

Mikrovlnami asistovaná solvolýza PET

Bc. Ludmila Tomšejová

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Ludmila TOMŠEJOVÁ
Osobní číslo: T08546
Studijní program: N 2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: Technologie a management

Téma práce: Mikrovlnami asistovaná solvolýza PET

Zásady pro vypracování:

- 1. provést literární rešerši**
- 2. Zhodnocení možnosti využití MW v chemické recyklaci a volba vhodného reakčního systému, návrh katalyzátoru**
- 3. Experimentální studie vlivu MW ohřevu, tlaku a teploty na rychlost a výtěžek solvolýtické reakce**
- 4. Zhodnocení výsledků a doporučení pro další výzkum a praxi**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tiskárenská/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. SPYCHAJ, T., **Chemical Recycling of PET: Methods and Products**, in Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites, S. FAKIROV, Editor. 2002 Weinheim. ISBN 3-527-30113- 5.
2. LORENZETTI, C. **Chemical Recovery of Useful Chemicals from Polyester (PET) Waste for Resource Conservation: A Survey of State of the Art**. Journal of Polymers and the Environment 2006
3. FIRAS, A.; DUMITRU, P. **Recycling of PET**. European Polymer Journal, 2005. Vol. 41, č. 7, s. 1453-1477.
4. PARDAL, F.; TERSAC, G. **Comparative reactivity of glycols in PET glycolysis**, 2006.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ivo Kuřilka, Ph.D.

Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

11. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

30. května 2011

Ve Zlíně dne 11. února 2011

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem solvolýzy PET s využitím MW ohřevu. Studie byla provedena na vzorcích PET, z použitých nápojových lahví.

Úkolem této studie bylo další zhodnocení možnosti využití MW ohřevu v chemické recyklaci a volba vhodného reakčního systému, návrh katalyzátoru, jeho příprava a charakterizace jeho účinku. Jako katalyzátor byl použit glycerolát zinku, který jsme laboratorně připravili. Tento katalyzátor byl srovnávám s katalyzátorem octanem zinečnatým. Tato studie navazuje na diplomovou práci - MW ohřev v chemické recyklaci PET, Ing. Radka Tobolíka.

Klíčová slova: PET degradace, solvolýza, chemická recyklace, MW

ABSTRACT

This work deals with the study of PET solvolysis with the use of MW heating. The study was conducted on samples of PET beverage bottles.

The goal of this study was to evaluate the possibility of using MW heating in chemical recycling and choosing an appropriate reaction system, catalyst design, its preparation and characterization of its performance. Glycerol zinc was used as a catalyst, which was prepared in our laboratory. The effect of the catalyst was compared with the zinc acetate catalyst. This study continues and builds on the thesis - MW heating, in the chemical recycling of PET, written by Radek Tobolík.

Key words: PET degradation, solvolysis, chemical recycling, MW

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především vedoucímu diplomové práce doc. Ing. et Ing. Ivo Kuřítkoví, Ph.D. et Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, konzultace a za pomoc při získávání informací potřebných k jejímu vypracování.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uvedena jako spoluautor.

Ve Zlíně, 16. 5. 2011

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 CHARAKTERISTIKA, VÝROBA, POUŽITÍ A RECYKLACE PET	10
1.1 CHARAKTERISTIKA PET	10
1.2 VÝROBA PET	12
1.3 POUŽITÍ PET	13
1.4 RECYKLACE PET	16
1.4.1 Fyzikální recyklace	16
1.4.2 Chemická recyklace	17
1.5 MW OHŘEV	20
1.5.1 Mikrovlny	20
1.5.2 Historie mikrovln	21
1.5.3 Využití mikrovln v současnosti	21
1.5.4 Výhody mikrovlnného záření a technologií	21
1.5.5 Aplikace mikrovlnné techniky	22
1.5.5.1 Průmyslová aplikace	22
1.5.5.2 Lékařská aplikace	22
1.5.5.3 Využití ve spojích	23
1.5.5.4 Doprava a navigace	23
1.5.5.5 Základní i aplikovaný výzkum	24
1.5.5.6 Mikrovlnné senzory a diagnostika	24
1.5.5.7 Mikrovlnné záření v domácnostech	24
1.5.6 Mikrovlnné efekty a jejich uplatnění v chemických laboratořích	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
2 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	28
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 VOLBA REAKČNÍHO SYSTÉMU	29
3.2 EXPERIMENT	29
3.2.1 Použité materiály a chemikálie	29
3.2.2 Použité zařízení a přístroje	31
3.2.3 MW zařízení a konstrukce	31
3.3 PŘÍPRAVA VZORKU	32
3.3.1 Příprava katalyzátoru	33
3.3.2 Laboratorní postup	33
4 VÝSLEDKY A DISKUZE	35
4.1 VLIV SLOŽENÍ SYSTÉMU NA RYCHLOST SOLVOLYTICKÉ REAKCE	35
4.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DALŠÍ DOPORUČENÍ	38

ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	45
SEZNAM TABULEK	46

ÚVOD

Mnoho plastových výrobků, zejména plastových obalů, má krátkou dobu životnosti a je po použití znehodnoceno. PET obaly zaujímají mezi těmito produkty zvláštní místo. Jednak je tento materiál možné po recyklaci druhotně použít pro výrobu hodnotnějších a trvanlivějších výrobků, než jsou obaly, tedy textilních vláken a látek z nich. Na druhou stranu se jedná o nejrozšířenější materiál pro výrobu nevratných lahví – obalů na nápoje. Ve srovnání se sklem jako tradičním materiálem pro výrobu lahví tento problém zvláště vyniká. Tenkostěnné PET lahve jistě nejsou vratným obalem v tom smyslu, že by se po vymytí daly běžně znovu plnit nápojem, mohou však být více nebo méně racionálně recyklovány.

Recyklace PET lahví se provádí fyzikální recyklací mokrým i suchým způsobem. Dále pak chemickou recyklací, která představuje efektivní metodu zpracování vzhledem k tomu, že produkty získané touto metodou mohou být znovu použity na výrobu nového polymeru, i z velmi znečištěného materiálu. Jedná se o rozkladný proces – depolymeraci PET lahví zpět na monomery, tedy základní složky z nichž je PET vyroben.

Základní schémata cyklu jsou známy, snahou je energetický optimalizovat cyklus za použití vhodných katalyzátorů a médií, např. mikrovlnného záření ve srovnání s klasickým ohřevem. Za účelem získání urychlené reakce, zvýšení výtěžku za výhodnějších ekonomických podmínek.

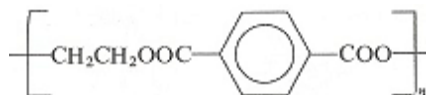
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA, VÝROBA, POUŽITÍ A RECYKLACE PET

1.1 Charakteristika PET

PET (polyethyltereftalát – PETP) patří do skupiny polyesterů, jejichž charakteristickým znakem je přítomnost esterových vazeb v hlavním řetězci. Dělíme je na typy lineární a termoplastické (polyestery kyseliny tereftalové a uhličité) a na typy reaktoplastické, rozvětvené a v konečném stavu zesíťované (alkydy jednoduché, alkydy modifikované, oleje, nenasycené polyesterové pryskyřice a polydiallylftaláty). [1]

Struktura PET vypadá následovně:



Obr. 1 - Schéma opakující se konstituční jednotky PET [1]

PET se velmi liší jak svými vlastnostmi, tak i použitím téměř od všech ostatních polyesterů. Důvodem je dokonalá symetrie molekul, což umožňuje vysokou krystalinitu vysokomolekulárního polyesteru. Důležitou úlohu mají silné mezimolekulární síly, které jsou vyvolány indukčním efektem dipólového momentu benzenového jádra. Je značným předpokladem tuhost molekul, z důvodu střídajících se aromatických jader na krátkých řetězcích. Nejdůležitější charakteristikou je jeho průměrná molekulová hmotnost, na niž přímo závisí i většina jeho ostatních vlastností. [2] Zachování si pružnosti i za nižších teplot, malá propustnost plynů a vlhkosti, výborná zpracovatelnost. [3,4] Přehled základních vlastností PET v Tab. 1.

