# ANALÝZA VYBRANÉ INOVATIVNÍ TECHNOLOGIE PRO NAKLÁDÁNÍ S PEVNÝMI ODPADY (CHEMICKÁ RECYKLACE PLASTŮ) – DATABÁZE PARABAT

*1.E.1.10 Analýza vybrané inovativní technologie pro nakládání s pevnými odpady (chemická recyklace plastů) – databáze ParaBAT*
*Zpráva vypracovaná v rámci řešení pracovního balíčku WP1E projektu TAČR SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)*
*Prosinec 2024*

MSc. Ivanna Harasymchuk, prof. Ing. Vladimír Kočí, Ph.D., Ústav udržitelnosti a produktové ekologie, VŠCHT Praha

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

## Obsah

*1. Úvod*.....

*2. Technologie chemické recyklace*.....

**2.1. Současné metody chemické recyklace plastů**.....

2.1.1. Hydrolýza.....

2. 1.2 Glykolýza.....

2. 1.3. Enzymatická degradace.....

2. 1.4. Hydrolýza kyselinou.....

2. 1.5. Depolymerizace v nadkritické kapalině.....

2. 1.6. Alkalická hydrolýza.....

2. 1.7. Katalytická pyrolýza.....

2. 1.8. Rychlá pyrolýza.....

2. 1.10. Mikrovlnná pyrolýza.....

2. 1.11. Pyrolýza ve fluidním loži.....

2. 1.12. Plazmové zplyňování.....

2. 1.13. Zplyňování parou.....

2. 1.14. Oxidační degradace.....

2. 1.15. Hydrotermální zkapalňování.....

2. 1.16. Biologická depolymerizace.....

2. 1.17. Elektrochemická recyklace.....

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

**2.2. Porovnání technologií** .....

2. 2.1. Výstupní produkty .....

2. 2.1. Sladění typu plastu s technologií .....

***3. Environmentální a ekonomické důsledky*** .....

**3.1. Metodika LCA** .....

**3.2. Energetické zatížení** .....

**3.3. Ekonomické zatížení** .....

***4. Použití v praxi*** .....

4.1. Příklady použití v praxi .....

4.2. Výzvy spojené s praktickým použitím .....

4.3. BAT pro chemickou recyklaci plastů .....

***5. Chemická recyklace plastů v ČR*** .....

**5.1. Přehled firem zabývajících se chemickou recyklací plastů** .....

**5.2. Databáze ParaBAT** .....

***6. Závěr*** .....

***Literatura*** .....

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

# 1. Úvod

Tváří v tvář rostoucí krizi znečištění plastem se svět potýká s miliony tun plastového odpadu, který každoročně zaplavuje skládky a oceány [1]. Rozsáhlé rozšíření plastových materiálů v průběhu minulého století vyvolalo hlubokou environmentální krizi, která se vyznačuje všudypřítomným hromaděním plastového odpadu v suchozemských a mořských ekosystémech po celém světě [2]. Vzhledem k tomu, že produkce plastů stále prudce roste a předstihuje odpovídající pokrok v infrastruktuře pro nakládání s odpady, nebyla naléhavost udržitelných řešení krize znečištění plasty nikdy výraznější [3]. Genezi krize plastového odpadu lze vysledovat až do poloviny 20 století, která se shoduje s nástupem masové výroby a spotřeby syntetických polymerů [4]. Plasty rychle pronikly do různých odvětví a vytlačily tradiční materiály díky své cenové dostupnosti, univerzálnosti a trvanlivosti [5]. Plasty, kdysi označované jako "materiály tisíce použití", splňují požadavky ve všech oblastech, od oděvního a automobilového průmyslu až po výrobu zdravotnického vybavení a elektroniky. Exponenciální růst výroby plastů však předstihl odpovídající pokrok v infrastruktuře pro nakládání s odpady, což zhoršuje šíření plastového odpadu a jeho průvodní dopady na životní prostředí. Podle nejnovějších statistických údajů se v současné době na celém světě vyrábí více než 450 milionů tun plastů, což znamená, že celosvětová produkce plastů se jen za posledních dvacet let zdvojnásobila [6], [7]. V roce 2022 činila výroba plastů v Evropě celkem 58,7 milionu tun, což je oproti předchozímu roku pokles o téměř dva miliony tun [8]. Největší podíl na výrobě v Evropě má polymer PP (polyproylen) s 19,2 %, následuje PE se 17,2 % [9]. Polovinu všech plastových odpadů tvoří obalové plasty [10]. Polovina plastů shromážděných k recyklaci se vyváží ke zpracování do zemí mimo EU. Mezi důvody vývozu patří nedostatek kapacit, technologií nebo finančních prostředků na zpracování odpadu na místě [11]. V minulosti značná část plastového odpadu vyváženého z EU směřovala do Číny. Je však pravděpodobné, že s tím, jak Čína zavádí přísnější předpisy na dovoz plastového odpadu, bude vývoz z EU dále klesat. Tato situace vyvolává obavy ze zvýšeného spalování a skládkování plastového odpadu v Evropě. Hlavním cílem vývozu plastového odpadu z Evropské unie v roce 2021 bylo Turecko s objemem 395 000 tun. Na druhém místě se v tomto roce umístila Malajsie, která z členských států EU přijala více než 133 000 tun plastového odpadu [12]. Pokud jde o EU, společnost Plastics Europe odhaduje, že z 30 milionů tun plastového odpadu vyprodukovaného ročně je 35 % účinně předáno k recyklaci a zbytek ke spalování s energetickým využitím (42 %) nebo ke skládkování (23 %). Kromě toho se Evropská komise rozhodla zakázat vývoz odpadu do zemí mimo Evropskou unii tím, že přezkoumala nařízení o přepravě odpadů. Dále je zakázáno přepravovat plastový odpad do zemí, jako je Malajsie, Thajsko a Indonésie [13]. Vývoz plastového odpadu do rozvojových zemí navíc prohlubuje nespravedlnost v oblasti životního prostředí a zdůrazňuje vzájemnou provázanost globálních systémů nakládání s odpadem [14].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

V současné době existuje na světě mnoho různých druhů plastů a jejich sloučenin, z nichž každá má své jedinečné vlastnosti [15]. Nejběžnějším klasifikačním systémem pro plasty je identifikační kód pryskyřice (RIC) [16]. Mezi nejznámější patří polyethylen (PE), který může být vyráběn v různých hustotách v závislosti na požadovaných vlastnostech výrobku, polypropylen (PP), polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC), akrylonitril-butadien-styren (ABS), polykarbonát (PC) [17]. Poptávka po zpracovatelích plastů v Evropské unii (EU-27 + 3) činila v roce 2021 celkem 50,3 milionu tun. Z tohoto celkového množství připadalo na PP 10 milionů metrických tun. Druhým nejžádanějším polymerem v EU-27 byl v tomto roce polyethylen o nízké hustotě (LDPE) a lineární LDPE [18]. Trvanlivost a stálost plastů usnadňuje jejich rozsáhlé šíření, přičemž jejich fragmenty se hromadí ve vzdálených prostředích, od polárních ledovců až po hlubokomořské příkopy [19]. Kromě toho požití plastových úlomků mořskými organismy a suchozemskými volně žijícími živočichy způsobuje nejen fyzické poškození, ale také usnadňuje bioakumulaci toxických znečišťujících látek, čímž zesiluje ekologické poruchy a ohrožuje lidské zdraví [20]. Stupňující se rozsah znečištění plasty podtrhuje naléhavost zavedení udržitelných řešení ke zmírnění jejich dopadů na životní prostředí a k podpoře přechodu na oběhové a regenerativní hospodářství plastů [21]. Cílem politiky EU v oblasti odpadů je vytvořit oběhové hospodářství, v němž se materiály a zdroje udrží v ekonomice co nejdéle a v němž je odstraňování odpadů poslední možností nakládání s odpady [22]. V současné době existují tři hlavní způsoby zpracování odpadu: chemické, mechanické a energetické využití. Rozdíl mezi těmito metodami spočívá v tom, že chemická recyklace zahrnuje rozklad chemické struktury plastových polymerů na jejich složkové monomery, zatímco mechanická recyklace se zaměřuje na fyzikální zpracování plastů bez změny jejich chemické struktury. Pokud jde o druhou metodu, k energetickému využití dochází spalováním plastového odpadu. Maximální množství plastového odpadu, které lze vytřídit a mechanicky zpracovat, se odhaduje na 29-45 % [23]. Tradiční metody recyklace jsou nedostatečné a často vedou spíše k downcyklaci nebo spalování než k účinné recyklaci [24]. Toto dilema zhoršuje emise skleníkových plynů a přispívá ke změně klimatu. Problém ještě zhoršuje skutečnost, že recyklační toky jsou často kontaminovány, což zhoršuje kvalitu recyklovaných materiálů [25]. Účinnost mechanické recyklace závisí na faktorech, jako je kvalita shromážděných plastů a použité techniky třídění. Nejúčinnější je u některých typů plastů, jako jsou PET, HDPE a PP [26]. Mechanická recyklace je sice cenná, ale naráží na omezení při účinném zvládání některých technických problémů spojených s plastovým odpadem [27]. Procesu brání nemožnost nakládat se smíšenými nebo kontaminovanými plasty [28]. Recyklovaný plast získaný mechanickou recyklací není tak kvalitní jako primární plast. Může mít nečistoty, sníženou pevnost a barevné odchylky [29]. Kromě toho může mechanická recyklace některých polymerů vést ke zhoršení jejich vlastností, což je činí méně vhodnými pro vysoce hodnotné aplikace [30]. Mechanické zpracování zpracovává oddělený proud jednoho polymeru, který je promyt, granulován a poté znovu extrudován, aby se získaly recyklované pelety připravené k použití [31]. Kvůli těmto omezením je obtížné dosáhnout systému uzavřeného cyklu pro všechny druhy plastového odpadu [32]. Nedostatečnost stávajících

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

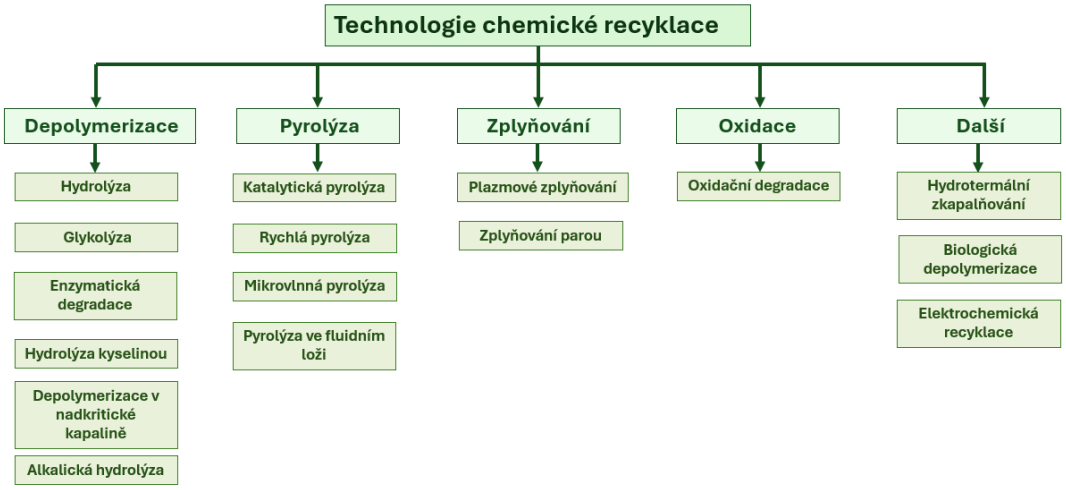
postupů nakládání s odpady podtrhuje nutnost inovativních přístupů k recyklaci plastů, jako je chemická recyklace, které nabízejí potenciál uvolnit hodnotu z plastového odpadu a podpořit oběhovost v hodnotovém řetězci plastů. V tomto dynamickém prostředí se chemická recyklace jeví jako klíčový hráč při hledání udržitelnějšího a účinnějšího přístupu k řešení globální krize plastového odpadu [33]. Chemická recyklace jako koncept se vyvíjí již několik desetiletí, ale její zvýšená pozornost a přijetí jsou novější. Procesy chemické recyklace založené na depolymerizaci a zpracování suroviny rozkládají dlouhé uhlovodíkové řetězce v plastu na kratší uhlovodíkové frakce nebo monomery prostřednictvím chemických, tepelných nebo katalytických procesů. Pomocí chemického zpracování lze plastový odpad přeměnit na plnohodnotný tržní produkt, který lze využít například v palivářském průmyslu a slouží jako alternativa k běžně používaným zemědělským produktům (biokomponenty) [34].

Celosvětová krize znečištění plastem je charakterizována rychlým růstem výroby plastů, který převyšuje kapacitu infrastruktury pro nakládání s odpady, a také hromaděním milionů tun plastového odpadu na skládkách a v oceánech. Nedostatky tradičních metod likvidace, zejména mechanické recyklace, často vedou k tomu, že se odpad spaluje nebo skládkuje, což zhoršuje problémy životního prostředí a přispívá k emisím skleníkových plynů. Vývoz plastového odpadu z EU, který je způsoben nedostatkem místních zpracovatelských kapacit, zkomplikovalo zavedení omezení dovozu plastů v zemích, jako je např. Za slibný alternativní přístup se považuje chemická recyklace, která zahrnuje rozklad polymerů na monomery a přeměnu odpadu na užitečné výrobky, i když se potýká s technickými a ekonomickými problémy. Potřeba zavést udržitelná řešení je klíčovým faktorem pro snížení negativního dopadu plastů na životní prostředí a vytvoření oběhového hospodářství v oblasti recyklace plastů.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

# 2. Technologie chemické recyklace

Chemická recyklace zahrnuje přeměnu plastových polymerů na menší molekuly nebo monomery prostřednictvím různých chemických procesů. Cílem těchto procesů je rozložit dlouhé řetězce polymerů, které se nacházejí v plastovém odpadu, což umožňuje získat cenné zdroje, které lze využít k výrobě nových materiálů nebo paliv. V současné době již existuje značné množství metod chemické recyklace. Klasifikace technologií chemické recyklace zahrnuje jejich rozdělení do kategorií na základě různých kritérií, jako je typ chemických reakcí, vstupní materiály, podmínky procesu a dopad na životní prostředí. V této práci jsme známé techniky klasifikovali podle typu chemické reakce. Výsledky klasifikace jsou uvedeny na obrázku 1.




Obrázek 1. Klasifikace technologií chemické recyklace plastů podle typu chemické reakce.

## 2.1. Současné metody chemické recyklace plastů

Na rozdíl od mechanické recyklace, která obvykle vede ke snížení kvality materiálu (tzv. "downcycling"), chemická recyklace umožňuje získat čisté suroviny, které lze znovu použít k výrobě plastů stejné kvality. Tímto způsobem může chemická recyklace přispět k uzavření koloběhu materiálů a snížení závislosti na primárních surovinách, jako je ropa.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.1 Hydrolýza

Hydrolýza plastů obvykle zahrnuje rozbití esterových vazeb přítomných v polymerních řetězcích, což vede ke vzniku příslušných monomerů. Hydrolýza je heterogenní reakce, která probíhá na povrchu materiálu [35]. Nejtypičtějším produktem hydrolýzy je PET. Proces této technologie je ovlivněn mnoha faktory. Výsledný efekt závisí na použitém katalyzátoru, teplotě, tlaku a velikosti plastových části [36]. Provozní teplota této technologie se pohybuje od 150 °C do 300 °C [37]. Pro tento proces je charakteristické použití katalyzátorů, jako je kyselina sírová, kyselina chlorovodíková, oxidy kovů (např. TiO2, ZnO, MgO) a zeolity (např. ZSM-5) [38]. Důležité je také prostředí hydrolýzy, které může být kyselé, zásadité nebo neutrální [39]. Neutrální hydrolýza je považována za nejšetrnější k životnímu prostředí, protože nevyžaduje použití agresivních chemických látek, protože reakce probíhá při pH blízkém neutrálnímu [40]. Neutrální hydrolýzu lze provádět při nižších teplotách ve srovnání s kyselou nebo zásaditou hydrolýzou, které často vyžadují vyšší teploty k usnadnění reakce, což vede k větší energetické účinnosti [41]. Neutrální hydrolýza však nezohledňuje mechanické nečistoty v PET odpadu, což vede k tomu, že konečný produkt obsahuje více nečistot než produkt získaný alkalickou hydrolýzou [42]. Hlavními produkty hydrolýzy jsou kyselina tereftalová, ethylenglykol a diethylenglykol [43]. Ucelenější přehled výstupních produktů získaných chemickou recyklací je uveden v tabulce 1.

### 2.1.2. Glykolýza

Glykolýza zahrnuje depolymeraci plastů, typicky PET, prostřednictvím řady chemických reakcí [44]. Při glykolýze se polymer PET rozkládá na molekulární úrovni za přítomnosti transesterifikačního katalyzátoru. Nejčastěji používané glykoly pro tento účel jsou ethylenglykol, diethylenglykol, propylenglykol a dipropylenglykol za účasti: katalytické, rozpouštědlem asistované, superkritické a mikrovlnné glykolýzy [45]. Esterové vazby v PET se štěpí, což vede ke vzniku EG a TPA nebo jeho derivátů jako reakčních produktů [46]. Úspěch glykolýzy závisí do značné míry na optimalizaci provozních podmínek, včetně teploty, tlaku, reakční doby a poměru reaktantů [47]. Obvykle se glykolýza provádí při zvýšených teplotách od 150 °C do 250 °C, za atmosférického nebo mírně zvýšeného tlaku [48]. Katalyzátor je jedním z nejdůležitějších faktorů v procesu glykolýzy PET [49]. Běžně se používají katalyzátory jako octan zinečnatý, oxid antimonitý, oxid titaničitý, oxid zinečnatý a zeolity [50]. Vývoj účinných katalyzátorů a strategií optimalizace procesu je nezbytný pro zvýšení ekonomické životaschopnosti a škálovatelnosti technologií glykolýzy [51]. Reakční doba se může pohybovat od několika hodin až po dny v závislosti na konkrétním návrhu procesu a požadovaných

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

výsledcích [52]. Monomery získané z glykolýzy lze využít jako stavební bloky pro syntézu nových polymerů nebo speciálních chemických látek, čímž se uzavírá smyčka koloběhu plastových materiálů [53].

