-80-213-1840-3.
- 26) OSSWALD, Tim A. *Polymer processing fundamentals*. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, c1998. ISBN 1569902623.
- 27) OSSWALD, Tim A., E. BAUR a Natalie S. RUDOLPH. *Plastics handbook: the resource for plastics engineers*. 5th edition. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, [2019].
- 28) RAVVE, A. *Principles of polymer chemistry*. 3rd ed. New York: Springer, c2012. ISBN 978-1-4614-2211-2.
- 29) RUBEŠ, David. Příprava nenasycených polyesterových pryskyřic se sníženou hořlavostí. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/78551/RubesD_PripravaNenasycenych_MV_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Univerzita Pardubice. Fakulta chemicko-technická, Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek.
- 30) SEDLÁKOVÁ, Alexandra. Využití plastů po skončení jejich životnosti [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/d01ifb/>>.
- 31) SHAH, Vishu. *Handbook of Plastics Testing Technology*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1998. ISBN 0-471-18202-8.
- 32) Zákon č. 350/2011 Sb., o chemických látkách a chemických směsích a o změně některých dalších zákonů. 2011.
- 33) Zákon č. 477/2001 Sb., o obalech a o změně některých dalších zákonů. 2001.
- 34) Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. 2020.
- 35) Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností a o změně některých dalších zákonů. 2020.
- 36) Závada J, Flotace – princip flotace, 708 33 Ostrava-Poruba, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Institut environmentálního inženýrství (546), 2015. Oddělení odpadového hospodářství a biotechnologií.
- 37) ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

9 Seznam obrázků

- Obr. 1 Pyramidová hierarchie nakládání s odpady [<http://www.automotoenvi.cz/>]
- Obr. 2 Plastový odpad [<https://www.setri.sk/>]
- Obr. 3 Plastové obaly [<https://maxivyber.sk/>]
- Obr. 4 Značení plastových obalů [<http://www.jihocesketrideni.cz/>]
- Obr. 5 Schéma ZEVO elektrárny [<https://www.sako.cz/>]
- Obr. 6 Znak recyklace [<https://www.siegl.cz/>]
- Obr. 7 Druhy tříděného odpadu [<https://www.dewolf.cz/>]
- Obr. 8 Náskres nožového drtiče [MÜLLER, 2008]
- Obr. 9 Flotační metoda [<https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/>]
- Obr. 10 Přeměna PET odpadu na umělé vlákno. Upraveno dle [<https://www.zalohujme.cz/>]
- Obr. 11 Lineární schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 12 Rozvětvené schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 13 Síťované schéma makromolekul. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 14 Rozdělení Polymerů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 15 Rozdělení termoplastů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 16 Rozdělení reaktoplastů. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]
- Obr. 17 Strukturní vzorec Polyethylentereftalátu (PETu) [<https://www.wikiwand.com/>]
- Obr. 18 Strukturní vzorec Kyseliny fosforečné [<https://www.wikiskripta.eu/>]
- Obr. 19 Strukturní vzorec Maleinanhydridu [<https://cs.m.wikipedia.org/>]
- Obr. 20 Strukturní vzorec styrenu [<https://cs.m.wikipedia.org/>]
- Obr. 21 Vzorek vstupní suroviny
- Obr. 22 Vaky se vstupní surovinou
- Obr. 23 Vytvrzený zásobníky z nenasycené polyesterové pryskyřice
- Obr. 23 Vytvrzený zásobníky z nenasycené polyesterové pryskyřice
- Obr. 24 Násypka pro PET recyklát
- Obr. 25 Reaktor 1 na výrobu PET-glykolizátu
- Obr. 26 Schéma reaktoru 1 na výrobu PET glykolizátu
- Obr. 27 Vzorok finálního PET glykolyzátu
- Obr. 28 Vzorek čistého (bezbarvého) PETu
- Obr. 29 Přítomnost PVC v Petriho misce
- Obr. 30 Schéma magnetické separace
- Obr. 31 Schéma destilačního procesu odpadních vod

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání vlastností seskupení. Upraveno dle [BĚHÁLEK, 2015]

Tab. 2 Specifická hmotnost plastů

Tab. 3 Specifikační hodnoty vstupní suroviny

Tab. 4 Měření vstupní suroviny

Tab. 5 Statistické měření vstupních dat

Tab. 6 LCA analýza

Tab. 7 Analýza magnetické inovace

Tab. 8 Analýza separační inovace

Tab. 9 Analýza destilační inovace