Tab. 1 Základní vlastnosti PET [2]

Parametr	Hodnota
Hustota	1,37 g/cm ³
Pevnost v tahu	50 až 80 MPa (80 MPa mez kluzu v tahu)
Tažnost	30 až 300 %
Modul pružnosti v tahu	3 000 MPa
Tvrdość kuličkou 10 s	200 MPa
Čiřost	transparentní až opalescentní
Nasákavost za 24 hodin	0,3 %
Teplota použití maximální krátkodobá	200 °C
Teplota použití maximální dlouhodobá	100 °C
Teplota použití minimální dlouhodobá	- 20 °C

Odolnost PET proti chemikáliím je dobrá u slabých kyselin, anorganických soli, oxidačních činidel, alifatických a aromatických uhlovodíků, etherů, esterů, ketonů, organických kyselin, směsí pohonných hmot, minerálních olejů, tuků a rostlinných olejů. Dobrá až střední odolnost u silných kyselin, slabých zásad, alkoholů a špatná odolnost u horké vody a halogenovaných uhlovodíků. [3,4,5]

Atmosférickým stárnutím PET působením slunečního záření a ostatních klimatických faktorů dochází ke změně vzhledu, ke křehnutí a ke změně mechanických vlastností. [4,5]

Vůči vlivu ionizujícího záření je PET velmi odolný. K výraznější degradaci dochází teprve při dávkách nad 100 kJ.kg^{-1} . Při ozařování probíhá současně síťování i štěpení polymerních řetězců. Pevnost v tahu a tažnost klesají se vzrůstající dávkou záření. Pokles mechanických vlastností je menší při ozařování ve vakuu nebo v inertní atmosféře než při ozařování v přítomnosti kyslíku. [4,5]

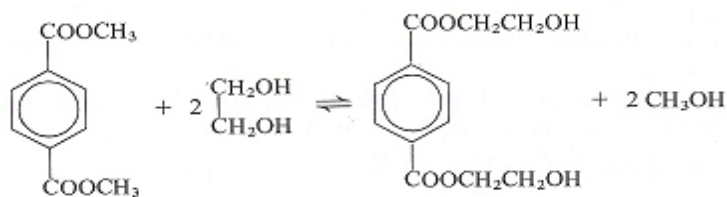
Termická a termooxidační degradace – tepelnou destrukcí PET při $280 \text{ }^\circ\text{C}$ až $300 \text{ }^\circ\text{C}$ byly získány oxid uhličitý, oxid uhelnatý, acetaldehyd, kyselina tereftalová a řada dalších produktů. [5]

1.2 Výroba PET

Základní surovinou pro výrobu PET jsou kyselina tereftalová (TA) a etylenglykol (EG). Pro výrobu PET se však místo kyseliny tereftalové (TA) používá dimethyltereftalát (DMT), z nutnosti naprosté čistoty základní suroviny, což je u kyseliny tereftalové (TA) velmi obtížné dosáhnout (nerozpustnost v ethylenglykolu a vysoký bod tání i varu). Dimethyltereftalát (DMT) lze velmi dobře čistit jak krystalizací, tak destilací. [2]

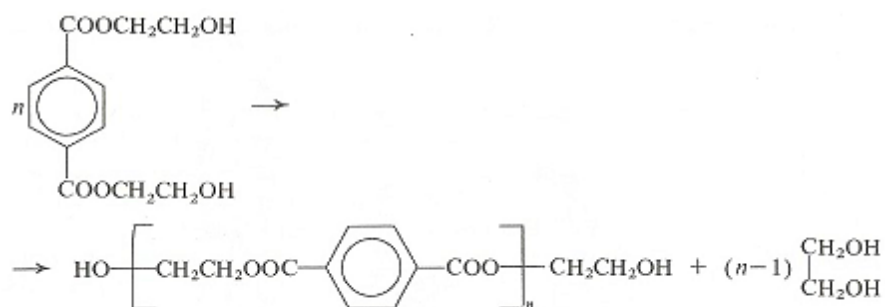
Výroba PET z dimethyltereftalátu (DMT) probíhá ve dvou fázích.

V první fázi se dimethyltereftalát (DMT) reesterifikuje etylenglykolem (EG) na bis(2-hydroxyethyl)tereftalát (BHET). Při reesterifikaci dimethyltereftalátu (DMT) etylenglykolem (EG) se pracuje při teplotě mezi $190 \text{ }^\circ\text{C}$ až $195 \text{ }^\circ\text{C}$. Reakce při teplotě pod $180 \text{ }^\circ\text{C}$ probíhá velmi pomalu a při teplotě $197 \text{ }^\circ\text{C}$ etylenglykol (EG) vře. Poměr látek je 1 mol DMT : 2,5 mol EG. Průběh reakce se sleduje podle množství vydestilovaného methanolu. (1) [1,6]



(1)

V druhé fázi se provádí polyesterifikace za vydestilování nadbytečného ethylenglykolu (EG) za sníženého tlaku 60 až 260 Pa. Reakční teplota v rozmezí 265 °C až 280 °C. Toto teplotní rozmezí je omezeno teplotou tání vznikajícího PET (256 °C) a jeho teplotou rozkladu (při 290 °C je rozklad již značně rychlý). Pracuje se v inertní atmosféře dusíku nebo oxidu uhličitého, aby se zamezilo oxidaci výrobku. (2) [1,6]



(2)

1.3 Použití PET

PET je hlavní surovinou pro výrobu vláken (technické tkaniny a tkaniny pro oděvní průmysl), fólií (v elektrotechnice na izolaci vodičů) a výrobu obalových materiálů (především nápojové láhve PET).

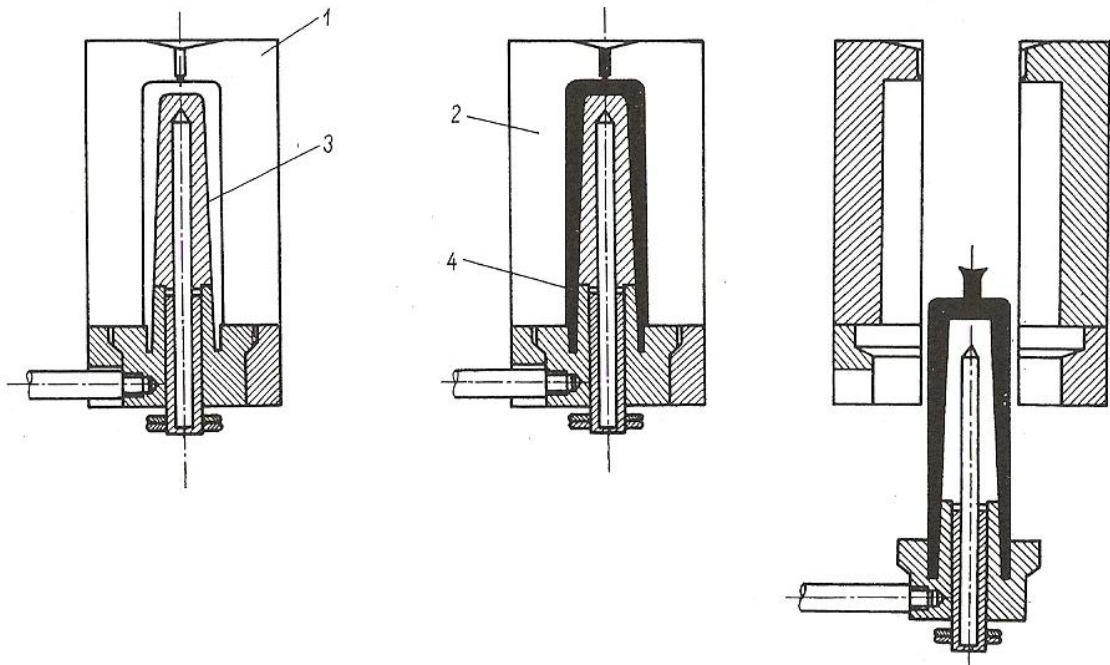
Výroba vláken – při výrobě vláken se nejlépe využije základních vlastností PET, jako je např. vynikající odolnost proti oděru, velká stálost tvaru, stálost proti povětrnostním vlivům, chemickému působení apod. Při výrobě vláken dochází k roztavení polyesteru pomocí speciálních trysek ve tvaru vláken. Při použití zrněného polyesteru, se taví na vyhřívaném roštu a tavenina je čerpadlem podávána do zvlákňovací hubice s tryskou. Polyesterové vlákno se vyrábí vytlačováním menším počtem trysek, nedloužené vlákno se navíjí na cylindrické cívky a následně se dluží nad teplotou T_g (72 °C až 81 °C), čímž se zvyšuje pevnost v tahu a snižuje průtažnost. Polyesterová stříž se dluží v podobě kabelu na dlužících linkách. Za vlhka se kadeří mezi rýhovanými válci, stabilizace kadeření rychlým průchodem sušárnou při 200 °C. Následuje řezání vláken na vhodnou délku, aviváž a sušení. [1,2]