### 2.1.3. Enzymatická degradace

Tato metoda využívá specifické enzymy k rozkladu polymerní struktury plastů na menší, lépe zpracovatelné molekuly, které lze dále zpracovat na užitečné výrobky [54]. Úspěch enzymatické degradace do značné míry závisí na výběru vhodných enzymů [55]. Enzymy katalyzují štěpení esterových vazeb, což vede k fragmentaci polymerních řetězců na menší oligomerní fragmenty [56]. Enzymy, jako jsou lipázy, proteázy a esterázy, prokázaly slibnou aktivitu při rozkladu různých typů plastů, včetně PET, PE a PP [57]. Optimalizace reakčních podmínek je nezbytná pro maximalizaci účinnosti enzymatické degradace při současném zajištění zachování aktivity enzymů [58]. Klíčové parametry, včetně teploty, pH, koncentrace substrátu a koncentrace enzymu, jsou pečlivě regulovány, aby se usnadnila optimální enzymová aktivita a přístupnost substrátu [59]. Teplotní rozmezí pro enzymatickou degradaci se obvykle pohybuje od 20 °C do 60 °C v závislosti na konkrétních použitých enzymech, zatímco optimální pH se liší podle vlastností enzymu a zahrnuje kyselé až zásadité podmínky [60]. Monomerní jednotky získané z enzymatické degradace slouží jako prekurzory pro syntézu nových polymerů, biopaliv nebo chemických surovin prostřednictvím polymeračních reakcí [61]. Dimery a oligomery získané enzymatickou degradací nacházejí uplatnění jako chemické meziprodukty nebo přísady v různých průmyslových procesech [62]. Stojí také za zmínku, že tato metoda se ukazuje jako slibná při řešení problému hromadění textilního odpadu, zejména při enzymatické degradaci přírodních vláken v tkaninách z polyesteru a bavlny za účelem získání polyesterových [63]. Při tomto procesu se k enzymatické degradaci používají specifické enzymy, jako jsou celulázy, které mohou rozkládat přírodní vlákna, jako je bavlna (složená z celulózy), přičemž polyester zůstává neporušený [64]. Jeho průmyslové využití však vyžaduje další výzkum a optimalizaci.

### 2.1.4. Kyselá hydrolýza

Kyselá hydrolýza plastů, zejména polymerních materiálů, jako je PET nebo PS, spočívá v rozkladu dlouhých polymerních řetězců na menší molekuly působením silných kyselin za přítomnosti vody [65]. Silné kyseliny, jako je kyselina sírová nebo kyselina chlorovodíková, protonují atomy kyslíku v těchto vazbách, což vede ke vzniku hydroxylových skupin [66]. Následná hydrolýza těchto

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

modifikovaných vazeb vodou vede ke štěpení polymerních řetězců, čímž vznikají menší molekuly. Kinetika kyselé hydrolýzy je ovlivněna faktory, jako je teplota, koncentrace kyseliny a reakční doba, které určují rychlost a rozsah degradace polymeru. Obvykle se teplota procesu pohybuje v rozmezí 100 °C až 150 °C. Obvykle se používají koncentrované kyseliny. Koncentrace kyseliny je rozhodující a liší se v závislosti na typu plastu a požadované rychlosti reakce [67]. Výstupní produkty obvykle zahrnují menší molekuly, jako jsou monomery, oligomery a fragmenty páteře polymeru [68].

### 2.1.5. Depolymerizace v nadkritické kapalině

Superkritická fluidní depolymerizace je inovativní chemický proces používaný k rozkladu plastů na jejich monomery nebo jiné cenné chemické produkty s využitím superkritických kapalin jako média [69]. Mezi běžné nadkritické kapaliny používané při SCFD patří oxid uhličitý a voda [70]. Při SCFD slouží nadkritická kapalina jako rozpouštědlo i jako reaktant [71]. Nadkritická kapalina proniká do polymerní matrice, bobtná a snižuje její viskozitu. To umožňuje interakci kapaliny s polymerními řetězci, což vede ke štěpení páteře polymeru a vzniku menších molekul, jako jsou monomery nebo oligomery [72]. SCFD se obvykle provádí při teplotách vyšších než kritická teplota superkritické kapaliny, která se pohybuje v rozmezí 100 °C až 400 °C [73]. Tlak se udržuje nad kritickým tlakem nadkritické kapaliny, obvykle v rozmezí 70 až 300 barů [74]. Ke zvýšení rychlosti a selektivity depolymerizační reakce lze použít katalyzátory. Mezi běžné katalyzátory patří oxidy kovů, zeolity a kyselé/bazické katalyzátory [75].

### 2.1.6. Alkalická hydrolýza

Alkalická hydrolýza je podobná výše popsaným procesům hydrolýzy, liší se pouze tím, že v tomto případě dochází k rozkladu polymerních materiálů pomocí alkálií. V případě kyselé hydrolýzy působí kyseliny jako katalyzátory, které zvyšují protonizaci funkčních skupin polymeru, zatímco při alkalické hydrolýze působí zásady jako nukleofily, které atakují specifické atomy v polymeru, jako je například atom karbonylu, což vede ke štěpení vazeb a vzniku nových produktů. Při tomto procesu se rozdrcený plast smísí s alkalickým roztokem a po dokončení reakce se směs ochladí a výsledné produkty se oddělí filtrací [76]. Alkalickou hydrolýzou plastových materiálů, zejména PET, vznikají především dva důležité produkty: ethylenglykol a kyselina tereftalová [77]. Účinnost tohoto procesu závisí na koncentraci alkalického roztoku a použitém systému rozpouštědel [78]. Studie [79], [80] například ukázaly, že v přítomnosti polárního aprotického rozpouštědla a malého množství vody se rozklad nenasycené polyesterové pryskyřice na cenné suroviny, jako jsou produkty obsahující karboxylát,

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

výrazně zvyšuje díky úloze rozpouštědla při fragmentaci polymerní sítě. Podobně optimalizace reakčních podmínek, jako je teplota a složení rozpouštědla, může vést k vysokým výtěžkům TPA a EG, přičemž některé studie dosahují až 95% konverze za mírných podmínek. Hlavními parametry ovlivňujícími proces jsou teplota, která se obvykle pohybuje v rozmezí 150 °C až 200 °C, tlak 2 až 3 MPa a doba trvání reakce 1 až 6 hodin [76], [81], [82], [83], [84]. Nastavení všech těchto parametrů samozřejmě závisí na použité zásadě. Typickými zásadami pro tento proces jsou hydroxid sodný, hydroxid draselný a hydroxid amonný [85]. Výběr konkrétní zásady pro alkalickou hydrolýzu závisí na požadovaných vlastnostech procesu a konečných produktů s ohledem na specifika materiálů a technické požadavky [86].

### 2.1.7. Katalytická pyrolýza

Katalytická pyrolýza zahrnuje tepelný rozklad plastových materiálů za přítomnosti katalyzátoru. Katalytická pyrolýza závisí na faktorech, jako je teplota, doba zdržení, složení vstupní suroviny a katalyzátor [87]. Je zřejmý silný vliv reakční teploty a doby zdržení na výstupní produkty pyrolýzy. Teplota typická pro proces pyrolýzy se pohybuje v rozmezí 400 °C až 600 °C [88]. Doba zdržení obvykle závisí na různých faktorech, včetně konstrukce reaktoru, provozních podmínek a konkrétního použitého katalyzátoru [89]. Obvykle se doba retence pohybuje v rozmezí 20 až 60 minut [90], [91]. Výstup produktu závisí na použité vstupní surovině, jejíž charakterizací lze do určité míry předpovědět distribuci produktu [92]. V porovnání s pyrolýzou jednotlivých plastů se při pyrolýze směsných plastů získá méně než 50 % hmot. ropného produktu, který může být z hlediska kvality rovnocenný [93]. Mezi použité katalyzátory lze zařadit FCC, HZSM-5, zeolit-ß, Fe2O3, přírodní zeolit, červené bahno [94], [95], [96], [97]. Vyrobené kapalné palivo má potenciál pro využití v několika energetických aplikacích, jako je výroba elektřiny, palivo pro dopravu a pro topné účely, jeho průměrná HHV (vyšší výhřevnost) je 40 MJ/kg [98].

### 2.1.8. Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza plastů obvykle probíhá při teplotách mezi 500 °C a 800 °C, s odchylkami v závislosti na typu plastu a specifičnosti použité technologie [99]. Rychlá pyrolýza zahrnuje rychlý tepelný rozklad plastových materiálů za nepřítomnosti kyslíku. Tento typ pyrolýzy obvykle probíhá při vyšších teplotách a relativně krátké době zdržení (od sekund do minut) [100]. V tomto případě je důležitá rychlost zahřívání plastů, přičemž průměrná hodnota je 50 °C $min^{-1}$ [101]. Mezi primární produkty rychlé pyrolýzy patří pyrolýzní olej, který lze dále zpracovat na dopravní palivo, pevný

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

zbytek nebo dřevěné uhlí, směs plynů zahrnující vodík, metan, oxid uhelnatý a oxid uhličitý, kterou lze využít pro výrobu tepla a energie nebo jako chemickou surovinu [102]. Stejně jako v jiných případech hodně záleží na složení vstupní suroviny a kvalitě získaných produktů. Vzhledem k vysokým teplotám potřebným k provedení procesu je tato technologie poměrně energeticky náročná. Mezi výhody této metody chemické recyklace lze uvést její poměrně vysokou účinnost. Pokud jde o nevýhody, patří k nim vysoká energetická náročnost [103].

### 2.1.9. Mikrovlnná pyrolýza

Mikrovlnné záření se používá k vytváření tepla v plastovém materiálu interakcí elektromagnetických vln s polárními molekulami přítomnými v plastu [104]. Mikrovlnné záření rovnoměrně ohřívá látku jako celek, místo aby zpočátku ohřívalo vnější povrch, jak je tomu u konvenčního ohřevu [105]. V tomto případě je kritickým parametrem úroveň výkonu mikrovlnného záření, která určuje rychlost ohřevu a rozložení teploty uvnitř plastového materiálu [106]. Vyšší úrovně výkonu vedou k rychlejšímu ohřevu, ale mohou také vést k lokálnímu přehřátí a tepelné degradaci [107]. Hlavními výstupními produkty jsou plyn, olej, vosk a olej + vosk [108]. Charakteristická teplota pro tento proces se pohybuje od 400 °C do 1200 °C. Přesné řízení teploty pyrolýzy je nezbytné pro optimalizaci výtěžku a kvality produktu [109]. Při mikrovlnné pyrolýze je na 1 tunu plastu potřeba v průměru 1389 kWh energie [110]. Pro tento proces jsou rovněž charakteristická aditiva, jako je karbid křemíku nebo aktivní uhlí, která se používají v poměru 5-20 % ke vstupní surovině. Tyto přísady zvyšují absorpci mikrovln, čímž zajišťují účinnější a rovnoměrnější ohřev [111]. Jednou z nevýhod této metody je její silná závislost na dielektrických vlastnostech materiálu [112].

### 2.1.10. Pyrolýza ve fluidním loži

Pevné částice (obvykle písek, oxid hlinitý nebo oxid křemičitý) jsou fluidizovány proudem plynu (obvykle dusíku nebo páry) proudícím vzhůru reaktorem. Vysoká plocha povrchu a těsný kontakt mezi pevnými částicemi a plastovou surovinou podporují rychlý a účinný ohřev, což vede k rychlejší pyrolýze [113]. Při této metodě dochází k tepelnému rozkladu plastových materiálů za nepřítomnosti kyslíku při zvýšených teplotách (obvykle od 400 °C do 800 °C) uvnitř reaktoru s pseudotekutou vrstvou [114]. Záleží na velikosti pevných částic; menší a hustší částice zajišťují lepší fluidizaci a přenos tepla, zatímco větší částice mohou vést ke špatnému míchání a distribuci tepla [115]. Doba setrvání plynu v reaktoru, známá také jako doba setrvání plynu, ovlivňuje rozsah pyrolýzních reakcí a výtěžky produktů. Řídí se nastavením parametrů, jako je průtok plynu, geometrie reaktoru a distribuce

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

velikosti částic [116]. Ačkoli měrný příkon je různý, typické malé až střední provozy mohou spotřebovávat přibližně 50 kW až 500 kW v závislosti na rozsahu a výkonu. Spotřebovaná energie byla ovlivněna teplotou a hmotnostním tokem vstupního materiálu. Na druhou stranu, jelikož spotřeba energie závisí na množství reagujícího krmiva, vyšší toky krmiva rozdělovaly teplo mezi větší množství hmoty, čímž se snižovala energie spotřebovaná na kilogram vyrobeného benzinu [117]. Spotřeba je menší a souvisí především s chladicími a kondenzačními systémy. Hlavními výstupními produkty jsou pyrolýzní olej, nekondenzovatelné plyny a biochar [118]. Mezi perspektivami této metody lze vyzdvihnout flexibilitu a škálovatelnost. Tento proces lze přizpůsobit různým provozním měřítkům a podmínkám potřebným pro získání produktů požadované kvality [119].

### 2.1.11. Plazmové zplyňování

Plazmové zplyňování je alotermický proces zplyňování, při němž teplo potřebné pro endotermické reakce dodává tepelné plazma, obvykle generované stejnosměrnými obloukovými plazmovými hořáky [120]. Při kontaktu odpadu s tepelným plazmatem se jeho organická frakce přeměňuje na synplyn a anorganická frakce se přeměňuje na vitrifikovanou strusku [121]. Tento proces probíhá při extrémně vysokých teplotách, obvykle v rozmezí 3000 °C až 8000 °C [122]. Na výstupu se získává syntetický plyn a struska [123]. Spotřeba energie se může pohybovat od 800 do 950 kWh na tunu zpracovaného odpadu [124]. V závislosti na vstupním množství odpadu a požadované kvalitě syntézního plynu lze k úpravě chemických reakcí a vlastností strusky použít přísady, jako je vápno nebo zdroje uhlíku [125]. Výhody této metody spočívají ve schopnosti pracovat prakticky s jakýmkoli druhem odpadu. Nevýhodou však je, že tato technologie vyžaduje značnou spotřebu energie a značné počáteční investice.

### 2.1.12. Parní zplyňování

Parní zplyňování plastů zahrnuje použití páry k rozkladu plastového odpadu při vysokých teplotách, obvykle mezi 600 °C a 1200 °C, v kontrolovaném kyslíkovém prostředí [126]. Výstupem je synplyn, který se skládá z přibližně 20 % vodíku a 20 % oxidu uhelnatého, zbytek tvoří CO2 a další plyny. Synplyn se používá v chemické syntéze, při výrobě energie a jako průmyslové palivo [127]. Účinnost přeměny uhlíku může dosahovat až 91 %, přičemž objemové emise oxidu uhličitého jsou za optimálních podmínek pouhých 15 % [128]. Pro zlepšení kvality výstupních produktů se přidávají katalyzátory, jako je draslík, lithium nebo nikl [129]. Ve srovnání s pyrolýzou si zplyňování poradí s

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

rozmanitějším spektrem vstupních surovin a pracuje s vyšší účinností, potenciálně s více než 80 % při tepelné konverzi.

### 2.1.13. Oxidační degradace

Oxidační degradace plastů znamená chemický rozklad plastových materiálů reakcí s kyslíkem [130]. Tento proces rozkládá velké polymerní řetězce na jednodušší sloučeniny. Ačkoli ne vždy vede ke vzniku původních monomerů, stále se jedná o chemickou přeměnu plastů. Tento proces lze urychlit přidáním látek, jako je stearan železitý, běžný pomocný prostředek fotooxidace. Degradace začíná štěpením vazeb uhlík-vodík a uhlík-uhlík v polymerních řetězcích, což vede ke vzniku různých reaktivních radikálů, jako jsou primární alkylové makroradikály a vodíkové radikály. Tyto radikály po reakci s kyslíkem znamenají přechod materiálu do fáze oxidační degradace, při níž vznikají četné funkční skupiny obsahující kyslík a snižuje se molekulová hmotnost polymeru [131]. Oxidační degradace plastů obvykle probíhá při teplotách od 30 °C do 150 °C [132]. Účinnost procesu je ovlivněna typem plastu, teplotou, dobou zdržení a katalyzátory [133]. Za katalyzátory lze považovat TiO2 a ZnO, které přispívají k degradaci plastových polymerů vlivem světla [134]. Obecně tento proces vede ke vzniku menších molekul, jako jsou monomery, oligomery a polymery se sníženou molekulovou hmotností, a také různých typů skupin obsahujících kyslík, jako jsou karboxylové kyseliny, aldehydy a alkoholy. Při složitějších oxidačních procesech, zejména těch, které zahrnují fotokatalýzu, mohou konečné produkty kromě výše uvedených sloučenin zahrnovat vodu, oxid uhličitý a minerální kyseliny [135].

### 2.1.14. Hydrotermální zkapalňování

Hydrotermální zkapalňování je proces, který se objevil při valorizaci biomasy a lze jej použít i na plastový odpad za účelem energetického využití a získání chemických produktů [136]. Hydrotermální zkapalňování obvykle probíhá při teplotách od 250 °C do 374 °C. Optimální rychlosti konverze se často dosahuje mezi 300 °C a 350 °C při udržování vysokého tlaku mezi 10 a 25 MPa [137]. Výstupními produkty tohoto procesu jsou surový bioolej, biochar a plyny [138]. Vzhledem k požadavku na vysoké teploty je tento proces poměrně energeticky náročný [139]. Nevýhodou této metody je, že kontrola vedlejších produktů, zejména z vodné fáze, obvykle vyžaduje další stupně zpracování [140]. Účinnost hydrotermálního zkapalňování plastů je ovlivněna teplotou, tlakem, poměrem vody a plastu, dobou zdržení a samozřejmě různými typy katalyzátorů [141], [142].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.15. Biologická depolymerizace

Biologická depolymerizace plastů je proces, který využívá především enzymy k rozkladu plastů na jejich monomerní formy za mírných podmínek [143], [144]. Tato metoda je účinná zejména u plastů, jako je PET [145]. Enzymy, jako je PETasa a její varianty, mohou katalyzovat hydrolýzu PET, účinně štěpit esterové vazby a přeměnit plast zpět na původní monomery, jako je ethylenglykol a kyselina tereftalová [146]. Biologická depolymerizace obvykle probíhá při mírných teplotách, 28-50 °C [147]. Mezi hlavní přísady patří specifické enzymy a někdy mírné chemické látky pro předběžnou úpravu, aby se zvýšila citlivost substrátu k enzymatickému působení [148]. Typickými výstupními produkty jsou monomery, jako je ethylenglykol a kyselina tereftalová z PET [149]. Mezi hlavní výhody patří nižší energetické nároky, zatímco nevýhodou je nižší míra depolymerizace a potenciální neúčinnost při rozkladu odolnějších polymerů bez důkladné předúpravy [150]. Za zmínku také stojí, že biologická depolymerizace je příbuznou metodou enzymatické degradace. Obě metody zahrnují použití biologických systémů k usnadnění rozkladu materiálů. Dalo by se říci, že se tyto dvě metody vzájemně doplňují: enzymy mohou urychlit rozklad, zatímco biologické systémy poskytují prostředí a další mechanismy pro proces rozkladu [151]. Z technického hlediska spočívá rozdíl mezi biologickou depolymerizací a enzymatickým rozkladem v mechanismech a podmínkách, za nichž probíhají. Konkrétně enzymatická degradace zahrnuje použití specifických enzymů, které katalyzací určitých chemických reakcí rozkládají polymery na monomery nebo oligomery. Naproti tomu biologická depolymerizace zahrnuje chemické nebo mikrobiologické děje, včetně enzymatické degradace [152], [153]. Enzymatická degradace je ve srovnání s biologickou depolymerizací specifičtější a řízenější proces, ale ta má širší rozsah podmínek, za nichž může probíhat. Zanedbávat některou z těchto metod by nebylo moudré, protože každá z nich je rozhodující pro účinnou recyklaci polymerů za různých podmínek a poskytuje komplexní přístup.