Polyesterové vlákno je méně mačkové než vlna, málo navlhavé a schne rychleji než vlákno polyamidové. Lepší stálost na světle než polyamid a nižší než polyakrylonitril. Stále při dlouhodobém zahřívání na vzduchu, stálejší než ostatní vlákna. Dobrá odolnost vůči zředěným hydroxidům a kyselinám, neodolává koncentrovanému amoniaku, který je štěpí aminolýzou. Obtížně přijímá barviva, zejména zevnitř, proto je stálost vybarvení v otěru poměrně nízká. U polyesterové stříže se uplatní vlastnosti jako nemačkovost, pružnost, jemný a teplý omak, rychlé schnutí a malý účinek vody na deformovatelnost vlákna. Při výrobě textilií se polyesterová stříž kombinuje s vlnou, polyakrylonitrilovou stříží nebo bavlnou. [1,2]

Výroba fólií – výroba fólií se liší od výroby vláken pouze způsobem formování a nutnou následující plošnou orientací. PET fólie se obvykle vyrábějí vytlačováním taveniny plochou nebo kruhovou tryškou a následující orientací za tepla (buď současnou, nebo postupnou) v obou směrech (ve směru délky i šířky fólie). Fólie se vyznačují velkou mechanickou pevností (předčí všechny ostatní fólie z termoplastů) i při malé tloušťce a rozměrovou stálostí. Výborná tepelná odolnost (trvale od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $130\text{ }^{\circ}\text{C}$), odolnost vůči olejům a zejména elektroizolační vlastnosti. Fólie jsou čiré a používají se v elektrotechnickém průmyslu, jako filmové podložky, obalové, potiskované a metalizované fólie, hlavní oblastí využití je výroba magnetofonových pásků. [1,2]

Výroba obalových materiálů (nápojové láhve PET) - výroba se provádí technologickým postupem vyfukování, tj. vstřikovací vyfukování (vyfukování z předlisku). Princip vstřikovacího vyfukování je založen na přípravě hadice (předlisku), jeho příprava vstřikováním umožňuje přesné tváření hrdla láhve a závitů. Další výhodou je různá tloušťka stěn předlisku, čímž se vytvářejí podmínky pro rovnoměrnou tloušťku stěn i nepravidelného výrobku po vyfouknutí. Předlisek se nevytlačuje, ale vstřikuje na trn ve vstřikovacím stroji (Obr. 2). Vstříknutá hadice se dopravuje pomocí revolverového systému nebo posuvem k vyfukovací části zařízení, kde se po umístění ve formě vyfoukne vzduchem přiváděným trnem, do požadovaného tvaru. Výhodou výroby je velmi dobrá jakost povrchu výrobků, jejich rozměrová přesnost, rovnoměrnost tloušťky stěny, větší tvarová stabilita a bezešvý výrobek. Nevýhodou je omezení tvarových a objemových možností, výroba pouze relativně malých,

tvarově jednoduchých výrobků, nerovnoměrnost tloušťky stěny při velkém poměru délky k průřezu výrobku, vícehrdlé nádoby apod. [1,7]



Obr. 2 – Vstřikování předlisku pro vyfukované láhve [7]

1, 2 – vstřikovací forma, 3 – trn, 4 - předlisek

Pro technologický postup vstřikování je vhodný PET o M_n 30 000 a větší a o krystalinitě 30 až 40 %. Tento PET se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, tvrdostí, odolností proti oděru, dobrou rozměrovou stálostí, nízkým koeficientem tření a malou navlhlavostí. Maximální teplota použití je 100 °C. [1,7]

1.4 Recyklace PET

Recyklace PET se v dnešní době stává nutností, z důvodu nárůstu produkce a využívání nápojových lahví PET. Tyto nápojové láhve patří do skupiny nevratných obalů, čímž vzniká potřeba PET láhve využít jako druhotnou surovinu. K tomuto kroku nás nenuťí pouze ekonomická stránka, ale především ekologické dopady na životní prostředí.

Základem recyklace PET lahví je jejich sběr a třídění přímo spotřebiteli. Sběr se provádí do žlutých kontejnerů, kam patří PET láhve od nápojů, kelímky, sáčky, fólie, výrobky a obaly z plastů, polystyrén. Do těchto kontejnerů nepatří novodurové trubky, obaly od nebezpečných látek (motorové oleje, chemikálie, barvy apod.). Následuje recyklace na druhotné suroviny, což se provádí na dotřídňovací lince, podle jednotlivých typů plastů (vybírají se PET láhve, fólie a pěnový polystyrén), které mají speciální samostatné zpracování. Vytříděné druhy plastů se lisují do balíků a odváží se k dalšímu zpracování na recyklační linky. [7]

V současnosti se recyklace provádí metodami fyzikální recyklace mokrým i suchým způsobem. Dále pak chemickou recyklací, kam patří hydrolýza, methanolýza, glykolýza, aminolýza a amonolýza.

1.4.1 Fyzikální recyklace

Fyzikální postup resp. mechanický recyklační postup je momentálně nejvíce používaným postupem recyklace PET. Důvodem jsou totiž oproti jiným metodám relativně nižší vstupní náklady a také provozní náklady. Nevýhodou této metody recyklace je obsah i jiných polymerů ve směsi odpadního PET (vršky, etikety). [8]

Fyzikální recyklaci dělíme na dva postupy: suchý a mokrý.

Suchý recyklační postup – tento recyklační postup je vhodný pro zpracování zmetků, vznikajících ve výrobním procesu. Při této metodě se nepoužívá voda ani rozpouštědla, využívá se účinku tření v procesu mletí za sucha, v kombinaci se vzdušným tříděním. Třídí se zvláště PET láhve, polyethylenové láhve od rostlinných olejů a plastové láhve od tekutých detergentů. Součástí třídění je ruční odstranění vršků a vylití případných zbytků obsahů. Vytříděné PET láhve jsou rozsekány na malé kousky, které procházejí čistícím separá-

torem „cyklonem“, kde se využívá vlivu tření a separace vzduchem. Posledním krokem při tomto zpracování je tavení na taveninu, která je určena k dalšímu zpracování. [7,8]

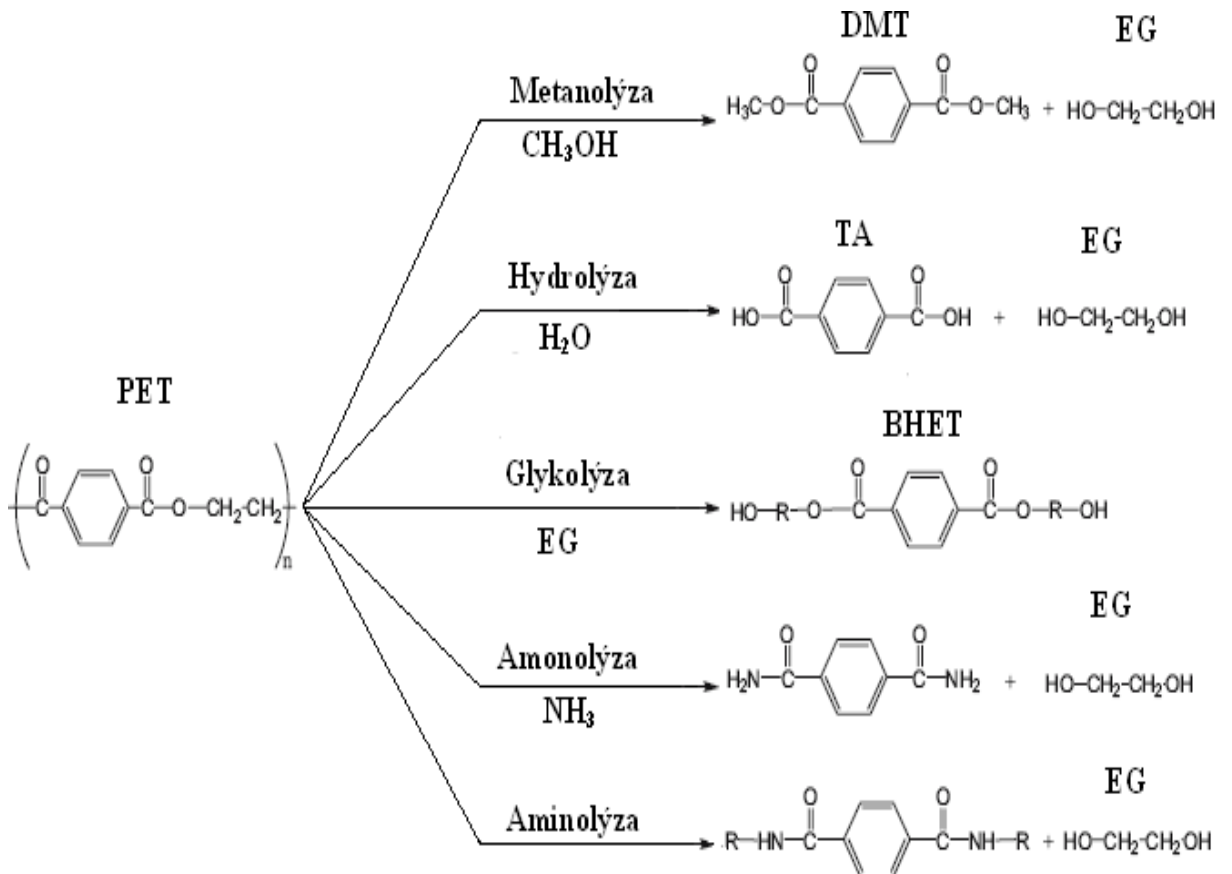
Mokrý recyklační postup - jde o nejrozšířenější způsob recyklace PET lahví. Slisované balíky PET lahví, jsou rozvázány a vizuálně zkontrolována jejich kvalita. Silně znečištěné láhve se vytřídí na dopravním pásu buď ručně, nebo pomocí speciálního třídícího systému (rotační buben – separace drobných nečistot). PET láhve dále prochází detektorem kovu, který kontroluje přítomnost cizorodých příměsí, zejména kovu pro ochranu drtícího zařízení. U roztříděných PET lahví dochází nejprve k drcení společně s vodou nebo bez vody. Nadrcený PET materiál obsahuje PET, vršky a etikety. Při drcení bez vody následuje oddělení etiket a papírků pomocí vzduchu, praní s přeplavováním vršku, frikční pračka, flotace a vysušení odstředivou silou nebo horkým vzduchem. Při drcení s vodou je následně materiál přiveden do frikční pračky. Ve frikční pračce dochází působením frikční energie k rozvláknění etiket na celulózu a také k rozpuštění většiny lepidel. Posledním procesem oddělení nežádoucích příměsí je flotace, kde procesem flotace dochází k vyplavení zbytku nečistot. Vypraný PET recyklát je šnekovým dopravníkem dopravován k poslednímu oplachu. Čistý PET recyklát, ve formě vloček, je následně odstředěn na odstředivce do výsledné vlhkosti max. 1,5 %. Takto vysušen PET recyklát je plněn do Big Bagu k expedici, nebo následně dále zpracováván. [7,8]

1.4.2 Chemická recyklace

Slouží k depolymerizaci PET lahví zpět na monomery tj. základní složky, z nichž je PET vyroben. Chemická recyklace je pro PET vhodnou metodou, jedná se totiž o kondenzační polymer, který vzniká z jedné molekuly kyseliny tereftalové (TA) a dvou molekul ethylenglykolu (EG), za vzniku *bis*-(2-hydroxyethyl)tereftalát (BHET), jehož molekuly spolu polykondenzací vytvoří PET. [7]

V chemických recyklačních procesech je solvolyzován PET buď na výchozí látky jako jsou ethylenglykol (EG), kyselinu tereftalovou (TA), *bis*-(2-hydroxyetyl)tereftalát (BHET) nebo dimethyltereftalát (DMT), případně pouze na oligomery. [8]

Druhy chemické recyklace se liší použitým činidlem. Všechny jsou ale založeny na reaktivě esterové vazby. [8,9]



Obr. 3 - Způsoby chemické recyklace PET [8]

Metanolýza PET – při tomto procesu je přeměněn pomocí metanolu na dimethyltereftalát (DMT) a etylenglykol (EG). Reakce probíhá působením metanolu na PET při teplotách nad $250\text{ }^\circ\text{C}$, za přísady katalyzátoru. Produkty se mohou potenciálně dobře uplatnit na trhu, vzhledem k tomu, že to jsou zároveň suroviny pro výrobu PET. [7,8,10]

Hydrolyza PET – lze získat čistou kyselinu tereftalovou (TA) a etylenglykol (EG), které se dají opětovně využít jako suroviny pro výrobu nového PET. Tato hydrolytická reakce se může provádět buď v kyselém, zásaditém nebo neutrálním prostředí. V kyselém prostředí se pro depolymeraci používají silné anorganické kyseliny, např. kyselina dusičná, chlorovodíková nebo sírová při pH 2 až 6. V zásaditém prostředí se využívá vodného roztoku hydroxidu sodného nebo hydroxidu draselného. V neutrálním prostředí působením vody nebo vodní páry. [2,8,11]

Glykolýza PET – je nejčastěji prováděná pomocí etylenglykolu (EG). Reakce probíhá při teplotě nad 240 °C za přebytku etylenglykolu. Výsledným produktem je hlavně *bis*-(2-hydroxyetyl)tereftalát (BHET), který je podobně jako dimethyltereftalát (DMT) výchozí složkou pro výrobu PET. [7,8,9]

Amonolýza PET – patří mezi solvolytické reakce, kdy PET reaguje s amoniakem za produkce tereftalamidu (TAD) a etylenglykolu (EG). Tereftalamid (TAD) se pyrolytickou reakcí převede na tereftalonitril, který je vhodný pro další zpracování na různé produkty, např. diaminy. [8,11]

Aminolýza PET – štěpná reakce prováděna pomocí aminů, kdy získáme tereftalohydrazin a etylenglykol (EG). Degradční produkty získané depolymerací PET použitím polyfunkčních aminů jsou využitelné pro mnoho teplem tvrditelných systémů, např. tvrdidla pro epoxidové pryskyřice. [8,11]

1.5 MW ohřev

1.5.1 Mikrovlny

Mikrovlny jsou vysokofrekvenční elektromagnetické záření s frekvenčním pásmem přibližně od 300 MHz do 3 THz, těmto hodnotám odpovídá vlnová délka v uzavřeném vedení resp. obecném mikrovlnném obvodu od 1 m do 0,1 mm. Mikrovlnné obvody mají charakter obvodů s rozprostřenými parametry (vlnová délka na vedení je srovnatelná s délkou vedení tvořícího uvažovaný obvod).

Je zavedeno rozdělení mikrovlnného kmitočtového pásma na tato dílčí pásma, z nichž každé má svá technologická specifika:

- decimetrové vlny (300 MHz < f < 3 GHz)
- centimetrové vlny (3 GHz < f < 30 GHz)
- milimetrové vlny (30 GHz < f < 300 GHz)
- submilimetrové vlny (300 GHz < f < 3 THz)

Na pásmo mikrovlnné směrem k vyšším frekvencím navazuje postupně pásmo infračervené a pásmo viditelného světla. [12,13]

Vektory charakterizující magnetické a elektrické pole jsou v každém bodě a v každém okamžiku k sobě kolmé a oba jsou kolmé ke směru pohybu vlny. Jejich amplitudy mají konstantní poměr a ve vakuu se elektromagnetické vlny pohybují rychlostí světla, takže platí vztah:

$$f \cdot \lambda = c$$

(3)

kde f je vlnová frekvence [Hz], λ je vlnová délka [m] a c rychlost světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. [8,14]

1.5.2 Historie mikrovln

Mikrovlny byly objeveny v Anglii na počátku 40. let 20. století britskými vědci, kteří vynalezli zdroj mikrovlnného záření zvaný magnetron. Vývoj prvního radarového systému byl úspěšně dokončen ve Velké Británii a USA. Radar pak sehrál důležitou roli během II. světové války, především v letecké bitvě o Anglii. V současné době je radar používán pro mnoho důležitých činností v oblasti navigace a bezpečnosti dopravy, jako speciální senzory v průmyslu, dálkovém průzkumu Země, medicíně a též pro vojenské účely, atd. [12,13,14]

V roce 1947 v USA využili mikrovlny k ohřevu. Patent na mikrovlnnou troubu byl podán v roce 1952 a první mikrovlnka se na trhu objevila v roce 1961. V Evropě se používání mikrovlnné trouby rozšířilo až po roce 1980. [14]

1.5.3 Využití mikrovln v současnosti

Dnes má mikrovlnný ohřev široké využití především k účinnému a energeticky výhodnému sušení materiálů. Jinou oblastí, ve které nacházejí mikrovlny nejčastěji uplatnění jsou telekomunikace a přenos dat. Významné je použití mikrovln při vytvrzování polymerů, při vulkanizaci pryže nebo při napěňování polymerů. [14]