### 2.1.16. Elektrochemická recyklace

Jádrem tohoto procesu jsou elektrochemické reakce, při nichž se polymery rozkládají na menší molekuly nebo dokonce monomery. Tento proces začíná čištěním a drcením plastu, který je poté umístěn do elektrochemické komory obsahující vhodné rozpouštědlo a elektrolyt. Poté se přiloží napětí a plast na elektrodách podléhá oxidačním nebo redukčním reakcím [154]. Účinnost tohoto procesu závisí na materiálu a konstrukci elektrody, typu elektrolytu, parametrech napětí a proudu, teplotě, tlaku a samozřejmě na předběžné úpravě plastového odpadu [155]. Charakteristické pro tento

proces jsou teploty v rozmezí 350 °C až 500 °C [156]. Výstupem elektrochemické recyklace plastů jsou cenné chemické látky, jako je tereftalát a mravenčan, získané z PET [157].

## 2.2. Porovnání technologií

Chemická recyklace plastů představuje inovativní způsob, jak zvládnout stále rostoucí množství plastového odpadu. Mezi nejběžnější metody patří pyrolýza, depolymerizace, zplyňování a solvolýza. Každá z těchto technologií má své silné stránky, ale i slabiny. Abychom mohli určit, která technologie je nejvhodnější pro konkrétní aplikace, je nutné je porovnat podle několika klíčových kritérií.

### 2.2.1. Výstupní produkty

Na rozdíl od mechanické recyklace, která často vede ke ztrátě kvality materiálu, chemická recyklace rozkládá plasty na základní chemické složky. Výstupní produkty těchto procesů se mohou lišit v závislosti na zvolené technologii, ale obecně lze výsledné látky rozdělit do několika hlavních kategorií.

Tabulka 1. Výstupní produkty procesů chemické recyklace plastů

| **Způsob recyklace** | **Pevný (s)** | **Kapalina (l)** | **Plynný (g)** | **Použití** |
|---|---|---|---|---|
| **Hydrolýza** | Pet vločky (zbytky kyseliny tereftalové, pevné nečistoty) | Kyselina tereftalová, ethylen a diethylenglykol | N/a (někdy oxid uhličitý, metan) | S - zpětně získaný a znovu použitý při výrobě nového domácího mazlíčka.<br><br>L - používá se jako surovina pro syntézu nových |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | polymerů, jako nemrznoucí směs atd.<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Glykolýza** | Zbytky pevných nečistot (polyuretany), nezreagované fragmenty domácích zvířat | Bhet (bis(2-hydroxyethyl)tereftalát) monomer a přebytečný glykol | N/a | S - plniva nebo zpevňující látky pro použití v nových výrobcích z pufru.<br><br>L - používá se při syntéze nových materiálů pro domácí zvířata. |
| **Enzymatická degradace** | Oligomerní polymerní fragmenty | Kyselina tereftalová, ethylenglykol a organické kyseliny | Může obsahovat oxid uhličitý a v některých případech metan a h2o, | Monomery a oligomery mohou být repolymerizovány nebo využity při syntéze nových materiálů, alkoholy a organické kyseliny mohou sloužit jako |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | prekurzory v chemickém průmyslu a plynné vedlejší produkty přispívají ke koloběhu uhlíku, ať už jsou přirozeně zachyceny nebo uvolněny do atmosféry. |
| **Kyselá hydrolýza** | Uhlíkové uhlíky bohaté na uhlík | Kyselina tereftalová, menší oligomery také oleje nebo vosky | Zahrnují vodík, metan, oxid uhličitý a jiné lehké uhlovodíky. | S - používá se například jako plnivo do stavebních materiálů nebo jako prekurzor pro výrobu aktivního uhlí.<br><br>L - opětovné použití při výrobě nových plastových materiálů. Oleje nebo vosky rafinované na syntetická |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | maziva nebo používané jako palivo.<br><br>G - používá se jako zdroj energie. |
| **Depolymerizace v nadkritické kapalině** | Nezreagovaný pet, pevné uhlíkové zbytky (dřevěné uhlí) | Ropa (uhlovodíky podobné naftě) | Vodík, metan a oxid uhličitý, ethylen, rropylen | S - výplňový materiál v konstrukci.<br><br>L - používá se jako směsný benzin, surovina pro chemickou výrobu nebo pro přímé použití jako palivo.<br><br>G - používá se jako zdroj energie. |
| **Alkalická hydrolýza** | Nezreagovaný polymer | etylenglykol, kyselina tereftalová, aprolaktam | Čpavek, oxid uhličitý | S - zpětně získaný a znovu použitý při výrobě nového domácího mazlíčka.<br><br>L - používá se |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | jako surovina pro syntézu nových polymerů, jako nemrznoucí směs atd.<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Katalytická pyrolýza** | Char | Kapalné uhlovodíky (alkany, alkeny, alkeny řady $C_5$ -$C_{20}$ ) | Metan, etylen, vodík | S - používá se při výrobě energie nebo jako prekurzor aktivního uhlí<br><br>L - používá se jako kapalné palivo pro vznětové motory nebo se dále rafinuje na vysoce hodnotné chemikálie.<br><br>G - používá se pro energii a syntézu. |
| **Rychlá pyrolýza** | Dřevěný uhlík (pevný uhlík, | Pyrolýzní olej (směs alkanů, alkenů, aromatických | Synplyn ($H_2$ , CO, $CO_2$ , CH | S - lze dále zpracovat na |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | především saze) | uhlovodíků) | )$_4$ | aktivní uhlí<br><br>L - rafinovaný na palivo<br><br>G - používá se pro výrobu energie nebo chemickou syntézu. |
| **Mikrovlnná pyrolýza** | Uhlíky (saze, zbytky oxidu křemičitého, pokud jsou přítomny) | Ropa (uhlovodíky $C_5$ - $C_{12}$ ), vosk (uhlovodíky podobné parafínu) | Syngas | S - jako stavební materiál nebo jako prekurzor pro uhlíkové nanotrubičky.<br><br>L - lze použít přímo jako palivo nebo dále rafinovat na chemikálie s vyšší hodnotou.<br><br>G - používá se k výrobě energie. |
| **Pyrolýza ve fluidní vrstvě** | Biochar (uhlíkatý materiál, potenciální stopové kovy) | Pyrolýzní olej ($C_5$ -$C_{20}$ uhlovodíky, dehet) | Syngas | S - používá se jako doplněk půdy nebo palivo<br><br>L - používá se |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | jako chemická surovina nebo k rafinaci na paliva, jako je nafta.<br><br>G - používá se jako energetická nebo chemická surovina. |
| **Plazmové zplyňování** | Vitrifikovaná struska (křemičitany, hlinitokřemičitany, oxidy kovů) | N/a | Synplyn ($h_2$ , CO, $CO_2$ , CH $)_4$ | S - používá se pro stavební materiály<br><br>L -<br><br>G - používá se pro výrobu energie nebo chemickou výrobu |
| **Parní zplynování** | Zbytkový uhlík (pevná látka bohatá na uhlík) | N/a | Syngas | S - používá se jako materiál pro výrobu aktivního uhlí, jako půdní doplněk (biochar) nebo v některých případech dokonce jako |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | tuhé palivo.<br><br>L -<br><br>G - používá se pro chemickou syntézu, výrobu energie nebo jako průmyslové palivo. |
| **Oxidační rozklad** | Částečně oxidované fragmenty polymerů a materiály bohaté na uhlík | Karboxylové kyseliny (např. kyselina octová), laktony, alkoholy, ketony a aldehydy. | Oxid uhličitý, oxid uhelnatý, amoniak a kyanovodík (hcn). | S - výplňový materiál v konstrukci.<br><br>L - mají potenciální využití jako suroviny v chemickém průmyslu<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Hydrotermální zkapalňování** | Biochar (uhlík, minerální zbytky) | Surový bioolej (mastné kyseliny, fenoly, uhlovodíky) | $CO_2$ , lehké uhlovodíky $(C\text{-}C)_{14}$ | S - používá se ke zlepšení půdy<br><br>L - používá se k výrobě paliva<br><br>G - používá se k rekuperaci |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | energie. |
| **Biologická depolymerizace** | Zbytky biomasy (organický materiál, nezreagované polymery) | Kyselina tereftalová, ethylenglykol | Oxid uhličitý, metan | S - používá se jako půdní kondicionér nebo kompost, přispívá k úrodnosti půdy<br><br>L - mohou být dále zpracovány na biopaliva nebo použity při výrobě biochemických látek, jako jsou rozpouštědla nebo prekurzory pro biologicky rozložitelné polymery.<br><br>G - používá se jako zdroj obnovitelné energie. |
| **Elektrochemická recyklace** | Materiály bohaté na uhlík | Zahrnují řadu uhlovodíků, alkoholů, kyselin a esterů. | Vodík, metan, oxid uhelnatý a | S - výroba aktivního uhlí nebo jako plniva do stavebních |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | oxid uhličitý, kyslík z elektrolýzy. | materiálů<br><br>L - lze rafinovat na paliva, jako je nafta nebo benzin<br><br>G - lze použít v různých průmyslových procesech nebo jako čisté palivo. |

### 2.2.2. Sladění typu plastu s technologií

Různé druhy plastů mají odlišné chemické složení a fyzikální vlastnosti, což ovlivňuje jejich vhodnost pro konkrétní technologie chemické recyklace. Zatímco některé plasty, jako je PET nebo polystyren, lze efektivně recyklovat depolymerizací či solvolýzou, jiné polymery, například polyolefiny (PE, PP), se lépe zpracovávají pomocí pyrolýzy nebo zplyňování.

Tabulka 2. Komplexní přehled zkoumaných technologií recyklace plastů

| **Technologie** | **Plastový typ** | **Výhody** | **Nevýhody** | **Společnost** | **Výhled do budoucnosti** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Hydrolýza** | PET, PLA, nylon, PC | Vysoká čistota výstupu, recyklace chemikálií | Energeticky náročné | Ioniqa Technologies, Eastman Chemical Company | Optimalizace teploty a katalyzátorů pro úsporu energie |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Glykolýza** | PET, PBT, PLA, PC | Obnovení monomerů, nižší energie než při hydrolýze | Problémy s obnovou katalyzátoru | Loop Industries, Indorama Ventures | Vývoj pokročilých katalytických systémů pro zvýšení účinnosti |
| **Enzymatická degradace** | PLA, PET, PBT | Šetrné k životnímu prostředí, nízké teploty | Pomalé reakční rychlosti, škálovatelnost | Carbios, Novozymes | Inženýrské enzymy pro rychlejší a univerzálnější rozklad plastů |
| **Kyselá hydrolýza** | PET, PLA, nylon, PC | Manipulace s kontaminovanými plasty | Žíravý, nebezpečný odpad | BASF, DuPont | Vylepšené systémy pro zpětné získávání kyselin pro bezpečnější zpracování |
| **Depolymerizace v nadkritické kapalině** | PET, PU, PS, PC, PLA | Vysoké reakční rychlosti, výtěžnost rozpouštědel | Vysoký příkon energie | Repsol, ExxonMobil | Optimalizace spotřeby energie prostřednictvím alternativních technologií vytápění |
| **Alkalická** | PET, | Vysoké výtěžky | Žíravý, | Gr3n | Vývoj |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.
www.tacr.cz www.mzp.cz

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **hydrolýza** | nylon, PUR, PLA | monomerů, jednoduchá chemie | vyžaduje neutralizaci | Recycling, Coca-Cola Company | bezpečnějších a škálovatelnějších alkalických systémů |
| **Katalytická pyrolýza** | PE, PP, PET, PS | Přeměna plastů na palivo, nižší energetická náročnost | Deaktivace katalyzátoru, emise | Agilyx, Pyrowave | Vývoj katalyzátorů s dlouhou životností pro kontinuální zpracování |
| **Rychlá pyrolýza** | PE, PP, PET, PS, PVC, MPW (směsný plastový odpad) | Rychlá přeměna plastového odpadu na použitelný olej | Komplexní směs produktů | BASF, Brightmark | Vylepšené systémy pro lepší kontrolu složení výrobků |
| **Mikrovlnná pyrolýza** | PE, PP, PS, PVC, PET, PA, ABS, | Účinný ohřev, rychlé reakce | Vysoké kapitálové náklady, problémy s rozšiřováním | Pyrowave, GreenMantra Technologies | Lepší škálovatelnost mikrovlnných reaktorů |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | MPW | | | | |
| **Pyrolýza ve fluidním loži** | PE, PP, PS, PET, PVC, MPW | Vysoký přenos tepla, velká kapacita zpracování | Složitý provoz, obtížná optimalizace | Skupina recyklačních technologií, BASF | Zdokonalení konstrukce reaktorů pro velkokapacitní provoz |
| **Plazmové zplyňování** | PET, PE, PP, PS, PVC, MPW | Lze zpracovávat širokou škálu typů plastů | Vysoká spotřeba energie, nákladná infrastruktura | Alter NRG, Hitachi Zosen Inova | Snížení poptávky po energii a nákladů na infrastrukturu |
| **Parní zplyňování** | PP, PE, PS, PET, PVC, MPW | Vyrábí vysoce kvalitní syntézu ze směsného plastového odpadu | Vysoké investiční a provozní náklady | Anellotech, Linde | Zkoumání aplikací synplynu pro průmyslové využití |
| **Oxidační degradace** | PE, PP, PS, PVC, PET | Zmenšuje velikost plastu pro další zpracování | Omezená hodnota vedlejších produktů, ztráta materiálu | BP, Shell, ExxonMobil | Kombinované přístupy s jinými recyklačními technologiemi |
| **Hydrotermální zkapalňování** | PE, PP, PS, PVC, | Přeměna plastů na kapalná paliva | Vyžaduje se vysoká teplota a tlak | Resynergi, Waste2Energy | Výzkum nižších energetických nároků |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | PET | | | | hydrotermálních procesů |
| **Biologická depolymerizace** | PET, PA, PU, PLA, Nylon | Udržitelné, nízkoenergetické procesy, biologicky odbouratelné enzymy | Dlouhá reakční doba, škálovatelnost | Carbios, Novozymes, LanzaTech | Genetická modifikace enzymů pro rozklad smíšených plastů |
| **Elektrochemická recyklace** | PET, PE, PP, PS | Žádné externí vytápění, nízký potenciál spotřeby energie | vyžaduje vývoj účinných elektrodových materiálů | IBM Research, University of Manchester | Vývoj nových elektrodových materiálů pro zvýšení účinnosti |

## 3. Environmentální a ekonomické důsledky

Cílem zavedení chemické recyklace v plném rozsahu je vyřešit problém hromadění plastového odpadu a zároveň získat cenné materiály. Jednou z nejvíce inzerovaných výhod chemického zpracování je jeho potenciál snížit závislost na fosilních palivech. Přínosy chemického zpracování pro životní prostředí však nejsou bez významných výhrad. Otázka posouzení životního cyklu procesu chemické recyklace zůstává v této situaci otevřená. Výhody plynoucí z chemického zpracování plastů jsou zřejmé, ale v současné době neexistuje dostatečně komplexní výzkum, který by plně posoudil dopad těchto technologií na životní prostředí a lidský organismus [158]. Vzhledem k tomu, že technologie chemické recyklace nejsou v praxi široce uplatňovány, mají stávající modely a jejich výpočty značné rozdíly [159]. Procesy LCA pro chemickou recyklaci jsou rozvíjející se oblastí. [160]. Problém spočívá v různorodosti metod LCA a v nutnosti, aby výzkumníci stanovili parametry specifické pro daný projekt, což znamená, že výsledky jedné LCA jsou jen zřídka srovnatelné s ostatními [161].

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Přestože mechanická recyklace má lepší environmentální profil než chemická recyklace, chemicky recyklovaná vlákna lze ve srovnání s mechanicky recyklovanými vlákny použít v širší škále aplikací [162]. Analýza životního cyklu tří scénářů zpracování plastových odpadů (mechanické zpracování, zdokonalené mechanické zpracování a zpracování surovin pyrolýzou) ukázala, že zpracování zaměřené na kvalitu je lepší jak z hlediska životního prostředí, tak z finančního hlediska [163]. V současné době je vhodné zaměřit se na výzkum metod chemického zpracování plastů, spíše než pokračovat v jejich porovnávání s mechanickými metodami. [164]. Pro provádění LCA je nutné mít k dispozici rozsáhlý soubor údajů, aby bylo možné zajistit spolehlivé výsledky výzkumu [165].

## 3.1.Metodika LCA

Pro získání komplexního pochopení celkového dopadu zkoumaných procesů je vhodné provést výzkum pomocí metody LCA, která nabízí holistický přístup ke stanovení dopadů na životní prostředí. LCA je uznávána jako nejlepší nástroj pro posuzování dopadů životního cyklu výrobků nebo procesů [166], [167]. LCA umožňuje identifikovat energeticky nejnáročnější a na zdroje nejnáročnější fáze, které mají největší dopad na životní prostředí, zejména při třídění, čištění a zpracování polymerů. Analýzou těchto fází je možné identifikovat "horká místa", kde může dojít k významné optimalizaci, například zavedením pokročilých třídicích technologií, které snižují znečištění a ztráty materiálu. LCA rovněž umožňuje vyhodnotit energetickou účinnost různých metod recyklace, jako je mechanická nebo chemická recyklace, což pomáhá zvolit optimální strategie na základě konkrétních typů plastů. Výhoda využití metody LCA pro analýzu systému nakládání s odpady spočívá v její schopnosti poskytnout komplexní pohled na příslušné procesy a dopady, a to i s ohledem na jejich propojení s dalšími odvětvími [168]. Jednou z klíčových výhod této metody je její schopnost poskytovat užitečné informace ve fázi návrhu, protože umožňuje identifikovat alternativy plánování [169]. Z ekonomického hlediska pomáhá LCA snižovat náklady optimalizací procesů a zlepšováním kvality druhotných surovin, což potenciálně zvyšuje ziskovost recyklace plastů. Jedním z klíčových řešení je přijetí koncepcí "ekodesignu", které se zaměřují na vývoj materiálů, jež se snadněji recyklují, čímž se snižují náklady na zpracování a zvyšuje se hodnota konečného výrobku. Stávající studie LCA o metodách chemické recyklace plastů mají bohužel mezery ve výzkumu příslušných druhů odpadů a samotných metod [170], [171]. Nejrozsáhleji analyzovanými metodami chemické