1.5.4 Výhody mikrovlnného záření a technologie

Hlavními výhodami mikrovlnného záření jsou rychlost, objemový přenos energie, úspora energie a výrobního prostoru, vysoká účinnost, automatizace a bezpečnost, v neposlední řadě taky ekologie. [15]

Výhodami mikrovlnné technologie jsou dosažení vyšší teploty uvnitř produktu než na jeho povrchu. Tím, že se materiál ohřívá v celém objemu, dosahuje se vysoké rovnoměrnosti prohřátí a přesné regulace teploty. [15]

1.5.5 Aplikace mikrovlnné techniky

1.5.5.1 Průmyslová aplikace

- Mikrovlnný ohřev
- Mikrovlnné vysoušení

Mikrovlnná energie se v rámci technologických procesů používá v průmyslu pro ohřev nebo pro vysoušení materiálů. Využívá se schopnosti vysokofrekvenční energie šířit se materiálem, který má být ohříván nebo vysoušen. Mikrovlnná energie se absorbuje a mění na teplo, protože materiál má zpravidla povahu ztrátového dielektrika. Tímto způsobem je možné dosáhnout ohřevu, resp. vysoušení v celém objemu a není nutné čekat, až se vedením tepla docílí vyšší teploty i uvnitř ohřívajícího nebo vysoušeného objektu. [12,13]

Důležité přednosti mikrovlnného ohřevu jsou:

- Větší rychlost ohřevu
- Vyšší bezpečnost
- Výhody z ekologického hlediska
- Vyšší kvalita

1.5.5.2 Lékařská aplikace

- Hypertermie (onkologie)
- Diatermie (fyzioterapie)
- Termodestrukce (urologie)

Mikrovlnná technika nachází zajímavá uplatnění při hledání nových léčebných metod pro různé typy onemocnění. A právě rozvoj technických disciplín významně podporuje vznik nových léčebných metod. [12,13]

- Mikrovlnná hypertermie (využití v onkologii)
- Mikrovlnná diatermie (využití při rehabilitacích a fyzikální léčbě)
- Mikrovlnná termokoagulace (využití v urologii)

- Mikrovlnná angioplastika (využití v kardiologii)
- Mikrovlnný skalpel (využití v chirurgii)
- Rostoucí implantáty (využití v chirurgii)
- Další možnosti využití mikrovln v medicíně (rychlejší rozmražení biologické tkáně po kryogenních operacích, podpora diagnostiky nádorů, možnosti využití celotělové termoterapie pro léčbu AIDS – virus HIV je velmi citlivý na zvýšenou teplotu)

1.5.5.3 Využití ve spojích

- Pozemní služby (např. radioreléové spoje, využití troposférického rozptylu)
- Satelitní spoje (stacionární i nestacionární)
- Mobilní telefony (celulární sítě)

Pro návrh spojového systému je základem výpočet energetické bilance mikrovlnného spojového systému a z ní vyplívající předpovědi úrovně výkonu na vstupu mikrovlnných přijímačů. Též určení poměru signálu k šumu. Pro zajištění spolehlivé činnosti spojového systému, vyplyne požadavek na výstupní výkon vysílače, zisk vysílače i přijímací antény a také šumové číslo přijímače. V současné době je potřeba hledat možnosti zlepšení spolehlivosti spojového systému, řešit otázku interferencí vznikajících šířením signálu po několika různých drahách. [12,13]

1.5.5.4 Doprava a navigace

- Navigace (GPS, radary)
- Kontrola a řízení dopravy

Mikrovlnná technika se objevují i v oblasti dopravy, jde především o různé navigační systémy (např. GPS), systémy a senzory pro kontrolu a řízení dopravy. V oblasti dopravy nacházejí uplatnění i radary, jejichž využití je např. v oblasti základního a aplikovaného výzkumu, ve vojenské technice. [12,13]

1.5.5.5 Základní i aplikovaný výzkum

- Nukleární výzkum (urychlovače částic)
- Radiometrie v astronomii
- Dálkový průzkum Země

Mikrovlnná technika nachází zajímavé uplatnění v různých oblastech vědy a výzkumu, a to jak základním, tak i aplikovaném. [12,13]

1.5.5.6 Mikrovlnné senzory a diagnostika

- Mikrovlnné senzory
- Mikrovlnné tomografie

Mikrovlnné senzory mohou být účinnou pomůckou pro řízení dopravy, při sledování intenzitu provozu na dopravních trasách.

Mikrovlnná tomografie spočívá v měření pole rozptýleného kolem měřeného objektu přijímací anténou za současného ozařování objektu anténou vysílací. Tato metoda se ještě v praxi nevyužívá, ale některé laboratoře na jejich rozvoji pracují. [12,13]

1.5.5.7 Mikrovlnná zařízení v domácnostech

- Mikrovlnné sporáky
- Satelitní vysílání rozhlasu a televize

Využívání mikrovlnných zařízení v domácnostech postupně velmi rychle přibývá. Jedná se o zařízení, která nejsou určena pouze pro profesionální využití. [12,13]

1.5.6 Mikrovlnné efekty a jejich uplatnění v chemických laboratořích

Mikrovlny většinou materiálů pronikají jako sluneční světlo sklem, některými materiály jsou silně pohlcovány (polární látky, např. voda – ohřev potravin) a mikrovlnná energie se v nich přeměňuje na teplo. U jiných materiálů dochází především k odrazu mikrovln (v radarech). [14]

V oblasti chemie našel uplatnění mikrovlnný ohřev mnohem později než v kuchyni. Mikrovlny jsou v laboratořích používány např. při přípravě vzorků k chromatografické nebo spektrální analýze, protože přinášejí značnou úsporu času ve srovnání s běžnou Soxhletovou extrakcí. [14]

V chemických laboratořích se využívají i další efekty mikrovlnného záření, jedná se o způsob urychlení reakcí. Při rychlém ohřátí kapalin v mikrovlnném poli, bez účinného míchání, dochází k nedostatečnému odpařování a nadbytek energie se projeví jako přehřátí, kapaliny vřou za atmosférického tlaku při vyšší teplotě než je teplota varu (u polárních rozpouštědel od 10 °C do 30 °C nad teplotou varu). Množství reakcí, u kterých bylo zjištěno významné zkrácení reakčních dob v mikrovlnném prostředí od 80. let 20. století značně vzrostlo, příkladem mohou být esterifikační reakce, Dielsovy-Alderovy cykloadice, alkylace, acylace a aldolizační reakce. Mikrovlnná chemie nachází uplatnění i v praxi, např. při výrobě léčiv. Ukázalo se, že k výraznému urychlení reakcí dochází, je-li záření absorbováno reaktantem nebo katalyzátorem. Významný může být i specifický efekt na aktivační energii, který závisí především na mechanismu reakce. U polárních mechanismů lze očekávat výraznější specifické efekty, když polarita roste od základního směrem k tranzitnímu stavu (je-li rozdíl polarit obou stavů nulový, projeví se pouze tepelné vlivy). Mechanismus urychlení reakcí není ještě zcela objasněn a specifické efekty nelze jednoduchým způsobem definovat, lze podle dosavadních výsledků očekávat urychlení tehdy, když reagují polární látky a reakce se zúčastní vazby s vysokým dipólovým momentem. Podstatnými vlastnostmi, které ovlivňují interakci látky s mikrovlnným zářením jsou tepelná kapacita, tepelná vodivost, skupenství látky (ovlivňující možnost rotace molekul) a u kapalných látek jejich výparné teplo. [8,14]

V mikrovlnné chemii je nejnovějším poznatkem metoda mikrovlnného ohřevu za současného chlazení. Tato metoda umožňuje provádět reakce při nízkých teplotách i pod 0 °C, kdy klasické reakce již neprobíhají. Současné chlazení umožňuje použití vysokých mikro-

vlnných výkonů, což se projeví vyšší reakční rychlostí, vyšší selektivitou i vyššími výtěžky. Reakce lze provádět za mírných reakčních podmínek, kdy nežádoucí vedlejší či následné reakce jsou potlačeny, což je výhodné např. u tepelně labilních produktů (příprava farmaceutik). [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle diplomové práce byly dle zadání stanoveny následovně:

- Zhodnocení možnosti využití MW v chemické recyklaci
- Volba vhodného reakčního systému
- Návrh katalyzátoru a jeho příprava
- Experimentální studie MW asistované solvolýzy s použitím připraveného katalyzátoru.
- Zhodnocení výsledků a doporučení pro další výzkum a praxi

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Volba reakčního systému

Jednou z metod recyklace PET je tedy získávání výchozích monomerů postupem opačným k polykondenzaci – solvolýzou. Konečným produktem solvolýzy PET mohou být podle způsobu přípravy oligomery, bis(hydroxyethyl)tereftalát (BHET), dimethyltereftalát (DMT), kyselina tereftalová (TPA) a ethylenglykol (EG).

Pro volbu systému je rozhodující použití činidla (rozpuštědla), ve kterém probíhá solvolýza PET a které dostatečně absorbuje mikrovlny. Bod varu má co nejvyšší, avšak pod teplotou tání PET, tak aby v reakčním systému nedošlo k výskytu taveniny a slepení jednotlivých PET „vločky“ do jednoho souvislého tělesa s relativně velmi malým povrchem, který by byl v kontaktu s činidlem. Takovým vhodným rozpuštědlem se jeví ethylenglykol (bod varu 197,3°C a penetrační hloubkou MW 1,3 cm při 25°C). [8]

Jako katalyzátory byly zvoleny glycerolát zinku, neboť se lze domnívat, že alkoholát bude více bazický, než octan, a dále jako reference octan zinečnatý, na základě již vypracované diplomové práce [8], na kterou tato diplomová práce navazuje.

3.2 Experiment

3.2.1 Použité materiály a chemikálie

Při všech měření byl použit PET pocházející z nápojových lahví (objem 1,5 litru, různé minerální vody, různé barvy). Použité druhy PET lahví byly vyprázdněny, vymyty, vysušeny, a zbaveny příslušenství (vršky, etikety, atd.).

Pro experimentální práci byly použity následující chemikálie: [16]

Glycerol $C_3H_8O_3$

Molární hmotnost: 92,095 g/mol

Hustota: 1,26 g/cm³

Oxid zinečnatý ZnO

Molární hmotnost: 81,39 g/mol

Hustota: 5,6 g/cm³

Octan zinečnatý $(CH_3COO)_2Zn$

Molární hmotnost: 219,50 g/mol

Hustota: 1,74 g/cm³

Isopropanol $(CH_3)_2CHOH$

Molární hmotnost: 60,10 g/mol

Hustota: 0,78 g/cm³

Etylenglykol HO - CH₂CH₂ - OH

Molární hmotnost: 62,07 g/mol

Hustota : 1,113 g/cm³

Teplota tání: -12,9 °C

Teplota varu: 197,3 °C

Etanol $\text{CH}_3\text{CH}_2 - \text{OH}$

Molární hmotnost: 46,069 g/mol

Hustota : 0,789 g/cm³

Teplota tání: -114,1 °C

Teplota varu: 78,3 °C

Destilovaná voda H_2O

Molární hmotnost: 18,015 g/mol

Hustota : 1 g/cm³

Teplota tání: 0 °C

Teplota varu: 100 °C

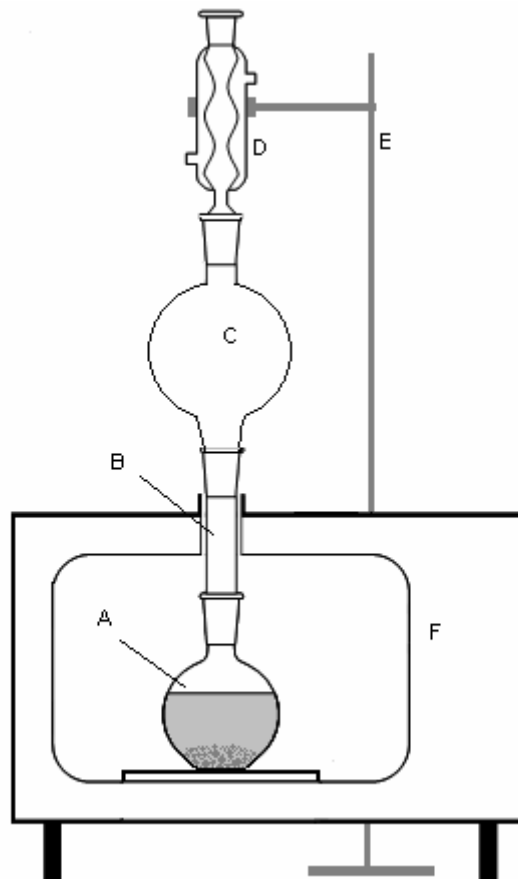
3.2.2 Použitá zařízení a přístroje

Příprava vzorku – střížný mlýn Retsch SM 100, síťovací stroj Retsch AS 200 control “g“ (sítka 2 mm), centrifuga stolní MLW T54, elektronické váhy DENVER SUMMIT SI – 203 A.

Aparatura - mikrovlnná trouba, zpětný chladič, odpěňovací nástavec, elektronické váhy DENVER SUMMIT SI – 203 A

3.2.3 MW zařízení a jeho konstrukce

Celá pracovní aparatura se nacházela v odsávané digestoři. Byla použita mikrovlnná trouba značky CWR-TECH (max. výkon 700 W), typ : M 7017P-M



Obr. 4 - Schéma pracovní aparatury [8]

(A – baňka se vzorkem, B – prodlužovací nástavec, C – odpěňovací nástavec, D – zpětný chladič, E – stojan, F – mikrovlnná trouba)

3.3 Příprava vzorků

Vzorek PET byl připraven z nápojových lahví stejné velikosti, různých barev, které byly sebrány studenty FT do tříděného odpadu v rámci projektu „Zelená univerzita“. Nejdříve byly láhve zbaveny etiket a uzávěrů, poté vypláchnuty vodou a vysušeny. Takto připravené PET láhve byly následně nasekány na střižném mlýně na tzv. vločky (flakes). Nasekané částice byly odděleny podle velikosti na sítu. Pro experiment byla použita frakce vloček nad sítím s velikostí ok 2 mm. Získaný materiál byl důkladně promíchán, aby se získal reprezentativní vzorek.

3.3.1 Příprava katalyzátorů

Syntéza glycerolátu zinku byla provedena podle [17]: 150 g glycerolu, 25 g oxidu zinečnatého a 2 g octanu zinečnatého byly smíchány, po dobu cca 15 minut do získání jednotné směsi. Tato směs byla poté zahřívána na 105 °C po dobu 90 minut za intenzivního míchání. Po ochlazení na cca 40 °C, přidáno 75 g isopropanolu a suspenze byla míchána 15 minut, a poté ihned odstředěna při 4 000 ot./min, po dobu 15 minut. Promytí a odstředování isopropanolem se opakovalo třikrát. Výsledný produkt byl sušen na vzduchu při teplotě 80 °C několik hodin. Bílý prášek byl získán ve výtěžku 38 g. Výsledný produkt byl analyzován termogravimetricky (vzduch) a obsahoval 53% oxidu zinečnatého, což je ve shodě se stechiometrií glycerolátu zinku.

Výpočty:

$$150 \text{ g glycerolu} \rightarrow V = m / \rho = 150 \text{ [g]} / 1,26 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 119,04 \text{ ml} = 120 \text{ ml}$$

$$75 \text{ g isopropanolu} \rightarrow V = m / \rho = 75 \text{ [g]} / 0,78 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 96,15 \text{ ml} = 96 \text{ ml}$$

3.3.2 Laboratorní postup

Laboratorní postup byl převzat z DP – Bc. Radka Tobolíka. [8]

1. Bylo naváženo množství PET (5g) a příslušného katalyzátoru v množství 1% na hmotnost PET (0,05g) s přesností na 0,001 g.
2. PET a katalyzátor byly kvantitativně převedeny do varné baňky a bylo k nim přidáno 100 ml EG.
3. Takto připravená suspenze byla přenesena do mikrovlnné trouby.
4. Byla sestavena aparatura (viz. Obr. 4).
5. Po sestavení aparatury byla mikrovlnná trouba uvedena do chodu v příslušném (tj. maximálním) výkonovém režimu a bylo započato měření.
6. Následoval časový interval (15, 30, 40, 50, 60, 70 min.), po který byla suspenze ohřívána v mikrovlnné troubě.

7. Po uplynutí měřicího času se nechala aparatura zchladnout na teplotu umožňující manipulaci s varnou baňkou (cca. 10 minut).
8. Po rozebrání aparatury se suspenze přefiltrovala přes sítko.
9. Nezareagovaný pevný zbytek se důkladně promyl etanolem a kvantitativně převedl do laboratorní Petriho misky.
10. Následovalo volné sušení nezareagovaného pevného zbytku při laboratorní teplotě do konstantní hmotnosti.
11. Vysušený zbytek byl posléze zvážen a proveden výpočet pro vyhodnocení naměřených hodnot.