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

recyklace pomocí LCA jsou pyrolýza a zplyňování [172], [158], [173], [174]. Podle studie LCA [175] lze dopad pyrolýzy na životní prostředí snížit využitím energie z obnovitelných zdrojů. Výzkum [176], naznačuje, že experimenty s pyrolýzou by se měly zaměřit na zlepšení účinnosti přeměny uhlíku a využití obnovitelných zdrojů energie ve spojení s přístupy chemické recyklace, protože významné emise během tohoto procesu souvisejí především se spotřebou energie [175], [177], [178]. Přesto je technologie pyrolýzy plastů stále nedostatečně prozkoumána a pro úplný přechod od srovnávací perspektivy k holističtějšímu přístupu - kdy je pyrolýza plastů považována za nedílnou součást udržitelného systému nakládání s odpady - je potřeba specializovaná databáze LCI [179]. Posouzení životního cyklu procesu zplyňování [180] prokazuje jasné výhody zplyňování oproti konvenční technologii spalování. LCA zplyňování plastů odhalilo, že hlavním problémem je elektrická energie potřebná k rozkladu plastového odpadu v reaktoru [158]. Na druhé straně autoři [181] ve své studii životního cyklu metanolu a vodíku vyrobených zplyňováním komunálního plastového odpadu zjistili, že emise skleníkových plynů z cest zplyňování MPW se podle odhadů zvýší o 166 %, resp. 36 %. Výsledky LCA [182] ukazují, že vodík získaný ze směsného plastového odpadu má ve srovnání s plastem z jednoho proudu nižší dopad na životní prostředí. Kromě toho při porovnání životního cyklu zplyňování a skládkování tuhého komunálního odpadu autoři [183] zdůrazňují, že zplyňování má výrazně nižší dopad na lidské zdraví, včetně rizika rakoviny a nenádorových onemocnění. Pokud jde o studie LCA procesů hydrolýzy a glykolýzy, většina výzkumníků se shoduje na tom, že dostupnost a kvalita údajů je nízká [160]. Autoři [184] ve své studii LCA procesu hydrolýzy PET dospěli k závěru, že klíč ke snížení emisí uhlíku spočívá v udržení nízké spotřeby energie zvýšením poměru pevné látky ke kapalině a zamezením nadměrného přidávání vody při čištění monomeru. Pokud jde o výsledky LCA dvou procesů glykolýzy PET, bylo zjištěno, že glykolýza s použitím ethylenglykolu má vyšší potenciál globálního oteplování než glykolýza s použitím propylenglykolu [185]. Pro procesy, jako je biologická depolymerizace a enzymatická degradace, je k dispozici podstatně méně studií LCA. Autoři např. [186] při porovnávání životního cyklu enzymatické recyklace plastů se spalováním dospěli k závěru, že enzymatická recyklace by mohla představovat cennou alternativu ke spalování jak z energetického, tak z environmentálního hlediska, zejména pokud následné možnosti využití pevných a kapalných frakcí zahrnují spoluspalování a anaerobní digesci pro výrobu bioplynu.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Jiná studie LCA ukazuje, že v procesu depolymerizace jsou klíčovými nákladovými faktory stupeň rozkladu PET, zatížení pevnou látkou, náklady na enzymy a zatížení enzymy [187]. Za zmínku rovněž stojí, že výzkum biologicky rozložitelných plastů hraje významnou roli ve vývoji biologické depolymerizace a enzymatické degradace [188], [189], [190], [191]. V případě elektrochemické recyklace plastů je k dispozici méně studií LCA, přičemž stávající výzkumy se tomuto tématu věnují pouze částečně [192], [193]. Vzhledem k tomu, že elektrochemická recyklace pokovených plastů prokázala významné zlepšení životního prostředí díky elektrochemickému procesu [194], mají studie LCA této technologie potenciál pro budoucí implementaci [195]. Posouzení životního cyklu technologie superkritické fluidní depolymerizace bylo publikováno v několika studiích, které obecně naznačují větší dopad na životní prostředí ve srovnání s procesy spalování a skládkování (pokud se neuvažují recyklované produkty) [196]. Energetickou náročnost by bylo možné snížit energetickou optimalizací, které by bylo dosaženo využitím odpadního tepla vznikajícího při chemickém rozkladu plastového odpadu [197]. Hydrotermální zkapalňování plastů nebylo z hlediska LCA rozsáhle studováno, přičemž nejpodrobnější popisy lze nalézt v publikaci [198] a [199]. Pokud jde o oxidační degradaci, nejsou k dispozici žádné komplexní studie LCA, pouze dílčí úvahy na toto téma [200], [201], [202]. Z výše uvedeného vyplývá, že většina procesů chemické recyklace plastů vyžaduje další výzkum z hlediska hodnocení životního cyklu. Studie LCA chemických recyklačních procesů by měly zahrnovat soubor faktorů a předpokladů založených na sociálních, ekonomických a technologických prognózách [160]. Pravděpodobný scénář vývoje recyklace plastů zahrnuje kombinaci několika metod, které se vzájemně doplňují a v konečném důsledku přinášejí nejefektivnější výsledek. To dokládá studie [327] která ukazuje, že analýza posouzení životního cyklu (LCA) scénáře "Míra recyklace 10,64 % odeslaná do MR (mechanická recyklace) plus potenciální 2 x P (pyrolýza); zbytek odeslaný do WTE (Waste-to-Energy)" má nejmenší dopad na životní prostředí.

## 3.2. Energetické zatížení

Chemické zpracování často vyžaduje značné množství tepla a elektrické energie. Přínosy pro životní prostředí do značné míry závisí na zdroji energie. Pokud se používá energie z fosilních paliv, mohou celkové emise uhlíku převážit nad přínosem snížení množství plastového odpadu pro životní prostředí.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Z výše uvedených studovaných metod je plazmové zplyňování považováno za energeticky nejnáročnější. Důvodem je použití plazmového hořáku k vytvoření vysokoteplotního plazmového oblouku, který za přítomnosti páry zplyňuje surovinu. Tento proces je vysoce energeticky náročný, spotřeba se pohybuje v rozmezí 11,0-30,3 MJ/kg, protože je třeba vytvářet plazmu při teplotách vyšších než 3 000 °C [254], [255], [256]. Hlavní spotřeba energie při zplyňování je určena na ohřev reaktorů na vysoké teploty. Vysoké teploty podporují výrobu čistšího syntézního plynu s menším množstvím znečišťujících látek [257]. Pokud jde o zplyňování parou, není tato metoda o nic méně energeticky náročná, protože rovněž vyžaduje vysoké teploty (600 °C - 1200 °C). V tomto případě se však hlavní část energie spotřebuje na ohřev vody k výrobě páry - přibližně 12 - 20 MJ/kg [258], [259], [260]. Technologie pyrolýzy, která je založena na procesech termického rozkladu (500-800 °C), vyžaduje sama o sobě značné množství energie k dosažení potřebných teplot [261], [262], [263]. Pyrolýza plastů vyžaduje v průměru 4 - 10 MJ/kg energie [264], [265]. Depolymerizační procesy (obr. 1), ačkoli vyžadují nižší teploty (180-374 °C), jsou stále poměrně energeticky náročné, protože některé z nich vyžadují udržování tlaku kolem 22,1 MPa [266], [267], [268]. Průměrná spotřeba energie při depolymerizačních procesech se pohybuje od 2,8 do 9 MJ/kg [269], [270]. Oxidační rozklad vyžaduje ve srovnání s výše popsanými procesy výrazně nižší teploty a je energeticky méně náročný (2-7 MJ/kg). Na druhou stranu je však tento proces vysoce závislý na pomocných faktorech, jako jsou katalyzátory [271], [272]. Pro depolymeraci plastů metodou hydrotermálního zkapalňování je nutné vytvořit podmínky nadkritické vody (> 374 °C; > 23 MPa). Díky těmto požadavkům je postup poměrně energeticky náročný, spotřebuje se přibližně 12 až 22 MJ/kg [273]. U procesu biologické degradace připadá většina spotřeby energie na kultivaci mikrobů, produkci enzymů a provoz samotného bioreaktoru (energie na míchání, regulaci teploty a monitorování systému), a to v rozmezí 1 až 3 MJ/kg [274], [275]. Spotřeba energie během procesu elektrochemické recyklace plastů přímo závisí na konstrukci elektrochemického článku (materiály elektrod, membrána, složení elektrolytu) a také na požadavcích na napětí a proud. Tato spotřeba se obvykle pohybuje mezi 5-12 MJ/kg [161], [196], [276]. Z energetického hlediska jsou vyhlídky chemické recyklace nejednoznačné. Na jedné straně existuje potenciál pro výrazné snížení objemu plastového odpadu a vytvoření více oběhového hospodářství. Na druhou stranu ji současná vysoká energetická náročnost činí méně atraktivní. Dokud nebude k dispozici dostatečné množství energie z obnovitelných zdrojů, budou výše uvedené procesy balancovat mezi snižováním dopadu na životní prostředí prostřednictvím snižování množství plastového odpadu a emisí spojených s energií. Některé metody chemického zpracování navíc vytvářejí nebezpečné vedlejší produkty nebo vyžadují použití škodlivých chemikálií, což představuje riziko pro životní prostředí i lidské zdraví, pokud není řádně řízeno. Pro metody chemické recyklace,

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

jako je glykolýza, katalytická pyrolýza, pyrolýza ve fluidním loži, hydrotermální zkapalňování a elektrochemické zpracování, je neodmyslitelnou součástí používání různých typů katalyzátorů, které zvyšují účinnost reakcí, snižují energetické nároky a zlepšují kvalitu konečných produktů [277], [278], [279], [280]. Použití katalyzátorů však přináší i další otázky týkající se výroby, regenerace a likvidace katalytických materiálů [281]. Kromě toho manipulace s katalyzátory vyžaduje další činnosti, které často vytvářejí další emise do životního prostředí [282], [283], [284], [285]. V případě elektrochemické recyklace plastů se zvyšuje zátěž životního prostředí v důsledku manipulace s elektrodovými materiály a odpadem. Kromě toho vznikají další emise při použití technologie enzymatické degradace, zejména v důsledku průmyslové výroby a čištění enzymů a udržování optimálních podmínek pro aktivitu enzymů [286]. V případě kyselé hydrolýzy vznikají dodatečné emise v důsledku výroby a manipulace se silnými kyselinami, energie potřebné pro reakci a zpracování kyselého odpadu. Při biologické depolymerizaci vznikají dodatečné emise z kultivace, údržby a případné genetické modifikace mikroorganismů, jakož i z likvidace biologického odpadu. [287]. Výzkumníci z [288] prokázali, že mechanické zpracování překonává enzymatickou hydrolýzu, glykolýzu a methanolýzu PET vloček, stejně jako výrobu primárního plastu z hlediska ekonomického a environmentálního. Vykazovala však nižší kvalitu materiálu a další technické ukazatele. Přitom mezi metodami chemické recyklace PET poskytovala glykolýza nejlepší ekonomické a environmentální výsledky. Podobné výsledky ukázala i studie [289], kde analýza LCA (hodnocení životního cyklu) využití PLA (kyseliny polymléčné) ukázala, že nejmenší dopad na životní prostředí má mechanické zpracování, následované chemickou recyklací a kompostováním. Studie [290] ukazuje, že všechny způsoby chemické recyklace mohou snížit dopad globálního oteplování a vyčerpávání fosilních zdrojů, pokud se využijí vytříděné plastové obaly, které by jinak byly zpracovány v zařízeních na energetické využití komunálního odpadu.

## 3.3. Ekonomické zatížení

Vytvoření rovnováhy mezi environmentálními a ekonomickými hledisky má zásadní význam pro dosažení širokého rozšíření této revoluční technologie. Ekonomická životaschopnost a škálovatelnost představují výzvu pro široké zavedení chemické recyklace. V současné době tyto procesy vyžadují vyšší finanční investice ve srovnání s tradičními metodami recyklace, což je činí méně ekonomicky atraktivními. Tato ekonomická výzva ovlivňuje škálovatelnost recyklace chemických látek a následně i potenciální přínosy pro životní prostředí. Výsledky studie [328] jsou příkladem významných ekonomických výzev při recyklaci plastů

prostřednictvím pyrolýzy a zplyňování, přičemž druhá cesta je obzvláště složitá. Studie [329] ukazuje, že koncepce recyklace bioplastů může hrát zásadní roli při přechodu na více biologicky založené a oběhové odvětví plastů. Důležitou roli v této situaci hrají také vysoké náklady na katalyzátory, které přímo ovlivňují účinnost recyklačního procesu a kvalitu konečných produktů [330]. Značné počáteční investice potřebné pro rozsáhlé uplatnění chemické recyklace mohou být pro investory vážnou výzvou. Studie však [331] naznačuje, že za určitých aspektů může takový přístup výrazně zvýšit hospodářskou konkurenceschopnost. Cenová konkurenceschopnost chemicky zpracovaných plastů je ovlivněna cenami primárních plastů, které se získávají z ropných produktů, na světovém trhu. Výkyvy cen ropy mohou ovlivnit ekonomickou životaschopnost chemické recyklace plastů, protože nižší ceny ropy mohou zlevnit primární plasty, a tím snížit poptávku po recyklovaných materiálech. Výsledky dynamiky trhu ukazují, že spotřeba zemního plynu v procesu chemické recyklace odpadního HDPE zvyšuje tržní cenu a nabídku zemního plynu o 0,1 %, zatímco výroba propylenu na místě snižuje tržní cenu propylenu o 5,46 %, snižuje nabídku propylenu o 8,8 % a zvyšuje poptávku po propylenu o 10,2 % [332]. Studie [333] ukazuje, že mazací oleje získané pyrolýzou a hydrogenolýzou mají kladnou návratnost investic, zatímco zplyňování, hydrokrakování a HTL (hydrotermální zkapalňování) mají náklady vyšší než zisk. Je tedy zřejmé, že v současné době neexistuje dokonalý proces chemické recyklace plastů, který by bylo možné bezproblémově aplikovat v praxi. Z výše popsaných metod vyplývá, že problematickými oblastmi jsou buď značná spotřeba energie, vysoké náklady, nebo zvýšené emise do životního prostředí.

# 4. Použití v praxi

Poptávka po recyklovaných plastech roste díky informovanosti spotřebitelů a zvýšenému tlaku regulačních orgánů na výrobce, aby používali materiály šetrné k životnímu prostředí. Vládní politika hraje zásadní roli v ekonomické životaschopnosti chemického zpracování. Dotace, daňové pobídky a granty mohou kompenzovat některé počáteční náklady a učinit tuto činnost ziskovější. Názory moderních vědců a ekologů na chemické zpracování se liší. Zastánci, jako jsou autoři [334], tvrdí, že pokrok v konstrukci katalyzátorů a reaktorů může výrazně zvýšit účinnost chemického zpracování, čímž se stane robustnějším a ekonomicky životaschopnějším. Zlepšením účinnosti a selektivity katalyzátorů je možné maximalizovat výtěžek požadovaných produktů a zároveň minimalizovat

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

vedlejší produkty a odpad [335]. Jiní se domnívají, že samotná recyklace není řešením; jedinou cestou vpřed je zcela přehodnotit způsob výroby, přepravy, spotřeby a likvidace výrobků; to znamená, že potřebujeme kompletní přepracování a okamžité zaměření na opakovaně použitelné výrobky a systémy s uzavřenou smyčkou [336], [337]. Ti tvrdí, že stávající problémy lze řešit omezením výroby a používání plastů, zlepšením metod mechanické recyklace a podporou alternativních materiálů.

## 4.1. Příklady použití v praxi

K dnešnímu dni existuje řada organizací, které se snaží aplikovat nebo zkoumat různé metody chemické recyklace plastového odpadu ve větším měřítku. Jednou z nejznámějších organizací v Evropě je Plastic Energy, založená v roce 2011 v Londýně. Ta recykluje plasty pomocí vlastního patentovaného procesu, kdy se plast zahřívá za nepřítomnosti kyslíku za vzniku uhlovodíkových par, které se následně kondenzují na recyklovaný olej zvaný TACOIL™ (Thermal Anaerobic Conversion Oil). Podle analýzy LCA, kterou organizace pro tuto technologii provedla, je typ použité energie významný a přechod na 100% obnovitelnou elektřinu může výrazně snížit uhlíkovou stopu procesu chemické recyklace. Chemickou recyklací plastů se zabývá také organizace BASF ChemCycling. Z analýzy LCA, kterou pro společnost BASF provedla společnost Sphera a kterou posoudili tři nezávislí odborníci, vyplynulo, že pyrolýza směsného plastového odpadu vypouští o 50 % méně $CO_2$ než spalování. Studie rovněž ukázala, že emise $CO_2$ klesají při výrobě produktů na bázi pyrolýzního oleje s využitím přístupu hmotnostní bilance namísto ropy. Další organizace, Mura Technology, recykluje plasty pomocí vlastní vyvinuté technologie hydrotermálního zpracování, nazvané HydroPRS™. Tento proces zahrnuje recyklaci plastů pomocí superkritické vody (voda pod vysokým tlakem a teplotou). Studie LCA tohoto procesu ukazuje 80% snížení GWP (potenciálu globálního oteplování) v porovnání s energetickým využitím odpadu (spalováním), čímž se ušetří více než 1,8 tuny $CO_2$ ekv. GWP na tunu zpracovaného plastu. Organizace Quantafuel nabízí řešení, při kterém se plastový odpad zahřívá, rozkládá a znovu skládá na hodnotné výrobky. Hlavní výhodou jejich technologie je, že umožňuje zpracování nečistot a směsi různých barev a typů plastů. Proces je založen na pyrolýze, po níž následuje čištění pyrolýzního plynu a použití dvoustupňového katalyzátoru v plynné fázi. Plyn se poté kondenzuje a destilací se rozdělí na potřebné olejové frakce. Společnost Clariter byla založena v roce 2003 a vyvinula a zdokonalila vlastní technologii chemické recyklace. Společnost Clariter používá třístupňový proces chemické recyklace, který zahrnuje tepelné krakování, hydrorafinaci a destilaci a míchání. Tento proces dokáže zpracovat většinu typů plastů ze všech toků odpadů a vyžaduje relativně jednoduchou přípravu suroviny. V budoucnu chce společnost Clariter rozšířit svou činnost po celém

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

světě zřízením plnohodnotných recyklačních závodů v různých regionech. Společnost Covestro je známou organizací, která se zaměřuje na inovace a udržitelný rozvoj a investuje do výzkumu a vývoje s cílem rozšířit možnosti chemické recyklace. Organizace ve svých postupech aktivně využívá pyrolýzu, hydrolýzu a glykolýzu. Další organizací zabývající se udržitelnými technologiemi chemické recyklace plastů je Loop. Technologie depolymerizace společnosti Loop rozkládá dříve nerecyklovatelný plastový odpad z polyethylentereftalátu a polyesterových vláken na jejich základní stavební prvky, dimethylentereftalát a monoethylenglykol, a to za použití nízkého tepla a bez přidaného tlaku. Další významnou organizací usilující o zavedení rozsáhlé chemické recyklace je společnost ORLEN Unipetrol v České republice. Společnost ORLEN Unipetrol je významným hráčem, který se zaměřuje na několik pokročilých metod recyklace, včetně katalytické pyrolýzy a hydrotermálního zkapalňování. Jejich pyrolýzní závod v Litvínově přeměňuje směsný plastový odpad na uhlovodíky pro výrobu nových polymerů a paliv. Organizace Pryme pracuje také na optimalizaci procesu pyrolýzy. Důležitou roli při prosazování zavádění chemické recyklace a podpoře recyklovaných výrobků hrají také různá sdružení. Jednou z takových organizací je Plastics Europe, která se snaží popularizovat výhody plastů a zároveň prosazovat ekologické postupy a podporovat přechod na oběhové hospodářství. Plastics Europe spolupracuje s tvůrci politik, průmyslovými subjekty a výzkumnými institucemi na prosazování předpisů a politik, které podporují vývoj a zavádění technologií chemické recyklace. Plastics Europe podporuje vývoj a zavádění různých technologií chemické recyklace, jako je pyrolýza, zplyňování nebo depolymerizace.

## 4.2. Výzvy spojené s praktickým použitím

Prvním a jedním z nejzávažnějších problémů je vysoká energetická náročnost procesů chemické recyklace, zejména u technologií jako pyrolýza nebo zplyňování. Tyto metody vyžadují zahřívání materiálu na velmi vysoké teploty, často přesahující 400 °C. Výsledkem je značná spotřeba energie, která může být z velké části získávána z neobnovitelných zdrojů. Energetické vstupy potřebné pro tyto procesy nejenže zvyšují provozní náklady, ale zároveň zpochybňují jejich ekologickou udržitelnost, pokud nejsou integrovány s obnovitelnými zdroji energie. Dalším problémem je komplexnost složení plastového odpadu, který často obsahuje směs různých polymerů, přísad a kontaminantů. Zatímco mechanická recyklace vyžaduje pečlivé třídění plastů podle typu polymeru, chemická recyklace může být flexibilnější. Avšak i zde dochází k problémům, kdy zpracování kontaminovaných nebo smíšených plastů vede k

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

nižší kvalitě výsledných produktů. Kontaminace, jako jsou barviva, plniva nebo zbytky potravin, může narušovat chemické reakce a zvyšovat potřebu dodatečných čistících procesů, což opět zvyšuje celkové náklady. Technologická složitost procesů je další významnou překážkou. Zatímco některé technologie, například depolymerizace PET nebo polystyrenu, jsou již dobře zvládnuté a pilotně ověřené, jiné procesy, jako je solvolýza polyuretanů nebo pyrolýza polyolefinů, vyžadují další výzkum a vývoj. Při praktickém zavádění těchto technologií do průmyslového měřítka často dochází k technickým komplikacím spojeným s řízením procesů, optimalizací výtěžnosti a kvalitou výstupních produktů. Zajištění konstantní kvality výsledných surovin je přitom zásadní pro konkurenceschopnost chemické recyklace na trhu. Ekonomické výzvy hrají klíčovou roli při rozhodování o implementaci chemické recyklace. Náklady na vybudování a provoz zařízení pro chemickou recyklaci jsou výrazně vyšší než u mechanické recyklace. Navíc současné trhy s ropnými surovinami a primárními polymery jsou stále dominantní a levnější než recyklované chemické produkty. To znamená, že ekonomická návratnost investic do chemické recyklace je do značné míry závislá na podporách a pobídkách ze strany vládních institucí nebo legislativních regulací. Bez dostatečné politické a finanční podpory zůstává rozšíření chemické recyklace omezené. V neposlední řadě je zde otázka environmentální bezpečnosti. I když chemická recyklace nabízí řešení pro plasty, které jsou nerecyklovatelné mechanickými metodami, samotné procesy mohou generovat vedlejší produkty, jako jsou emise skleníkových plynů, toxické látky nebo zbytky chemických rozpouštědel. Například při zplyňování nebo pyrolýze může docházet k emisím oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého, což může mít negativní dopad na životní prostředí. Tyto vedlejší produkty vyžadují implementaci dodatečných technologií pro jejich zachytávání a bezpečnou likvidaci, což dále zvyšuje náklady. Výzkum se také zaměřuje na efektivitu a selektivitu chemických procesů, protože mnohé současné technologie nejsou dostatečně optimalizované. Například při pyrolýze polyolefinů může být výtěžnost kvalitního pyrolytického oleje proměnlivá v závislosti na vstupním materiálu a přesnosti řízení procesních parametrů. K dosažení stabilních výsledků je proto nezbytné investovat do vývoje katalyzátorů, které umožní zlepšení efektivity a snížení teplot potřebných pro reakci. Chemické metody recyklace plastů mají sice značný potenciál při řešení znečištění plasty, ale čelí řadě zásadních problémů, které lze překonat komplexními opatřeními na úrovni výzkumu, politiky a infrastruktury. Pro snížení

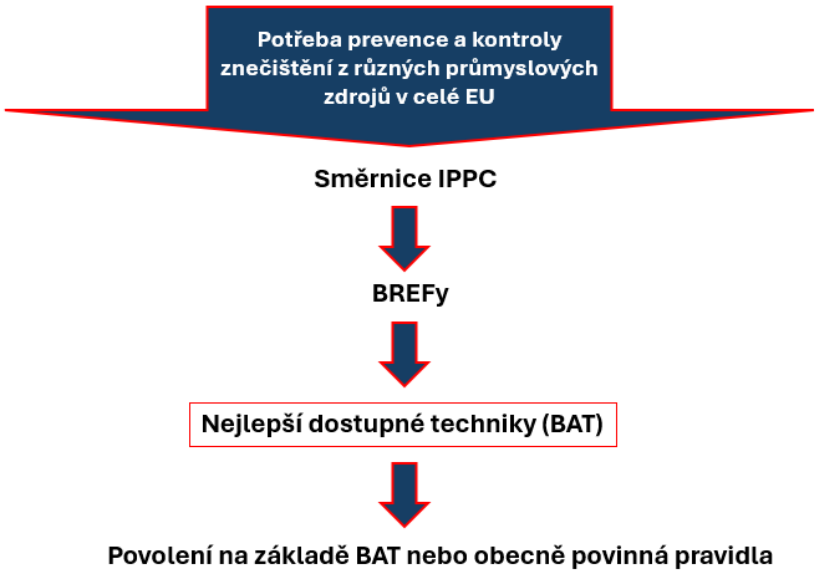
T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

spotřeby energie a nákladů na chemickou recyklaci je nezbytné investovat do výzkumu a vývoje nových, energeticky účinnějších technologií. Jednou z klíčových oblastí jsou investice do výzkumu zaměřeného na zdokonalení katalyzátorů a procesů, které sníží spotřebu energie a zvýší účinnost recyklace komplexních polymerních odpadů. Například výzkum v oblasti vývoje nízkoteplotních depolymerizačních procesů by mohl výrazně snížit náklady na energii, což je jeden z hlavních faktorů přispívajících k vysokým nákladům na chemickou recyklaci. Politické iniciativy, jako jsou daňové pobídky a dotace, mohou zároveň podnítit inovace v této oblasti, zatímco přísné předpisy o nakládání s odpady zvýší poptávku po chemicky recyklovaných výrobcích. Příkladem může být Evropská unie, která v rámci svého "Akčního plánu pro oběhové hospodářství" navrhuje opatření ke zvýšení míry recyklace plastů a využívání druhotných materiálů. Účinná recyklace směsných a kontaminovaných plastů je jednou z hlavních technických výzev, proto by se měla věnovat zvláštní pozornost optimalizaci složení vstupních surovin a zavedení norem pro výrobu plastů, které usnadní jejich následnou recyklaci. Spolupráce mezi vládními institucemi, průmyslem a výzkumnými organizacemi - například partnerství zahrnující velké chemické společnosti - může navíc urychlit uvádění nových technologií na trh. Pro snížení výrobních nákladů je vhodné rozšířit chemickou recyklaci, což umožní úspory z rozsahu, a také integrovat tyto procesy do stávajících průmyslových infrastruktur. Například integrace chemické recyklace s petrochemickými závody může snížit počáteční kapitálové investice. Další důležitou strategií je zvyšování povědomí spotřebitelů a rozšiřování odpovědnosti výrobců, což znamená, že výrobci nesou odpovědnost za nakládání s plastovým odpadem po skončení jeho životního cyklu. Z hlediska dopadu na životní prostředí je třeba se zaměřit na vývoj energeticky účinných technologií a zavádění technologií zachycování a využívání uhlíku s cílem minimalizovat dopady změny klimatu. Podporu vyžaduje také trh s druhotnými výrobky, protože chemicky recyklované výrobky musí kvalitou a cenou konkurovat primárním materiálům, takže vývoj technologií, které dokáží vyrábět vysoce kvalitní druhotné polymery, je kriticky důležitý. Klíčem k překonání hlavních problémů chemické recyklace plastů je proto komplexní přístup, který zahrnuje technologické inovace, regulační podporu, rozvoj infrastruktury a snižování dopadů na životní prostředí.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

## 4.3.BAT pro chemickou recyklaci plastů

Základem pro vytvoření BREF bylo přijetí směrnice o průmyslových emisích (Industrial Emissions Directive, IED). BREF je referenční dokument o nejlepších dostupných technikách (BAT) vypracovaný v rámci legislativy Evropské unie pro regulaci průmyslových emisí a minimalizaci dopadů na životní prostředí. V dokumentech jsou popsány použité metody, současné úrovně emisí a spotřeby, zvažované metody pro určení nejlepší dostupné technologie a závěry o BAT a případných nových metodách. BAT jsou technologie, metody a postupy, které jsou považovány za nejlepší dostupné pro snížení dopadu průmyslu na životní prostředí. Jsou vypracovány na základě BREF a definovány jako standard pro konkrétní činnosti. BAT jsou stanoveny na základě kritérií účinnosti, přínosu pro životní prostředí, ekonomické proveditelnosti a technické dostupnosti.




Obrázek 2. Proces stanovení BAT.

NEJLEPŠÍ - nejúčinnější při dosahování ochrany životního prostředí jako celku.

DOSTUPNÉ - ekonomicky a technicky proveditelné, s přihlédnutím k nákladům a výhodám, přiměřeně přístupné.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

TECHNIKY - používaná technologie a způsob, jakým je zařízení navrženo, postaveno, udržováno, provozováno a vyřazeno z provozu. Na základě BREF a BAT vnitrostátní regulační orgány vydávají podnikům ekologická povolení. To znamená, že povolení k provozování určitých průmyslových činností nebo zařízení se vydává v souladu s normami a požadavky BAT. V těchto povoleních mohou být stanoveny konkrétní environmentální podmínky a omezení, které musí podniky dodržovat. Tato povolení jsou povinná a regulují emise a další environmentální faktory.

Dokumenty BREF vypracované pro každé průmyslové odvětví a definují standardy BAT, včetně doporučených úrovní emisí pro různé látky a procesy. Tyto emisní hodnoty se nazývají úrovně emisí související s BAT (**Emission Limit Values**) (BAT-AEL) a definují rozsah koncentrací znečišťujících látek, kterých mohou podniky dosáhnout pomocí BAT. Když průmyslové zařízení žádá o ekologické povolení, regulační orgán bere v úvahu hodnoty BAT-AEL z příslušného dokumentu BREF. Na základě toho a s ohledem na specifika místních podmínek (např. typ výroby, emise, charakteristiky životního prostředí) stanoví regulátor pro konkrétní zařízení hodnoty ELV, které se pak stanou podmínkami povolení k ochraně životního prostředí. Pro nakládání s odpady byly vypracovány dva referenční dokumenty: referenční dokument pro zpracování odpadu a referenční dokument pro spalovaní odpadu.

**Referenční dokument pro zpracování odpadu:**

- Hydrolysis
- Glycolysis
- Enzymatic Degradation
- Acid Hydrolysis
- Supercritical Fluid Depolymerization
- Alkaline Hydrolysis
- Oxidative Degradation
- Hydrothermal Liquefaction
- Biological Depolymerization

- Electrochemical Recycling

**Tento BREF zahrnuje:**

5.1. Odstraňování nebo využívání nebezpečných odpadů s kapacitou nad 10 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností:

(a) biologická úprava;
(b) fyzikálně-chemická úprava;
(c) míchání nebo mísení před předáním k jiným činnostem uvedeným v bodech 5.1 a 5.2 přílohy I směrnice 2010/75/EU;
(d) opětovné balení před předáním k jiným činnostem uvedeným v bodech 5.1 a 5.2 přílohy I směrnice 2010/75/EU;
(e) regenerace/obnova rozpouštědel;
(f) recyklace/obnova anorganických materiálů, jako jsou kovy nebo sloučeniny kovů;
(g) regenerace kyselin nebo zásad;
(h) obnova složek používaných ke snížení znečištění;
(i) obnova složek z katalyzátorů;
(j) rafinace nebo jiné opětovné použití oleje.

5.3. (a) Odstraňování nebezpečných odpadů s kapacitou nad 50 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností, jako například:

(i) biologická úprava;
(ii) fyzikálně-chemická úprava;
(iii) předběžná úprava odpadů pro jejich spalování nebo spoluspalování;
(iv) likvidace popela;
(v) úprava ve drtičích kovového odpadu, vysloužilého elektrického a elektronického zařízení a součástí vozidel.

(b) Obnova, nebo kombinace obnovy a likvidace, nebezpečných odpadů s kapacitou nad 75 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností a vylučující činnosti regulované směrnicí 91/271/EHS:

(i) biologická úprava;
(ii) předběžná úprava odpadů pro spalování nebo spoluspalování;
(iii) likvidace popela;
(iv) úprava ve drtičích kovového odpadu, vysloužilého elektrického a elektronického zařízení a součástí vozidel.

5.5. Dočasné skladování nebezpečných odpadů, na které se nevztahuje bod (a) přílohy I směrnice 2010/75/EU, před zahájením některé z činností uvedených v bodech 5.4 a 5.6 této přílohy I, s celkovou kapacitou nad 50 tun, vyjma dočasného skladování na místě před shromážděním odpadu v místě jeho vzniku.

6.11. Samostatně provozované čistírny odpadních vod regulované směrnicí 91/271/EHS a vypouštěné zařízením, na které se vztahuje některá z činností uvedených v bodech 5.1, 5.3 nebo 5.5, jak je uvedeno výše.

**Tento BREF nezahrnuje následující:**

- Povrchové skladování.
- Odstraňování nebo recyklaci zvířecích těl nebo živočišných odpadů, na které se vztahuje popis v bodě 6.5 přílohy I směrnice 2010/75/EU, protože to pokrývá BREF pro jatky a odvětví vedlejších živočišných produktů (SA).
- Zpracování hnoje na farmách, pokud je to pokryto BREF pro intenzivní chov drůbeže nebo prasat (IRPP).
- Přímé využití (tj. bez předběžného zpracování) odpadů jako náhrady surovin v provozech provádějících činnosti pokryté jinými BREF, například:
    - Přímé využití olova (např. z baterií), solí zinku nebo hliníku nebo obnova kovů z katalyzátorů. To může být pokryto BREF pro průmysl neželezných kovů (NFM).
    - Recyklace papíru pro opětovné použití. To může být pokryto BREF pro výrobu buničiny, papíru a lepenky (PP).

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

    - Použití odpadu jako paliva/suroviny v cementárnách. To může být pokryto BREF pro výrobu cementu, vápna a oxidu hořečnatého (CLM).

- Spalování (spoluspalování), pyrolýza a zplyňování odpadů. To může být pokryto BREF pro spalování odpadů (WI) nebo BREF pro velké spalovací zařízení (LCP).

- Skartace odpadů. To je pokryto směrnicí 1999/31/ES o skládkování odpadu. Zejména podzemní trvalé a dlouhodobé skladování (≥ 1 rok před likvidací, ≥ 3 roky před využitím) je pokryto směrnicí 1999/31/ES.

- In situ sanace kontaminované půdy (tj. nevytěžené půdy).

- Zpracování strusky a spodního popela. To může být pokryto BREF pro spalování odpadu (WI) nebo BREF pro velké spalovací zařízení (LCP).

- Tavení kovového šrotu a materiálů obsahujících kovy. To může být pokryto BREF pro průmysl neželezných kovů (NFM), BREF pro výrobu železa a oceli (IS) a/nebo BREF pro kovárny a slévárny (SF).

- Regenerace použitých kyselin a zásad, pokud je to pokryto BREF pro zpracování kovů.

- Spalování paliva, pokud nevytváří horké plyny, které přicházejí do přímého kontaktu s odpadem. To může být pokryto BREF pro velká spalovací zařízení (LCP) nebo směrnicí 2015/2193/EU.

**Referenční dokument pro spalování odpadů:**

- Catalytic Pyrolysis
- Fast Pyrolysis
- Microwave Pyrolysis
- Fluidized Bed Pyrolysis
- Plasma Gasification
- Steam Gasification

Velmi často se stává, že dodržení stanovených limitů není reálné a nelze použít všechny doporučené techniky. To platí zejména v případě, že daná technologie ještě není široce používána. Tak je tomu například v případě technologií chemické recyklace plastů, kde většina technologií ještě není v provozu ve velkém rozsahu a některé jsou stále v pilotních verzích.

# 5. Chemická recyklace plastů v ČR

Chemická recyklace plastů v České republice nabývá na významu jako klíčová součást přechodu k oběhovému hospodářství. Tato technologie umožňuje zpracování plastového odpadu, který je obtížně recyklovatelný mechanickými metodami, a přeměňuje jej na základní chemické suroviny pro výrobu nových plastů.

## 5.1. Přehled firem zabývajících se chemickou recyklací plastů

V České republice se chemickou recyklací aktivně zabývá společnost **ORLEN Unipetrol**. V Litvínově provozuje testovací pyrolýzní jednotku, která zpracovává plastový odpad na pyrolyzní olej. Tento olej po dočištění nahrazuje fosilní suroviny při výrobě nových plastů. Společnost plánuje rozšířit kapacitu této jednotky na přibližně 20 tisíc tun ročně do roku 2027. Dalším příkladem je firma **Green Future**, která uvádí do komerčního provozu pyrolýzní jednotku s kapacitou 5,5 tisíce tun plastu ročně. V plánu má výstavbu dalších dvou jednotek v rámci ČR s celkovou kapacitou 22 tisíc tun ročně. Implementace chemické recyklace v ČR čelí výzvám, jako je zajištění konzistentní kvality vstupních surovin, efektivní třídění odpadu a vytvoření trhu s produkty chemické recyklace. Důležitá je také legislativní podpora a jasné regulační rámce pro nakládání s plastovým odpadem a využití metod chemické recyklace. Celkově chemická recyklace představuje perspektivní doplněk k mechanické recyklaci, který může významně přispět k dosažení recyklačních cílů stanovených evropskou a národní legislativou. Její rozvoj v České republice závisí na technologických inovacích, investicích a spolupráci mezi průmyslem, vládou a vědeckou komunitou.

## 5.2. Databáze ParaBAT

Nicméně její implementace v průmyslovém měřítku čelí významným problémům, zejména z pohledu plnění limitů BAT (*Best Available Techniques*), které definují nejefektivnější a ekologicky šetrné technologické postupy. Cílem těchto limitů je minimalizovat emise znečišťujících látek a snížit environmentální dopady průmyslových procesů. Při aplikaci metod chemické recyklace plastů je jejich

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

plnění výzvou, a otázka obcházení těchto limitů může být citlivým tématem, zejména z etického, právního a technologického hlediska.

**STANDARDNÍ PŘÍSTUP BAT/BREF**

**Environmentální dopady hodnoceny na úrovni požadavku na plnění limitů:**

- na úrovni spotřeby energií a médií, například účinnost, maximální spotřeba media, materiálu apod.
- na úrovni maximálně množství emise
    - definované v absolutní hodnotě za rok
    - definované v měrné jednotce vztažené na hlavní procesní tok (např. mg/Nm$^3$ atd.)
- na úrovni prostředí: vzduch, voda, půda.

**PROBLEMATIKA BAT/BREF**

- **Složitost** – vyžaduje dodržování množství norem a nejlepších praktik pro různá průmyslové odvětví.
- **Chybějící reflexe symbiózy** – referenční dokumenty BREF jsou často vytvářeny pro konkrétní sektory bez zohlednění možnosti symbiózy s jinými sektory.
- **Čas** – zavádění nových technologií často vyžaduje čas na otestování a vyhodnocení jejich účinnosti.
- **Lokální aspekty** – standardy BAT často nezohledňují místní environmentální a socioekonomické aspekty.

Účelem založení databáze ParaBAT bylo vytvořit alternativní možnosti, kterými by se dosáhlo požadované úrovně dopadu na životní prostředí, a to mimo dodržování limitů průmyslových emisí stanovených BAT. Podrobnější informace o fungování a struktuře databáze ParaBAT naleznete níže.