Použité katalyzátory:

- Glycerolát zinku (53% ZnO)
- Octan zinečnatý (37% ZnO)

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Byly vyzkoušeny 2 různé varianty složení systémů pro stejné podmínky ohřevu. Výkon MW záření byl použit maximální, tak jako se osvědčilo v dřívější práci. Sledování rychlosti a výtěžku reakce se provádělo pomocí úbytku hmotnosti nezreagovaného PET, stejným způsobem jako v diplomové práci Radka Tobolíka. [8]

4.1 Vliv složení systému na rychlost solvolytické reakce

Byly připraveny směsi se 2 různými katalyzátory buď s přídavkem glycerolátu zinku nebo s přídavkem octanu zinečnatého. Výstupní výkon mikrovlnné trouby byl ponechán konstantní a to 700 W. Celkem tedy byly provedeny 2 série experimentů – A; B.

Tab. 2 Složení směsí pro jednotlivé série

Série	Složení směsi
A	PET + EG + glycerolát zinku
B	PET + EG + octan zinečnatý

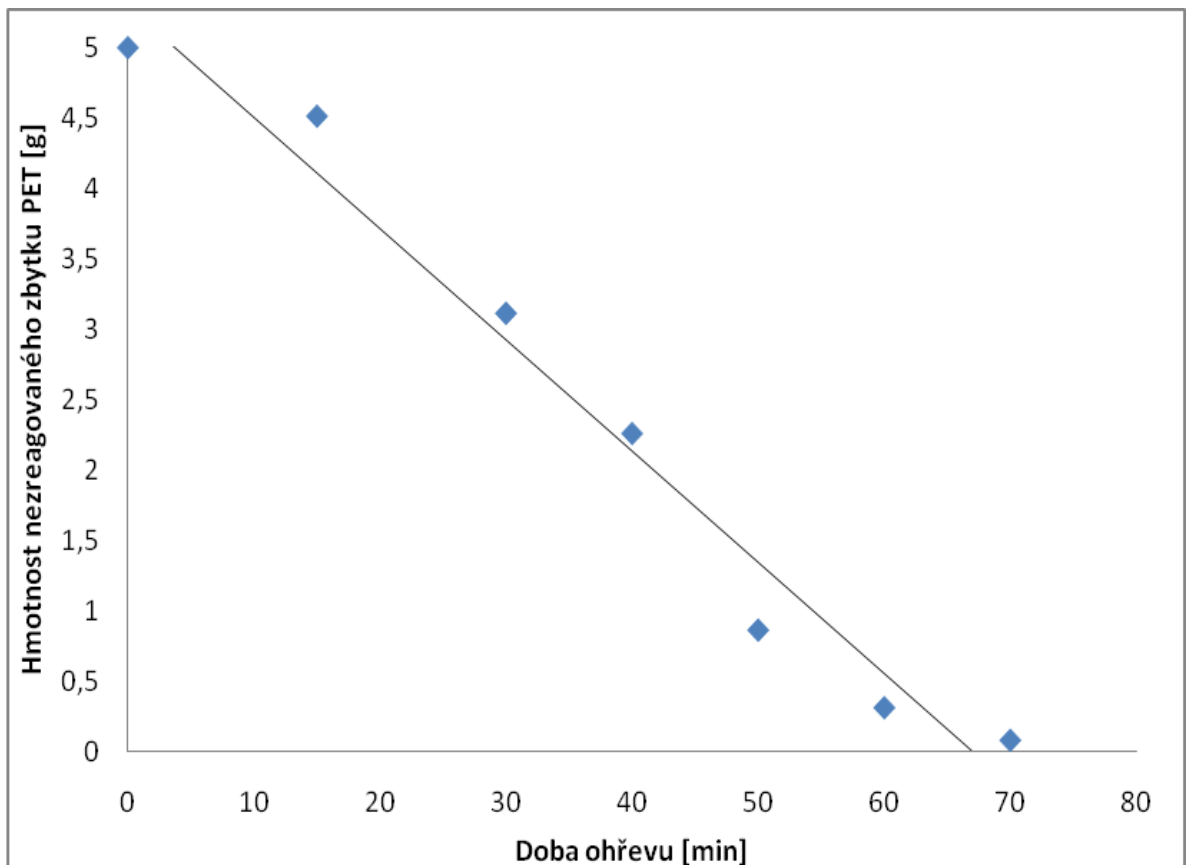
Byly tak získány výsledky pro srovnání výhodnosti daného systému. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 3 a 4 a v Obr. 5 a 6.

Rychlost úbytku hmotnosti a její standardní chyba byla provedena lineární regresí pomocí programu ORIGIN 7.0.

Množství získaných dat a jejich povaha neopravňují použít složitější matematický model pro fitování experimentálních závislostí, např. exponenciálou, sigmoidální křivkou, polynomem vyššího stupně atd. Na druhou stranu tvarová charakteristika PET materiálu (tenké destičky) i předchozí zjištění [8] přímo volbu lineární závislosti zdůvodňují.

Tab. 3 Navážky a naměřené hodnoty pro sérii A

Měření číslo	Doba ohřevu [min]	PET [g]	Katalyzátor glycerolát zinku [g]	EG [ml]	Hmotnost nezreagovaného zbytku [g]
1.	15	5,005	0,051	100	4,514
2.	30	5,002	0,050	100	3,116
3.	40	5,003	0,050	100	2,263
4.	50	5,002	0,053	100	0,869
5.	60	5,005	0,052	100	0,318
6.	70	5,004	0,051	100	0,087

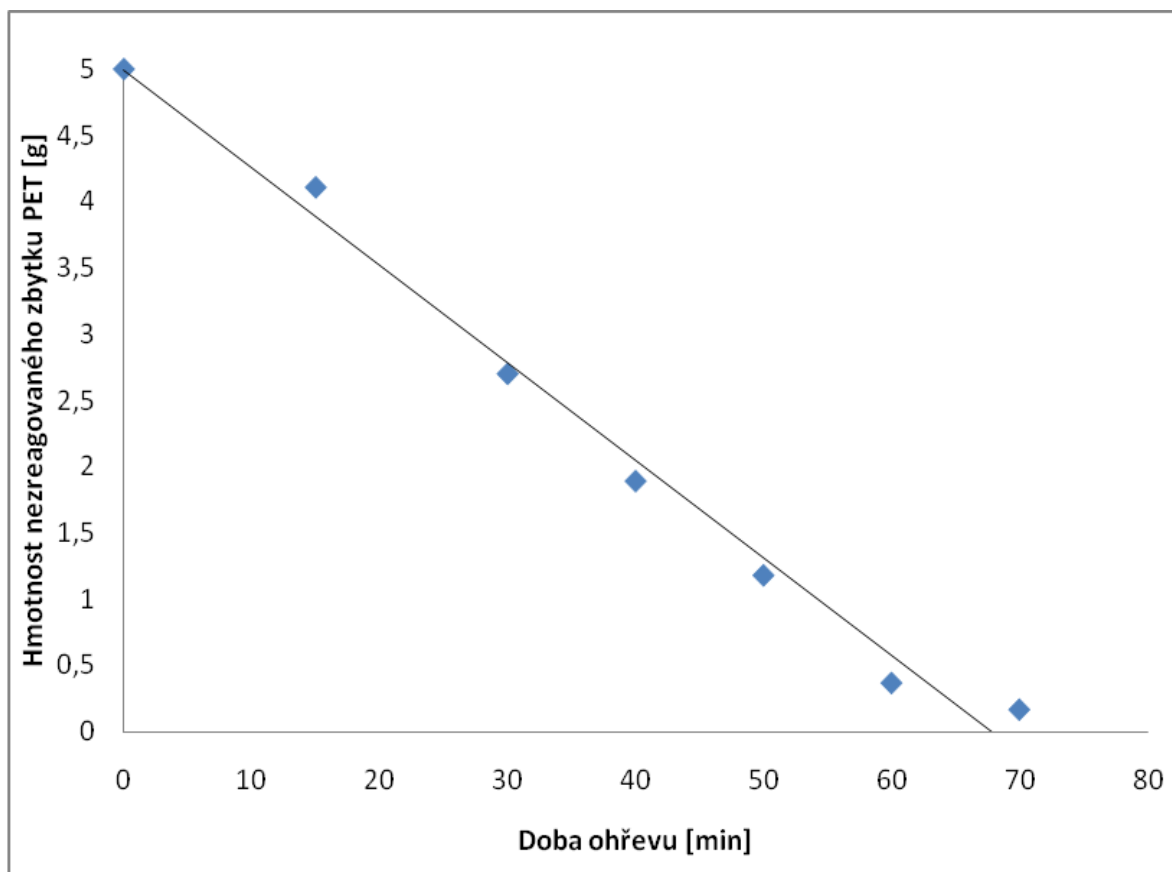


Obr. 5 - Graf závislosti úbytku hmotnosti PET na čase, série A

Rychlost úbytku hmotnosti: $0,079 \pm 0,006$ g/min

Tab. 4 Navážky a naměřené hodnoty pro sérii B

Měření číslo	Doba ohřevu [min]	PET [g]	Katalyzátor octan zinečnatý [g]	EG [ml]	Hmotnost nezreagovaného zbytku [g]
1.	15	5,002	0,052	100	4,108
2.	30	5,005	0,052	100	2,702
3.	40	5,003	0,052	100	1,893
4.	50	5,005	0,051	100	1,182
5.	60	5,005	0,051	100	0,370
6.	70	5,004	0,051	100	0,169



Obr. 6 - Graf závislosti úbytku hmotnosti PET na čase, série B

Rychlost úbytku hmotnosti: $0,074 \pm 0,004$ g/min

Reakční rychlost se projevuje ve všech případech lineárním úbytkem hmotnosti v čase, což umožňuje porovnat jednotlivé série experimentů – viz. Tab. 5.