**Pro koho je databáze užitečná:**

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- Pro nově vzniklé a pokročilé firmy zabývající se odpady a recyklací
- Vládní a nevládní organizace
- Průmyslové podniky

**Databáze ParaBAT je platforma, kde zainteresovaná strana může:**

- Porovnat aktuální úroveň dopadu procesu na životní prostředí s úrovní dopadu, který reprezentují standardy BAT.
- Dozvědět se a aplikovat alternativní možnosti snížení dopadu svého procesu na životní prostředí.
- Vybrat a kombinovat možnosti snížení dopadu na životní prostředí (BAT, ParaBAT).

**K vytvoření a naplnění databáze ParaBAT byly použity tyto zdroje dat:**

- Referenční dokumenty pro spalování odpadů
- Referenční dokumenty pro zpracování odpadů
- Databáze Sphere
- Databáze EcoInvent
- Databáze Web of Science, Pub Med

Environmentální dopad procesu byl kalkulován pomocí softwaru LCA for Experts. Pilotní verze databáze byla napsána v programovacích jazycích HTML a Java Script.

**Princip fungování databáze ParaBAT**

1. Uživatel získá výpočet dopadu vlastního procesu na životní prostředí.
2. Uživatel má možnost porovnat své výsledky s výsledky stejného procesu, který zároveň dodržuje limity BAT.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

3. Uživatel přezkoumá návrhy, které ParaBAT vypracoval pro jeho proces, a v případě zájmu se rozhodne některý z nich použít.

4. Uživatel automaticky obdrží výpočet dopadu svého procesu na životní prostředí s přihlédnutím ke zvoleným možnostem ParaBAT.

5. Uživatel má možnost porovnat výsledky s původním dopadem svého procesu na životní prostředí a s procesem, který splňuje limity BAT.

**Dopad na životní prostředí vypočítán na základě charakteristických faktorů vynásobených množstvím materiálu, odpadu nebo emisí.**

$$EF_{celkem} = EF_{waste\ pastic}*M + EF_{water\ for\ prepar.}*M + EF_{electricity\ for\ prepar.}*M + EF_{detergent}*M + EF_{MWL(waste\ from\ prep.)}*M + EF_{waste\ water\ from\ prep.}*M + EF_{track}*M + EF_{diesel}*M + EF_{argon}*M + EF_{hydrogen}*M + EF_{electricity\ for\ pyrolysis}*M + EF_{natural\ gas}*M + EF_{water\ for\ pyrolysis}*M + EF_{catalyst}*M + EF_{diesel}*M + EF_{truck\ 1}*M + EF_{truck\ 2}*M + EF_{truck\ 3}*M + EF_{MWI\ char}*M - EF_{naphta}*M_{pyr.oil} + EF_{CO2}*M + EF_{SO2}*M + ....$$

$EF_{Acidification}$, $EF_{Climate\ Change\ -\ total}$, $EF_{Human\ toxicity,\ non\text{-}cancer\ -\ total}$, $EF_{.....}$

**Procesy spojené s pyrolýzou**
**Procesy spojené s přípravou plastů**
**Emise**
**M – mnozstvi**

**Možnosti nabízené ParaBATem pro technologii pyrolýzy zahrnují následující:**

Používání alternativních surovin

- Elektřina z alternativních zdrojů
- Biokatalyzátory
- Nahrazení dieselového paliva palivem šetrnějším k životnímu prostředí
- Používání ekologicky šetrnější dopravy

Zlepšení parametrů pyrolýzního procesu

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- Zvýšení množství katalyzátoru
- Zvýšení teploty
- Zvýšení času

Alternativní manipulace s produkty pyrolýzy

- Přímé spalování jako průmyslové palivo
- Použití v mořském a těžkém průmyslu
- Rafinace na dieselové palivo
- Chemické suroviny pro fenoly a furany
- Společné zpracování v rafinériích
- Zplyňování pro výrobu syntézního plynu

Použití recyklovaných materiálů

- Rekuperace tepla z procesu
- Využití pyrolýzního plynu k ohřevu reaktoru

Uživatel možnost vybrat si z alternativních možností, které ParaBAT nabízí ke snížení dopadu procesu na životní prostředí, tu variantu, kterou lze v procesu skutečně použít.

# 6. Závěr

Průmyslové organizace mohou pomocí ParaBAT snadněji a efektivněji analyzovat směry investic porovnáváním různých scénářů dopadu na životní prostředí. Mnohem efektivněji lze dosáhnout souladu s regulačními požadavky a konkurenční výhody, přičemž se zároveň zvýší jejich účinnost. Tento přístup je obzvláště výhodný pro zlepšení ADP (Advanced Data Processing - pokročilé zpracování dat). Ve sféře udržitelného rozvoje je pokročilé zpracování dat klíčové pro sběr, analýzu a interpretaci velkých objemů dat souvisejících s ekologickými, ekonomickými a sociálními aspekty. Dostupnost informativních dat přispívá k optimalizaci dopravních a energetických sítí a systémů

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

nakládání s odpady. Tyto údaje jsou podpůrným nástrojem pro kontrolu a optimalizaci celého dodavatelského řetězce. Informace tohoto typu jsou užitečné pro vytváření nových politik, stanovení priorit investic a podporu ekologičtějších postupů, zvýšení transparentnosti a odpovědnosti.

ParaBAT lze uplatnit v jakémkoli sektoru, kde jsou důležité dopady na životní prostředí a udržitelnost. Její komplexní přístup pomáhá organizacím nejen splňovat regulační požadavky, ale také dosahovat širších cílů udržitelného rozvoje, což ji činí aktuální v kontextu současných zpráv, trendů a zákonů, které podporují ekologickou kontrolu a udržitelný rozvoj.

## Literatura

[1] P. Europe, "Plastics—The Facts 2016," *An analysis of European latest plastics production, demand and waste data,* 2016.

[2] S. Lockie, "Sociologies of climate change are not enough. Putting the global biodiversity crisis on the sociological agenda," *Environmental Sociology,* vol. 9, no. 1, pp. 1-5, 2023/01/02 2023, doi: 10.1080/23251042.2023.2170310.

[3] Z. Chen *et al.*, "Adsorption behavior of aniline pollutant on polystyrene microplastics," *Chemosphere,* vol. 323, p. 138187, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138187.

[4] J. Zalasiewicz, S. Gabbott, and C. N. Waters, "Chapter 23 - Plastic Waste: How Plastics Have Become Part of the Earth's Geological Cycle," in *Waste (Second Edition)*, T. M. Letcher and D. A. Vallero Eds.: Academic Press, 2019, pp. 443-452.

[5] M. O. Rodrigues, N. Abrantes, F. J. M. Gonçalves, H. Nogueira, J. C. Marques, and A. M. M. Gonçalves, "Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known?," *Environmental Toxicology and Pharmacology,* vol. 72, p. 103239, 2019/11/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103239.

[6] V. S. a. M. R. Hannah Ritchie, "Plastic Pollution,"

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[7] S. R. Department. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2022 [Online] Available: https://www.statista.com//statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/

[8] S. R. Department. Annual production of plastics in Europe from 1950 to 2022 [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/987838/plastics-production-volume-in-the-eu-28/

[9] M. Jaganmohan. Distribution of plastic material production in Europe in 2015, by polymer type [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/687604/plastic-materials-production-european-union-eu/

[10] L. K. Ncube, A. U. Ude, E. N. Ogunmuyiwa, R. Zulkifli, and I. N. Beas, "An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries," *Recycling,* vol. 6, no. 1, p. 12, 2021.

[11] "Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures,"

[12] Main destinations for plastic waste exports from the European Union (EU-27) in 2021, by country [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/1269996/plastic-waste-export-destinations-european-union/

[13] "Ban on shipping plastic waste outside the EU,"

[14] Z. Liu, M. Adams, and T. R. Walker, "Are exports of recyclables from developed to developing countries waste pollution transfer or part of the global circular economy?," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 136, pp. 22-23, 2018/09/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.005.

[15] I. Yani, D. Rosiliani, B. Khona'ah, and F. A. Almahdini, "Identification and plastic type and classification of PET, HDPE, and PP using RGB method," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 857, no. 1, p. 012015, 2020/05/01 2020, doi: 10.1088/1757-899X/857/1/012015.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[16] S. Agarwal, R. Gudi, and P. Saxena, "Image Classification Approaches for Segregation of Plastic Waste Based on Resin Identification Code," *Transactions of the Indian National Academy of Engineering,* vol. 7, no. 3, pp. 739-751, 2022/09/01 2022, doi: 10.1007/s41403-022-00324-4.

[17] K. M. Cantor and P. Watts, "1 - Plastics Materials," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz Ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2011, pp. 3-5.

[18] M. Jaganmohan, "Plastic converters demand in the European Union (EU-27) in 2021, by polymer type,"

[19] W. C. Li, H. F. Tse, and L. Fok, "Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects," *Science of The Total Environment,* vol. 566-567, pp. 333-349, 2016/10/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084.

[20] S. C. Gall and R. C. Thompson, "The impact of debris on marine life," *Marine Pollution Bulletin,* vol. 92, no. 1, pp. 170-179, 2015/03/15/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041.

[21] M. Sigler, "The Effects of Plastic Pollution on Aquatic Wildlife: Current Situations and Future Solutions," *Water, Air, & Soil Pollution,* vol. 225, no. 11, p. 2184, 2014/10/18 2014, doi: 10.1007/s11270-014-2184-6.

[22] "Waste management indicators,"

[23] L. Shen and E. Worrell, "Chapter 31 - Plastic recycling," in *Handbook of Recycling (Second Edition)*, C. Meskers, E. Worrell, and M. A. Reuter Eds.: Elsevier, 2024, pp. 497-510.

[24] F. Perugini, M. L. Mastellone, and U. Arena, "A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes," *Environmental Progress,* vol. 24, no. 2, pp. 137-154, 2005.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[25] Z. O. Schyns and M. P. Shaver, "Mechanical recycling of packaging plastics: A review," *Macromolecular rapid communications,* vol. 42, no. 3, p. 2000415, 2021.

[26] I. Vollmer *et al.*, "Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste," *Angewandte Chemie International Edition,* vol. 59, no. 36, pp. 15402-15423, 2020, doi: https://doi.org/10.1002/anie.201915651.

[27] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Management,* vol. 69, pp. 24-58, 2017/11/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044.

[28] A. Angyal, N. Miskolczi, and L. Bartha, "Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste," *Journal of analytical and applied pyrolysis,* vol. 79, no. 1-2, pp. 409-414, 2007.

[29] F. Vilaplana and S. Karlsson, "Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 293, no. 4, pp. 274-297, 2008, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200700393.

[30] A. Ravve, *Principles of polymer chemistry*. Springer Science & Business Media, 2013.

[31] S. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste management,* vol. 29, no. 10, pp. 2625-2643, 2009.

[32] A. A. Garforth, S. Ali, J. Hernández-Martínez, and A. Akah, "Feedstock recycling of polymer wastes," *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* vol. 8, no. 6, pp. 419-425, 2004/12/01/ 2004, doi: https://doi.org/10.1016/j.cossms.2005.04.003.

[33] P. Quicker, M. Seitz, and J. Vogel, "Chemical recycling: A critical assessment of potential process approaches," *Waste Management & Research,* vol. 40, no. 10, pp. 1494-1504, 2022, doi: 10.1177/0734242x221084044.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[34] M. Garside, "Global plastic production statistics," *Retrieved from Statista. Available online: https://www. statista. com/statistics/282732/global (accessed on 1 August 2020),* 2019.

[35] J. Lusty Beech *et al.*, "A flexible kinetic assay efficiently sorts prospective biocatalysts for PET plastic subunit hydrolysis," *RSC Advances,* 10.1039/D2RA00612J vol. 12, no. 13, pp. 8119-8130, 2022, doi: 10.1039/D2RA00612J.

[36] Y. Li *et al.*, "Toward Making Poly(ethylene terephthalate) Degradable in Aqueous Environment," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 307, no. 4, p. 2100832, 2022, doi: https://doi.org/10.1002/mame.202100832.

[37] Damayanti and H.-S. Wu, "Strategic Possibility Routes of Recycled PET," *Polymers,* vol. 13, no. 9, p. 1475, 2021.

[38] J. R. Campanelli, D. G. Cooper, and M. R. Kamal, "Catalyzed hydrolysis of polyethylene terephthalate melts," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 53, no. 8, pp. 985-991, 1994, doi: https://doi.org/10.1002/app.1994.070530801.

[39] S. Kandasamy, A. Subramaniyan, G. Ramasamy, A. R. Ahamed, N. Manickam, and B. Dhandapani, "Study of alkaline hydrolysis of post consumed polyethylene terephthalate waste," *AIP Conference Proceedings,* vol. 2240, no. 1, 2020, doi: 10.1063/5.0011020.

[40] M. Siddiqui, H. Redhwi, A. Al-Arfaj, and D. Achilias, "Chemical Recycling of PET in the Presence of the Bio-Based Polymers, PLA, PHB and PEF: A Review," *Sustainability,* vol. 13, p. 10528, 09/23 2021, doi: 10.3390/su131910528.

[41] S. Mancini and M. Zanin, "Optimization of Neutral Hydrolysis Reaction of Post-consumer PET for Chemical Recycling," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology,* vol. 20, pp. 117-132, 05/01 2004, doi: 10.1177/147776060402000202.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[42] H. Abedsoltan, "A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate," *Polymer Engineering & Science,* vol. 63, no. 9, pp. 2651-2674, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/pen.26406.

[43] S. Sabde, G. D. Yadav, and R. Narayan, "Conversion of waste into wealth in chemical recycling of polymers: Hydrolytic depolymerization of polyethylene terephthalate into terephthalic acid and ethylene glycol using phase transfer catalysis," *Journal of Cleaner Production,* vol. 420, p. 138312, 2023/09/25/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138312.

[44] L. Krehula, Z. Hrnjak-Murgić, J. Jelenčić, and B. Andričić, "Evaluation of Poly(ethylene-terephthalate) Products of Chemical Recycling by Differential Scanning Calorimetry," *J. Polym. Environ.,* vol. 17, pp. 20-27, 03/01 2009, doi: 10.1007/s10924-009-0121-3.

[45] A. Sheel and D. Pant, "4 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis," in *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*, S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.K, and M. G. Thomas Eds.: William Andrew Publishing, 2019, pp. 61-84.

[46] A. Aguado *et al.*, "Chemical depolymerisation of PET complex waste: hydrolysis vs. glycolysis," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 16, no. 2, pp. 201-210, 2014/04/01 2014, doi: 10.1007/s10163-013-0177-y.

[47] B. Shojaei, M. Abtahi, and M. Najafi, "Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability," *Polymers for Advanced Technologies,* vol. 31, no. 12, pp. 2912-2938, 2020, doi: https://doi.org/10.1002/pat.5023.

[48] G. P. Karayannidis and D. S. Achilias, "Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 292, no. 2, pp. 128-146, 2007, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200600341.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[49] J. Xin *et al.*, "Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate," *Journal of Environmental Management,* vol. 296, p. 113267, 2021/10/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113267.

[50] Q. F. Yue, C. X. Wang, L. N. Zhang, Y. Ni, and Y. X. Jin, "Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts," *Polymer Degradation and Stability,* vol. 96, no. 4, pp. 399-403, 2011/04/01/ 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.020.

[51] X. Zhang, M. Fevre, G. O. Jones, and R. M. Waymouth, "Catalysis as an Enabling Science for Sustainable Polymers," *Chemical Reviews,* vol. 118, no. 2, pp. 839-885, 2018/01/24 2018, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00329.

[52] D. Lei *et al.*, "Rapid Glycolysis of Waste Polyethylene Terephthalate Fibers via a Stepwise Feeding Process," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 61, no. 14, pp. 4794-4802, 2022/04/13 2022, doi: 10.1021/acs.iecr.1c05022.

[53] D. E. Nikles and M. S. Farahat, "New Motivation for the Depolymerization Products Derived from Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Waste: a Review," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 290, no. 1, pp. 13-30, 2005, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200400186.

[54] A. Banerjee, K. Chatterjee, and G. Madras, "Enzymatic degradation of polymers: A brief review," *Materials Science and Technology,* vol. 30, no. 5, pp. 567-573, 2014, doi: 10.1179/1743284713y.0000000503.

[55] N. Mohanan, Z. Montazer, P. K. Sharma, and D. B. Levin, "Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics," (in English), *Frontiers in Microbiology,* Review vol. 11, 2020-November-26 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.580709.

[56] M. I. S. Aguiar, A. F. Sousa, G. Teixeira, A. P. M. Tavares, A. M. Ferreira, and J. A. P. Coutinho, "Enhancing plastic waste recycling: Evaluating the impact of additives on the

enzymatic polymer degradation," *Catalysis Today,* vol. 429, p. 114492, 2024/03/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114492.

[57] J. Kaushal, M. Khatri, and S. K. Arya, "Recent insight into enzymatic degradation of plastics prevalent in the environment: A mini - review," *Cleaner Engineering and Technology,* vol. 2, p. 100083, 2021/06/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100083.

[58] Roohi *et al.*, "Microbial Enzymatic Degradation of Biodegradable Plastics," *Current Pharmaceutical Biotechnology,* vol. 18, no. 5, pp. 429-440, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.2174/1389201018666170523165742.

[59] A. Papadopoulou, K. Hecht, and R. Buller, "Enzymatic PET Degradation," *CHIMIA,* vol. 73, no. 9, p. 743, 09/18 2019, doi: 10.2533/chimia.2019.743.

[60] S. Giraldo-Narcizo, N. Guenani, A. M. Sánchez-Pérez, and A. Guerrero, "Accelerated Polyethylene Terephthalate (PET) Enzymatic Degradation by Room Temperature Alkali Pre-treatment for Reduced Polymer Crystallinity," *ChemBioChem,* vol. 24, no. 1, p. e202200503, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/cbic.202200503.

[61] S. Thiyagarajan, E. Maaskant-Reilink, T. A. Ewing, M. K. Julsing, and J. van Haveren, "Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes," *RSC Advances,* 10.1039/D1RA08217E vol. 12, no. 2, pp. 947-970, 2022, doi: 10.1039/D1RA08217E.

[62] V. Tournier *et al.*, "Enzymes' Power for Plastics Degradation," *Chemical Reviews,* vol. 123, no. 9, pp. 5612-5701, 2023/05/10 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00644.

[63] L. Navone, K. Moffitt, K.-A. Hansen, J. Blinco, A. Payne, and R. Speight, "Closing the textile loop: Enzymatic fibre separation and recycling of wool/polyester fabric blends," *Waste Management,* vol. 102, pp. 149-160, 2020/02/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.026.

[64] J. Egan, S. Wang, J. Shen, O. Baars, G. Moxley, and S. Salmon, "Enzymatic textile fiber separation for sustainable waste processing," *Resources, Environment and Sustainability,* vol. 13, p. 100118, 2023/09/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100118.

[65] M. S. Islam, Z. Islam, R. Hasan, and A. S. Islam Molla Jamal, "Acidic hydrolysis of recycled polyethylene terephthalate plastic for the production of its monomer terephthalic acid," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology,* vol. 39, no. 1, pp. 12-25, 2023, doi: 10.1177/14777606221128038.

[66] S. D. Mancini and M. Zanin, "Post Consumer Pet Depolymerization by Acid Hydrolysis," *Polymer-Plastics Technology and Engineering,* vol. 46, no. 2, pp. 135-144, 2007/02/14 2007, doi: 10.1080/03602550601152945.

[67] T. Yoshioka, T. Sato, and A. Okuwaki, "Hydrolysis of waste PET by sulfuric acid at 150°C for a chemical recycling," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 52, no. 9, pp. 1353-1355, 1994, doi: https://doi.org/10.1002/app.1994.070520919.

[68] S. Alias and N. A. Abdul-Hakim, "Terephthalic Acid (TPA) Recovery from Plastic Bottle of Polyethylene Terephthalate (PET) through Hydrolysis Treatment," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 1257, no. 1, p. 012007, 2022/10/01 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1257/1/012007.

[69] J. Xu, H. Wei, H. Chu, G. Zhang, and D. Chen, "Supercritical fluids as recorded in quartz megacrysts of the Late Jurassic porphyritic granitic dyke in the giant Dongping gold deposit, Northern China," *Journal of Asian Earth Sciences: X,* vol. 6, p. 100068, 2021.

[70] M. Goto, "Supercritical Water Process for the Chemical Recycling of Waste Plastics," *AIP Conference Proceedings,* vol. 1251, no. 1, pp. 169-172, 2010, doi: 10.1063/1.3529267.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[71] T. Sako *et al.*, "Depolymerization of Polyethylene Terephthalate to Monomers with Supercritical Methanol," *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN,* vol. 30, no. 2, pp. 342-346, 1997, doi: 10.1252/jcej.30.342.

[72] M. Goto, M. Sasaki, and T. Hirose, "Reactions of polymers in supercritical fluids for chemical recycling of waste plastics," *Journal of Materials Science,* vol. 41, no. 5, pp. 1509-1515, 2006/03/01 2006, doi: 10.1007/s10853-006-4615-2.

[73] Y. Li and S. Wang, "Supercritical water oxidation for environmentally friendly treatment of organic wastes," *Advanced Supercritical Fluids Technologies,* pp. 1-27, 2020.

[74] Y. Liu, J. Shi, H. Jin, and L. Guo, "Chemical recycling methods for managing waste plastics: a review," *Environmental Chemistry Letters,* vol. 22, no. 1, pp. 149-169, 2024/02/01 2024, doi: 10.1007/s10311-023-01664-5.

[75] L. Sepini, R. Mochel, I. Petri, A. Chappaz, and H. Demey, "Understanding the conversion mechanisms in supercritical water conditions of PET as a model compound of plastic wastes," *Chemical Engineering Journal,* vol. 488, p. 150567, 2024/05/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150567.

[76] Z. Guo *et al.*, "Chemical recycling of various PET plastic waste under alkaline hydrolysis via the LSR method," *Inorganic Chemistry Communications,* vol. 159, p. 111744, 2024/01/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111744.

[77] A. Barredo *et al.*, "Chemical recycling of monolayer PET tray waste by alkaline hydrolysis," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 11, no. 3, p. 109823, 2023/06/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109823.

[78] M. L. Maniar, D. S. Kalonia, and A. P. Simonelli, "Alkaline Hydrolysis of Oligomers of Tartrate Esters: Effect of a Neighboring Carboxyl on the Reactivity of Ester Groups," *Journal of Pharmaceutical Sciences,* vol. 81, no. 7, pp. 705-709, 1992, doi: 10.1002/jps.2600810724.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[79] K. A. Thorn, P. G. Thorne, and L. G. Cox, "Alkaline Hydrolysis/Polymerization of 2,4,6-Trinitrotoluene: Characterization of Products by 13C and 15N NMR," *Environmental Science & Technology,* vol. 38, no. 7, pp. 2224-2231, 2004/04/01 2004, doi: 10.1021/es030655a.

[80] T. Brueckner, A. Eberl, S. Heumann, M. Rabe, and G. M. Guebitz, "Enzymatic and chemical hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) fabrics," *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry,* vol. 46, no. 19, pp. 6435-6443, 2008, doi: https://doi.org/10.1002/pola.22952.

[81] G. P. Karayannidis, A. P. Chatziavgoustis, and D. S. Achilias, "Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid by alkaline hydrolysis," *Advances in Polymer Technology,* vol. 21, no. 4, pp. 250-259, 2002, doi: https://doi.org/10.1002/adv.10029.

[82] C. S. Bhogle and A. B. Pandit, "Ultrasound-Assisted Alkaline Hydrolysis of Waste Poly(Ethylene Terephthalate) in Aqueous and Non-aqueous Media at Low Temperature," *Indian Chemical Engineer,* vol. 60, no. 2, pp. 122-140, 2018/04/03 2018, doi: 10.1080/00194506.2017.1310634.

[83] G. P. Tsintzou and D. S. Achilias, "Chemical Recycling of Polycarbonate Based Wastes Using Alkaline Hydrolysis Under Microwave Irradiation," *Waste and Biomass Valorization,* vol. 4, no. 1, pp. 3-7, 2013/03/01 2013, doi: 10.1007/s12649-012-9125-7.

[84] S. Kumagai, S. Hirahashi, G. Grause, T. Kameda, H. Toyoda, and T. Yoshioka, "Alkaline hydrolysis of PVC-coated PET fibers for simultaneous recycling of PET and PVC," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 20, no. 1, pp. 439-449, 2018/01/01 2018, doi: 10.1007/s10163-017-0614-4.

[85] I. Čorak, A. Tarbuk, D. Đorđević, K. Višić, and L. Botteri, "Sustainable Alkaline Hydrolysis of Polyester Fabric at Low Temperature," *Materials,* vol. 15, no. 4, p. 1530, 2022.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[86] Z. Guo *et al.*, "Less solvent solid state reaction of sodium sulfite and sulfur," *Inorganic Chemistry Communications,* vol. 151, p. 110619, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110619.

[87] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, and A. S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Safety and Environmental Protection,* vol. 102, pp. 822-838, 2016/07/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022.

[88] I. Velghe, R. Carleer, J. Yperman, and S. Schreurs, "Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 92, no. 2, pp. 366-375, 2011.

[89] J. Scheirs and W. Kaminsky, *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. Chichester, UK; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2006.

[90] D. Chen, L. Yin, H. Wang, and P. He, "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review," *Waste Management,* vol. 34, no. 12, pp. 2466-2486, 2014/12/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004.

[91] A. Deka and R. D. Misra, "Influence of retention time and catalyst concentrations on catalytic pyrolysis yields of polyethylene and polystyrene," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* vol. 46, no. 1, pp. 5072-5093, 2024/12/31 2024, doi: 10.1080/15567036.2024.2335368.

[92] D. Y. Goswami, *The CRC handbook of mechanical engineering*. CRC press, 2004.

[93] G. Grause, S. Matsumoto, T. Kameda, and T. Yoshioka, "Pyrolysis of mixed plastics in a fluidized bed of hard burnt lime," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 50, no. 9, pp. 5459-5466, 2011.

[94] D. Achilias, C. Roupakias, P. Megalokonomos, A. Lappas, and E. Antonakou, "Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and

polypropylene (PP)," *Journal of hazardous materials,* vol. 149, no. 3, pp. 536-542, 2007.

[95] K.-H. Lee, "Effects of the types of zeolites on catalytic upgrading of pyrolysis wax oil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 94, pp. 209-214, 2012.

[96] D. K. Ojha and R. Vinu, "Resource recovery via catalytic fast pyrolysis of polystyrene using zeolites," *Journal of analytical and applied pyrolysis,* vol. 113, pp. 349-359, 2015.

[97] A. López, I. De Marco, B. Caballero, M. Laresgoiti, A. Adrados, and A. Aranzabal, "Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud," *Applied Catalysis B: Environmental,* vol. 104, no. 3-4, pp. 211-219, 2011.

[98] M. Rehan *et al.*, "Pyrolytic liquid fuel: A source of renewable electricity generation in Makkah," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* vol. 38, no. 17, pp. 2598-2603, 2016/09/01 2016, doi: 10.1080/15567036.2016.1153753.

[99] T. Maqsood, J. Dai, Y. Zhang, M. Guang, and B. Li, "Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 159, p. 105295, 2021/10/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295.

[100] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, and P. Gupta, "Impact of fast and slow pyrolysis on the degradation of mixed plastic waste: Product yield analysis and their characterization," *Journal of the Energy Institute,* vol. 92, no. 6, pp. 1647-1657, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.009.

[101] W. J. Hall and P. T. Williams, "Fast Pyrolysis of Halogenated Plastics Recovered from Waste Computers," *Energy & Fuels,* vol. 20, no. 4, pp. 1536-1549, 2006/07/01 2006, doi: 10.1021/ef060088n.

[102] P. T. Williams, "Yield and Composition of Gases and Oils/Waxes from the Feedstock Recycling of Waste Plastic," in *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*, 2006, pp. 285-313.

[103] J. Jamradloedluk and C. Lertsatitthanakorn, "Characterization and Utilization of Char Derived from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes," *Procedia Engineering,* vol. 69, pp. 1437-1442, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.139.

[104] K. N. Aishwarya and N. Sindhu, "Microwave Assisted Pyrolysis of Plastic Waste," *Procedia Technology,* vol. 25, pp. 990-997, 2016/01/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.197.

[105] H. Arshad, S. A. Sulaiman, Z. Hussain, Y. Naz, and F. Basrawi, "Microwave assisted pyrolysis of plastic waste for production of fuels: a review," *MATEC Web Conf.,* vol. 131, p. 02005, 2017.

[106] X. Hu *et al.*, "Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse: A technical review," *Carbon Resources Conversion,* vol. 6, no. 3, pp. 215-228, 2023/09/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.03.002.

[107] A. Undri, L. Rosi, M. Frediani, and P. Frediani, "Efficient disposal of waste polyolefins through microwave assisted pyrolysis," *Fuel,* vol. 116, pp. 662-671, 2014/01/15/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.037.

[108] S. Goodman, "The microwave induced pyrolysis of problematic plastics enabling recovery and component reuse," Imperial College London, 2014.

[109] C. Ludlow-Palafox and H. A. Chase, "Microwave-Induced Pyrolysis of Plastic Wastes," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 40, no. 22, pp. 4749-4756, 2001/10/01 2001, doi: 10.1021/ie010202j.

[110] C. Yang, H. Shang, J. Li, X. Fan, J. Sun, and A. Duan, "A Review on the Microwave-Assisted Pyrolysis of Waste Plastics," *Processes,* vol. 11, no. 5, p. 1487, 2023.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[111] X. Jing *et al.*, "Interaction between feedstocks, absorbers and catalysts in the microwave pyrolysis process of waste plastics," *Journal of Cleaner Production,* vol. 291, p. 125857, 2021/04/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125857.

[112] P. H. M. Putra, S. Rozali, M. F. A. Patah, and A. Idris, "A review of microwave pyrolysis as a sustainable plastic waste management technique," *Journal of Environmental Management,* vol. 303, p. 114240, 2022/02/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114240.

[113] W. Kaminsky, "Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis," *Fuel Communications,* vol. 8, p. 100023, 2021/09/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100023.

[114] W. Kaminsky, "Chemical recycling of mixed plastics of pyrolysis," *Advances in Polymer Technology,* vol. 14, no. 4, pp. 337-344, 1995, doi: https://doi.org/10.1002/adv.1995.060140407.

[115] K. R. Gaston, M. W. Jarvis, P. Pepiot, K. M. Smith, W. J. Frederick, Jr., and M. R. Nimlos, "Biomass Pyrolysis and Gasification of Varying Particle Sizes in a Fluidized-Bed Reactor," *Energy & Fuels,* vol. 25, no. 8, pp. 3747-3757, 2011/08/18 2011, doi: 10.1021/ef200257k.

[116] F. J. Mastral, E. Esperanza, P. García, and M. Juste, "Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 63, no. 1, pp. 1-15, 2002/03/01/ 2002, doi: https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00137-1.

[117] L. A. De la Flor-Barriga and U. F. Rodríguez-Zúñiga, "Numerical analysis on a catalytic pyrolysis reactor design for plastic waste upcycling using CFD modelling," *RSC Advances,* 10.1039/D2RA01407F vol. 12, no. 20, pp. 12436-12445, 2022, doi: 10.1039/D2RA01407F.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[118] H. Zhang, J. Nie, R. Xiao, B. Jin, C. Dong, and G. Xiao, "Catalytic Co-pyrolysis of Biomass and Different Plastics (Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene) To Improve Hydrocarbon Yield in a Fluidized-Bed Reactor," *Energy & Fuels,* vol. 28, no. 3, pp. 1940-1947, 2014/03/20 2014, doi: 10.1021/ef4019299.

[119] S. Clemente-Castro, A. Palma, M. Ruiz-Montoya, I. Giráldez, and M. J. Díaz, "Optimizing pyrolysis parameters and product analysis of a fluidized bed pilot plant for Leucaena leucocephala biomass," *Environmental Sciences Europe,* vol. 35, no. 1, p. 88, 2023/10/31 2023, doi: 10.1186/s12302-023-00800-w.

[120] U. Arena, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review," *Waste management,* vol. 32, no. 4, pp. 625-639, 2012.

[121] K. P. Willis, S. Osada, and K. L. Willerton, "Plasma Gasification: Lessons Learned at Eco-Valley WTE Facility," in *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, 2010, vol. 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference, pp. 133-140, doi: 10.1115/nawtec18-3515. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/NAWTEC18-3515

[122] F. Fabry, C. Rehmet, V. Rohani, and L. Fulcheri, "Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review," *Waste and Biomass Valorization,* vol. 4, no. 3, pp. 421-439, 2013/09/01 2013, doi: 10.1007/s12649-013-9201-7.

[123] S. Kwon and S.-k. Im, "Thermodynamic evaluation of integrated plasma gasification combined cycle with plastic waste feedstock," *Chemical Engineering Journal,* vol. 482, p. 148771, 2024/02/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148771.

[124] D. Cudjoe and H. Wang, "Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis," *Fuel Processing Technology,* vol. 237, p. 107470, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470.

[125] I. J. Cho, H.-W. Park, D.-W. Park, and S. Choi, "Enhancement of synthesis gas production using gasification-plasma hybrid system," *International Journal of*

*Hydrogen Energy,* vol. 40, no. 4, pp. 1709-1716, 2015/01/30/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.007.

[126] U. Lee, J. N. Chung, and H. A. Ingley, "High-Temperature Steam Gasification of Municipal Solid Waste, Rubber, Plastic and Wood," *Energy & Fuels,* vol. 28, no. 7, pp. 4573-4587, 2014/07/17 2014, doi: 10.1021/ef500713j.

[127] V. Wilk and H. Hofbauer, "Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier," *Fuel,* vol. 107, pp. 787-799, 2013/05/01/ 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.068.

[128] K. G. Burra and A. K. Gupta, "Synergistic effects in steam gasification of combined biomass and plastic waste mixtures," *Applied Energy,* vol. 211, pp. 230-236, 2018/02/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.130.

[129] Z. Abu El-Rub, E. A. Bramer, and G. Brem, "Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 43, no. 22, pp. 6911-6919, 2004/10/01 2004, doi: 10.1021/ie0498403.

[130] H. C. Beachell and S. P. Nemphos, "Oxidative degradation of polyethylene," *Journal of Polymer Science,* vol. 21, no. 97, pp. 113-124, 1956, doi: https://doi.org/10.1002/pol.1956.120219710.

[131] Z. Wang, Z. Wang, D. Liu, and Q. Wang, "Peculiarity of the Mechanism of Early Stages of Photo-Oxidative Degradation of Linear Low-Density Polyethylene Films in the Presence of Ferric Stearate," *Polymers,* vol. 15, no. 18, p. 3672, 2023.

[132] D. Rasselet, A. Ruellan, A. Guinault, G. Miquelard-Garnier, C. Sollogoub, and B. Fayolle, "Oxidative degradation of polylactide (PLA) and its effects on physical and mechanical properties," *European Polymer Journal,* vol. 50, pp. 109-116, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.10.011.

[133] A. Rovaletti *et al.*, "Recent Theoretical Insights into the Oxidative Degradation of Biopolymers and Plastics by Metalloenzymes," *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 24, no. 7, p. 6368, 2023.

[134] W. Li, W. Zhao, H. Zhu, Z.-J. Li, and W. Wang, "State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics: from fundamental principles to catalysts and applications," *Journal of Materials Chemistry A,* 10.1039/D2TA09523H vol. 11, no. 6, pp. 2503-2527, 2023, doi: 10.1039/D2TA09523H.

[135] Y. Wang *et al.*, "A Review of Degradation and Life Prediction of Polyethylene," *Applied Sciences,* vol. 13, no. 5, p. 3045, 2023.

[136] M. S. Seshasayee and P. E. Savage, "Oil from plastic via hydrothermal liquefaction: Production and characterization," *Applied Energy,* vol. 278, p. 115673, 2020/11/15/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115673.

[137] A. Mathanker, S. Das, D. Pudasainee, M. Khan, A. Kumar, and R. Gupta, "A Review of Hydrothermal Liquefaction of Biomass for Biofuels Production with a Special Focus on the Effect of Process Parameters, Co-Solvents, and Extraction Solvents," *Energies,* vol. 14, no. 16, p. 4916, 2021.

[138] T. Helmer Pedersen and F. Conti, "Improving the circular economy via hydrothermal processing of high-density waste plastics," *Waste Management,* vol. 68, pp. 24-31, 2017/10/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.002.

[139] A. S. Jatoi *et al.*, "Hydrothermal Liquefaction of Lignocellulosic and Protein-Containing Biomass: A Comprehensive Review," *Catalysts,* vol. 12, no. 12, p. 1621, 2022.

[140] T. Rahman *et al.*, "Depolymerization of Household Plastic Waste via Catalytic Hydrothermal Liquefaction," *Energy & Fuels,* vol. 37, no. 17, pp. 13202-13217, 2023/09/07 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c01706.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[141] Y. Shen, "A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products," *Biomass and Bioenergy,* vol. 134, p. 105479, 2020/03/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105479.

[142] T. Lu, K. Jan, and W.-T. Chen, "Hydrothermal liquefaction of pretreated polyethylene-based ocean-bound plastic waste in supercritical water," *Journal of the Energy Institute,* vol. 105, pp. 282-292, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.10.003.

[143] A. Gluth, Z. Xu, L. S. Fifield, and B. Yang, "Advancing biological processing for valorization of plastic wastes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 170, p. 112966, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112966.

[144] J. Gu, "Microbial corrosion of metals and deterioration of polymeric materials," *Journal of Materials Engineering,* 1999.

[145] A. A. Hussein, M. Alzuhairi, and N. H. Aljanabi, "Degradation and depolymerization of plastic waste by local bacterial isolates and bubble column reactor," *AIP Conference Proceedings,* vol. 1968, no. 1, 2018, doi: 10.1063/1.5039268.

[146] Y. Wu, Q. Hu, Y. Che, and Z. Niu, "Opportunities and challenges for plastic depolymerization by biomimetic catalysis," *Chemical Science,* 10.1039/D4SC00070F vol. 15, no. 17, pp. 6200-6217, 2024, doi: 10.1039/D4SC00070F.

[147] S. Meenakshisundaram, A. Fayeulle, E. Léonard, C. Ceballos, X. Liu, and A. Pauss, "Combined Biological and Chemical/Physicochemical Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol and Biomethane Energy Production—A Review," *Applied Microbiology,* vol. 2, no. 4, pp. 716-734, 2022.