Tab. 5 Reakční rychlosti solvolýzy

Série	Směs	Úbytek hmotnosti (g/min)
A	PET + EG + glycerolát zinku	$0,079 \pm 0,006$
B	PET + EG + octan zinečnatý	$0,074 \pm 0,004$

Z výsledků je patrné, že výsledky u obou katalyzátorů jsou obdobné. Rozdíl je nepatrný, v rámci standardní chyby jsou výsledky shodné.

4.2 Zhodnocení výsledků a další doporučení

Porovnejme naše výsledky s výsledky diplomové práce MW ohřev v chemické recyklaci PET od Radka Tobolíka, které jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Reakční rychlosti glykolýzy [8]

Série	Směs	Úbytek hmotnosti (g/min)
A	PET + octan zinečnatý + EG	$0,067 \pm 0,002$
B	PET + octan zinečnatý + EG + tween 80	$0,068 \pm 0,005$
C	PET + K_2CO_3 + EG	$0,048 \pm 0,003$
D	PET + K_2CO_3 + EG + tween 80	$0,056 \pm 0,002$

V DP od Bc. Radka Tobolíka použil katalyzátor K_2CO_3 společně s polysorbátem Tween 80 čímž se degradační reakce významně zrychlila oproti samotnému uhličitanu, zatímco u systému s katalyzátorem octanem zinečnatým se přidavek polysorbátu Tween 80 do směsi nijak výrazně neprojevil. To lze vysvětlit tím, že octan zinečnatý má již sám o sobě povrchově aktivní účinek. [7]

Proto nebyl do prezentovaných reakčních směsí ke katalyzátoru octanu zinečnatému žádný polysorbát Tween 80 přidáván. V této studii jsme nahradili katalyzátor K_2CO_3 , za připravený katalyzátor glycerolát zinku, abychom porovnali zda jde o vhodnější katalyzátor.

Podle zjištěných výsledků, se nepotvrdila naše domněnka, že glycerolát zinku bude vhodnější, tj. reaktivnější, katalyzátor než octan zinečnatý. Oba katalyzátory vykazují stejné výsledky.

ZÁVĚR

Byly provedeny 2 série experimentů, které prokázaly:

- Reakční rychlost se projevila ve všech případech lineárním úbytkem hmotnosti v čase, což umožnilo porovnat jednotlivé série experimentů.
- Za daných podmínek a zvolených koncentrací jsou oba katalyzátory, glycerolát zinku a octan, stejně vhodné katalyzátory pro degradační reakce PET.
- Srovnáním s předchozími výsledky v diplomové práci Radka Tobolíka [7] bylo zjištěno, že katalyzátor glycerolát zinku, je za daných podmínek lepší katalyzátor pro degradační reakce PET než K_2CO_3 .

Další výzkum by se měl soustředit na možnost nalezení ještě vhodnějších katalyzátorů a samozřejmě přenesení získaných poznatků z laboratorního prostředí do průmyslové praxe.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MLEZIVA, J. ŠŇUPÁREK, J. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. vydání. Praha: SOBOTÁLES, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [2] MLEZIVA, J. Polyestery, jejich výroba a zpracování. 1. vydání. Praha: SNTL, 1964. 408 s.
- [3] ŠTĚPEK, J. a kolektiv. Polymery v obalové technice. 1. vydání. SNTL. Praha 1981. 532 s.
- [4] ŠTĚPEK, J. a kolektiv. Technologie zpracování a vlastností plastů. 1. vydání. SNTL. Praha 1989. 638 s.
- [5] DOLEŽEL, B. Odolnost plastů a pryží. 1. vydání. Praha: SNTL 1981. 712 s.
- [6] DUCHÁČEK, V. Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] MIGOTOVÁ, Ludmila. PET láhve a jejich opakované zpracování. Zlín, 2008. 45 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Kateřina Chaloupková.
- [8] TOBOLÍK, Radek. MW ohřev v chemické recyklaci. Zlín, 2008. 53 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ivo Kuřitka.
- [9] FAKIROV, S., ed. Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites. 2002 Weinheim. ISBN 3-527-30113-5.
- [10] SPYCHAJ, T., Chemical Recycling of PET: Methods and Products, in Handbook of Thermoplastic Polymers: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites, S. FAKIROV, Editor. 2002 Weinheim. ISBN 3-527-30113-5.
- [11] LORENZETTI, C. Chemical Recovery of Useful Chemicals from Polyester (PET) Waste for Resource Conservation: A Survey of State of the Art. Journal of Polymers and the Environment 2006

- [12] VRBA, J. Úvod do mikrovlnné techniky. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 236 s. ISBN 80-01-02112-2.
- [13] VRBA, J. Aplikace mikrovlnné techniky. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 147 s. ISBN 80-01-02294-3.
- [14] ŠAULIOVÁ, J., Užitečné mikrovlny, in CHEMagazín. číslo 1. ročník XV. 2005.
- [15] [cit. 28.4.2011] Dostupný z www: <<http://www.romill.cz/cz/vyhody-mikrovlne-technologie>>
- [16] VOHLÍDAL, J., JULÁK, A., ŠTULÍK, K., Chemické a analytické tabulky. 1. vyd. Praha: Vydavatelství Grada Publishing, 1999. 652 s. ISBN 80-7169-855-5.
- [17] HEIDEMAN, G., NOORDERMEER, J. W. M., DATTA, R. N., et al., Effect of Zinc Complexes as Activator for Sulfur Vulcanization, in Various Rubbers, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 78, No. 2, 2005, pp. 245–257.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MW	Mikrovlny
DP	Diplomová práce
apod.	a podobně.
např.	například.
tj.	to je.
tzv.	takzvaně.
viz.	více.
resp.	respektive.
Obr.	Obrázek.
Tab.	Tabulka.
Mn	číselně střední relativní molekulová hmotnost
T _g	teplota skelného přechodu
PET	Polyethyltereftalát (též PETP)
TA	Kyselina tereftalová
DMT	Dimethyltereftalát
EG	Etylenglykol
BHET	<i>bis</i> (2-hydroxyetyl)tereftalát
TAD	Tereftalamid
f	Vlnová frekvence
c	Rychlost světla ve vakuu
λ	Vlnová délka
C ₃ H ₈ O ₃	Glycerol
ZnO	Oxid zinečnatý
(CH ₃ COO) ₂ Zn	Octan zinečnatý

$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	Isopropanol
$\text{HO-CH}_2\text{CH}_2\text{-OH}$	Etylenglykol
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-OH}$	Etanol
H_2O	Destilovaná voda
K_2CO_3	Uhličitan draselný

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Schéma opakující se konstituční jednotky PET	str. 10
Obr. 2 – Vstřikování předlisku pro vyfukování láhve	str. 15
Obr. 3 - Způsoby chemické recyklace PET	str. 18
Obr. 4 - Schéma pracovní aparatury	str. 32
Obr. 5 - Graf závislosti úbytku hmotnosti PET na čase, série A	str. 36
Obr. 6 - Graf závislosti úbytku hmotnosti PET na čase, série B	str. 37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní vlastnosti PET	str. 11
Tab. 2 Složení směsi pro jednotlivé série	str. 35
Tab. 3 Navážky a naměřené hodnoty série A	str. 36
Tab. 4 Navážky a naměřené hodnoty série B	str. 37
Tab. 5 Reakční rychlosti solvolýzy	str. 38
Tab. 6 Reakční rychlosti glykolýzy	str. 38