[148] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed, "Biological degradation of plastics: A comprehensive review," *Biotechnology Advances,* vol. 26, no. 3, pp. 246-265, 2008/05/01/ 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[149] G.-Q. Chen and M. K. Patel, "Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review," *Chemical Reviews,* vol. 112, no. 4, pp. 2082-2099, 2012/04/11 2012, doi: 10.1021/cr200162d.

[150] R. Koshti, L. Mehta, and N. Samarth, "Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review," *Journal of Polymers and the Environment,* vol. 26, no. 8, pp. 3520-3529, 2018/08/01 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1214-7.

[151] R.-T. Guo *et al.*, "Natural and engineered enzymes for polyester degradation: a review," *Environmental Chemistry Letters,* vol. 22, no. 3, pp. 1275-1296, 2024/06/01 2024, doi: 10.1007/s10311-024-01714-6.

[152] C. Weng, X. Peng, and Y. Han, "Depolymerization and conversion of lignin to value-added bioproducts by microbial and enzymatic catalysis," *Biotechnology for Biofuels,* vol. 14, no. 1, p. 84, 2021/04/03 2021, doi: 10.1186/s13068-021-01934-w.

[153] L. Aristizábal-Lanza, S. V. Mankar, C. Tullberg, B. Zhang, and J. A. Linares-Pastén, "Comparison of the enzymatic depolymerization of polyethylene terephthalate and AkestraTM using Humicola insolens cutinase," (in English), *Frontiers in Chemical Engineering,* Original Research vol. 4, 2022-December-13 2022, doi: 10.3389/fceng.2022.1048744.

[154] C. Catizane, Y. Jiang, and J. Sumner, "Improving plastic pyrolysis oil quality via an electrochemical process for polymer recycling: a review," *Energy Advances,* 10.1039/D3YA00389B vol. 3, no. 2, pp. 366-388, 2024, doi: 10.1039/D3YA00389B.

[155] H. A. Petersen, T. H. T. Myren, S. J. O'Sullivan, and O. R. Luca, "Electrochemical methods for materials recycling," *Materials Advances,* 10.1039/D0MA00689K vol. 2, no. 4, pp. 1113-1138, 2021, doi: 10.1039/D0MA00689K.

[156] T. Jiang *et al.*, "STEP polymer degradation: Solar thermo-coupled electrochemical depolymerization of plastics to generate useful fuel plus abundant hydrogen," *Solar*

*Energy Materials and Solar Cells,* vol. 204, p. 110208, 2020/01/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110208.

[157] R. Shi, K.-S. Liu, F. Liu, X. Yang, C.-C. Hou, and Y. Chen, "Electrocatalytic reforming of waste plastics into high value-added chemicals and hydrogen fuel," *Chemical Communications,* 10.1039/D1CC05032J vol. 57, no. 94, pp. 12595-12598, 2021, doi: 10.1039/D1CC05032J.

[158] T. Xayachak, N. Haque, D. Lau, R. Parthasarathy, and B. K. Pramanik, "Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study," *Process Safety and Environmental Protection,* vol. 173, pp. 592-603, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.061.

[159] L. Zou, R. Xu, H. Wang, Z. Wang, Y. Sun, and M. Li, "Chemical recycling of polyolefins: a closed-loop cycle of waste to olefins," *National Science Review,* vol. 10, no. 9, 2023, doi: 10.1093/nsr/nwad207.

[160] M. G. Davidson, R. A. Furlong, and M. C. McManus, "Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review," *Journal of Cleaner Production,* vol. 293, p. 126163, 2021/04/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163.

[161] H. Alhazmi, F. H. Almansour, and Z. Aldhafeeri, "Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies," *Sustainability,* vol. 13, no. 10, p. 5340, 2021.

[162] L. Shen, E. Worrell, and M. K. Patel, "Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 55, no. 1, pp. 34-52, 2010/11/01/ 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014.

[163] G. Faraca, V. Martinez-Sanchez, and T. F. Astrup, "Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres,"

*Resources, Conservation and Recycling,* vol. 143, pp. 299-309, 2019/04/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.014.

[164] N. Gandhi, N. Farfaras, N.-H. L. Wang, and W.-T. Chen, "Life Cycle Assessment of Recycling High-Density Polyethylene Plastic Waste," *Journal of Renewable Materials,* vol. 9, no. 8, pp. 1463-1483, // 2021, doi: 10.32604/jrm.2021.015529.

[165] A. Fonseca, E. Ramalho, A. Gouveia, F. Figueiredo, and J. Nunes, "Life Cycle Assessment of PLA Products: A Systematic Literature Review," *Sustainability,* vol. 15, no. 16, p. 12470, 2023.

[166] G. Finnveden *et al.*, "Recent developments in Life Cycle Assessment," *Journal of Environmental Management,* vol. 91, no. 1, pp. 1-21, 2009/10/01/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

[167] E. M. Technical Committee ISO/TC 207, *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006.

[168] G. Finnveden, A. Björklund, M. C. Reich, O. Eriksson, and A. Sörbom, "Flexible and robust strategies for waste management in Sweden," *Waste Management,* vol. 27, no. 8, pp. S1-S8, 2007/01/01/ 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.017.

[169] A. Scipioni, A. Mazzi, M. Niero, and T. Boatto, "LCA to choose among alternative design solutions: The case study of a new Italian incineration line," *Waste Management,* vol. 29, no. 9, pp. 2462-2474, 2009/09/01/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.007.

[170] A. Laurent *et al.*, "Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives," *Waste Management,* vol. 34, no. 3, pp. 573-588, 2014/03/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045.

[171] T. F. Astrup, D. Tonini, R. Turconi, and A. Boldrin, "Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations," *Waste Management,* vol. 37, pp. 104-115, 2015/03/01/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.011.

[172] U. R. Gracida-Alvarez, P. T. Benavides, U. Lee, and M. Wang, "Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis," *Journal of Cleaner Production,* vol. 425, p. 138867, 2023/11/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138867.

[173] A. Demetrious and E. Crossin, "Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 21, no. 4, pp. 850-860, 2019/07/01 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00842-4.

[174] F. Ardolino, C. Lodato, T. F. Astrup, and U. Arena, "Energy recovery from plastic and biomass waste by means of fluidized bed gasification: A life cycle inventory model," *Energy,* vol. 165, pp. 299-314, 2018/12/15/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.158.

[175] H. Stančin, V. Strezov, and H. Mikulčić, "Life cycle assessment of alternative fuel production by co-pyrolysis of waste biomass and plastics," *Journal of Cleaner Production,* vol. 414, p. 137676, 2023/08/15/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137676.

[176] L. Pires Costa, D. M. Vaz de Miranda, and J. C. Pinto, "Critical Evaluation of Life Cycle Assessment Analyses of Plastic Waste Pyrolysis," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 10, no. 12, pp. 3799-3807, 2022/03/28 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c00265.

[177] S. Das, C. Liang, and J. B. Dunn, "Plastics to fuel or plastics: Life cycle assessment-based evaluation of different options for pyrolysis at end-of-life," *Waste Management,*

vol. 153, pp. 81-88, 2022/11/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.015.

[178] M. U. Azam, A. Vete, and W. Afzal, "Process Simulation and Life Cycle Assessment of Waste Plastics: A Comparison of Pyrolysis and Hydrocracking," *Molecules,* vol. 27, no. 22, p. 8084, 2022.

[179] T. Xayachak *et al.*, "Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 10, no. 6, p. 108865, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865.

[180] J. Dong, "MSWs gasification with emphasis on energy, environment and life cycle assessment

Etude de la gazéification d'ordures ménagères avec un intérêt particulier pour les bilans énergétiques, environnementaux couplés à l'analyse de cycle de vie," Ecole des Mines d'Albi-Carmaux

Zhejiang University. Institute for Thermal Power Engineering, 2016EMAC0017, 2016. [Online]. Available: https://theses.hal.science/tel-01540764

[181] S. Afzal *et al.*, "Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen," *Green Chemistry,* 10.1039/D3GC00679D vol. 25, no. 13, pp. 5068-5085, 2023, doi: 10.1039/D3GC00679D.

[182] K. Lan and Y. Yao, "Feasibility of gasifying mixed plastic waste for hydrogen production and carbon capture and storage," *Communications Earth & Environment,* vol. 3, no. 1, p. 300, 2022/11/29 2022, doi: 10.1038/s43247-022-00632-1.

[183] A. S. Ouedraogo, R. S. Frazier, and A. Kumar, "Comparative Life Cycle Assessment of Gasification and Landfilling for Disposal of Municipal Solid Wastes," *Energies,* vol. 14, no. 21, p. 7032, 2021.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[184] S. Ügdüler *et al.*, "Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis," *Green Chemistry,* 10.1039/D0GC00894J vol. 22, no. 16, pp. 5376-5394, 2020, doi: 10.1039/D0GC00894J.

[185] M. Iturrondobeitia, L. Alonso, and E. Lizundia, "Prospective life cycle assessment of poly (ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 198, p. 107182, 2023/11/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107182.

[186] D. Tonini and T. Astrup, "Life-cycle assessment of a waste refinery process for enzymatic treatment of municipal solid waste," *Waste Management,* vol. 32, no. 1, pp. 165-176, 2012/01/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.027.

[187] A. Singh *et al.*, "Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate)," *Joule,* vol. 5, no. 9, pp. 2479-2503, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.06.015.

[188] Y. Yang, K. Seo, J. S.-I. Kwon, and W. Won, "Process Integration for the Production of Bioplastic Monomer: Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Assessment," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 12, no. 30, pp. 11167-11180, 2024/07/29 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.4c01783.

[189] E. Rezvani Ghomi *et al.*, "The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material," *Polymers,* vol. 13, no. 11, p. 1854, 2021.

[190] A. Amobonye, P. Bhagwat, S. Singh, and S. Pillai, "Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes," *Science of The Total Environment,* vol. 759, p. 143536, 2021/03/10/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536.

[191] S. Mohapatra *et al.*, "14 - Life cycle analyses and carbon footprint of bioplastics," in *Bioplastics for Sustainability*, A. K. Mishra and C. M. Hussain Eds.: Elsevier, 2024, pp. 355-369.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[192] E. A. R. Zuiderveen, D. Ansovini, G.-J. M. Gruter, and L. Shen, "Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process," *Cleaner Environmental Systems,* vol. 2, p. 100036, 2021/06/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100036.

[193] E. M. Iannicelli-Zubiani, M. I. Giani, F. Recanati, G. Dotelli, S. Puricelli, and C. Cristiani, "Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study," *Journal of Cleaner Production,* vol. 140, pp. 1204-1216, 2017/01/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.040.

[194] C. Walls *et al.*, "Recycling of Metallized Plastic as a Case Study for a Continuous Sustainability Improvement Process," *Sustainability,* vol. 15, no. 20, p. 14737, 2023.

[195] R. S. Rubin, M. A. S. d. Castro, D. Brandão, V. Schalch, and A. R. Ometto, "Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap," *Journal of Cleaner Production,* vol. 64, pp. 297-305, 2014/02/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051.

[196] B. Pillain *et al.*, "Positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment," *The Journal of Supercritical Fluids,* vol. 154, p. 104607, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104607.

[197] S. Lee, H. Lee, J. Lee, and H. Cho, "Sustainable chemical recycling of waste plastics into olefins through low-pressure hydrothermal liquefaction and microwave pyrolysis: Techno-economic analysis and life cycle assessment," *Energy Conversion and Management,* vol. 317, p. 118861, 2024/10/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118861.

[198] F. Hussin, N. N. Hazani, M. Khalil, and M. K. Aroua, "Environmental life cycle assessment of biomass conversion using hydrothermal technology: A review," *Fuel*

*Processing Technology,* vol. 246, p. 107747, 2023/07/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107747.

[199] U. Lee, P. T. Benavides, and M. Wang, "Chapter 8 - Life cycle analysis of waste-to-energy pathways," in *Waste-to-Energy*, J. Ren Ed.: Academic Press, 2020, pp. 213-233.

[200] O. García-Depraect *et al.*, "Inspired by nature: Microbial production, degradation and valorization of biodegradable bioplastics for life-cycle-engineered products," *Biotechnology Advances,* vol. 53, p. 107772, 2021/12/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107772.

[201] S. Oh and E. E. Stache, "Recent advances in oxidative degradation of plastics," *Chemical Society Reviews,* 10.1039/D4CS00407H vol. 53, no. 14, pp. 7309-7327, 2024, doi: 10.1039/D4CS00407H.

[202] G. Croxatto Vega, A. Gross, and M. Birkved, "The impacts of plastic products on air pollution - A simulation study for advanced life cycle inventories of plastics covering secondary microplastic production," *Sustainable Production and Consumption,* vol. 28, pp. 848-865, 2021/10/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.008.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

# ANALÝZA VYBRANÉ INOVATIVNÍ TECHNOLOGIE PRO NAKLÁDÁNÍ S PEVNÝMI ODPADY (CHEMICKÁ RECYKLACE PLASTŮ) – DATABÁZE PARABAT

MSc. Ivanna Harasymchuk, prof. Ing. Vladimír Kočí, Ph.D., Ústav udržitelnosti a produktové ekologie, VŠCHT Praha

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

## Obsah

*1. Úvod*.....

*2. Technologie chemické recyklace*.....

**2.1. Současné metody chemické recyklace plastů**.....

2.1.1. Hydrolýza.....

2. 1.2 Glykolýza.....

2. 1.3. Enzymatická degradace.....

2. 1.4. Hydrolýza kyselinou.....

2. 1.5. Depolymerizace v nadkritické kapalině.....

2. 1.6. Alkalická hydrolýza.....

2. 1.7. Katalytická pyrolýza.....

2. 1.8. Rychlá pyrolýza.....

2. 1.10. Mikrovlnná pyrolýza.....

2. 1.11. Pyrolýza ve fluidním loži.....

2. 1.12. Plazmové zplyňování.....

2. 1.13. Zplyňování parou.....

2. 1.14. Oxidační degradace.....

2. 1.15. Hydrotermální zkapalňování.....

2. 1.16. Biologická depolymerizace.....

2. 1.17. Elektrochemická recyklace.....

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

**2.2. Porovnání technologií** .....

2. 2.1. Výstupní produkty .....

2. 2.1. Sladění typu plastu s technologií .....

***3. Environmentální a ekonomické důsledky*** .....

**3.1. Metodika LCA** .....

**3.2. Energetické zatížení** .....

**3.3. Ekonomické zatížení** .....

***4. Použití v praxi*** .....

4.1. Příklady použití v praxi .....

4.2. Výzvy spojené s praktickým použitím .....

4.3. BAT pro chemickou recyklaci plastů .....

***5. Chemická recyklace plastů v ČR*** .....

**5.1. Přehled firem zabývajících se chemickou recyklací plastů** .....

**5.2. Databáze ParaBAT** .....

***6. Závěr*** .....

***Literatura*** .....

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

# 2. Úvod

Tváří v tvář rostoucí krizi znečištění plastem se svět potýká s miliony tun plastového odpadu, který každoročně zaplavuje skládky a oceány [1]. Rozsáhlé rozšíření plastových materiálů v průběhu minulého století vyvolalo hlubokou environmentální krizi, která se vyznačuje všudypřítomným hromaděním plastového odpadu v suchozemských a mořských ekosystémech po celém světě [2]. Vzhledem k tomu, že produkce plastů stále prudce roste a předstihuje odpovídající pokrok v infrastruktuře pro nakládání s odpady, nebyla naléhavost udržitelných řešení krize znečištění plasty nikdy výraznější [3]. Genezi krize plastového odpadu lze vysledovat až do poloviny 20 století, která se shoduje s nástupem masové výroby a spotřeby syntetických polymerů [4]. Plasty rychle pronikly do různých odvětví a vytlačily tradiční materiály díky své cenové dostupnosti, univerzálnosti a trvanlivosti [5]. Plasty, kdysi označované jako "materiály tisíce použití", splňují požadavky ve všech oblastech, od oděvního a automobilového průmyslu až po výrobu zdravotnického vybavení a elektroniky. Exponenciální růst výroby plastů však předstihl odpovídající pokrok v infrastruktuře pro nakládání s odpady, což zhoršuje šíření plastového odpadu a jeho průvodní dopady na životní prostředí. Podle nejnovějších statistických údajů se v současné době na celém světě vyrábí více než 450 milionů tun plastů, což znamená, že celosvětová produkce plastů se jen za posledních dvacet let zdvojnásobila [6], [7]. V roce 2022 činila výroba plastů v Evropě celkem 58,7 milionu tun, což je oproti předchozímu roku pokles o téměř dva miliony tun [8]. Největší podíl na výrobě v Evropě má polymer PP (polyproylen) s 19,2 %, následuje PE se 17,2 % [9]. Polovinu všech plastových odpadů tvoří obalové plasty [10]. Polovina plastů shromážděných k recyklaci se vyváží ke zpracování do zemí mimo EU. Mezi důvody vývozu patří nedostatek kapacit, technologií nebo finančních prostředků na zpracování odpadu na místě [11]. V minulosti značná část plastového odpadu vyváženého z EU směřovala do Číny. Je však pravděpodobné, že s tím, jak Čína zavádí přísnější předpisy na dovoz plastového odpadu, bude vývoz z EU dále klesat. Tato situace vyvolává obavy ze zvýšeného spalování a skládkování plastového odpadu v Evropě. Hlavním cílem vývozu plastového odpadu z Evropské unie v roce 2021 bylo Turecko s objemem 395 000 tun. Na druhém místě se v tomto roce umístila Malajsie, která z členských států EU přijala více než 133 000 tun plastového odpadu [12]. Pokud jde o EU, společnost Plastics Europe odhaduje, že z 30 milionů tun plastového odpadu vyprodukovaného ročně je 35 % účinně předáno k recyklaci a zbytek ke spalování s energetickým využitím (42 %) nebo ke skládkování (23 %). Kromě toho se Evropská komise rozhodla zakázat vývoz odpadu do zemí mimo

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Evropskou unii tím, že přezkoumala nařízení o přepravě odpadů. Dále je zakázáno přepravovat plastový odpad do zemí, jako je Malajsie, Thajsko a Indonésie [13]. Vývoz plastového odpadu do rozvojových zemí navíc prohlubuje nespravedlnost v oblasti životního prostředí a zdůrazňuje vzájemnou provázanost globálních systémů nakládání s odpadem [14].

V současné době existuje na světě mnoho různých druhů plastů a jejich sloučenin, z nichž každá má své jedinečné vlastnosti [15]. Nejběžnějším klasifikačním systémem pro plasty je identifikační kód pryskyřice (RIC) [16]. Mezi nejznámější patří polyethylen (PE), který může být vyráběn v různých hustotách v závislosti na požadovaných vlastnostech výrobku, polypropylen (PP), polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC), akrylonitril-butadien-styren (ABS), polykarbonát (PC) [17]. Poptávka po zpracovatelích plastů v Evropské unii (EU-27 + 3) činila v roce 2021 celkem 50,3 milionu tun. Z tohoto celkového množství připadalo na PP 10 milionů metrických tun. Druhým nejžádanějším polymerem v EU-27 byl v tomto roce polyethylen o nízké hustotě (LDPE) a lineární LDPE [18]. Trvanlivost a stálost plastů usnadňuje jejich rozsáhlé šíření, přičemž jejich fragmenty se hromadí ve vzdálených prostředích, od polárních ledovců až po hlubokomořské příkopy [19]. Kromě toho požití plastových úlomků mořskými organismy a suchozemskými volně žijícími živočichy způsobuje nejen fyzické poškození, ale také usnadňuje bioakumulaci toxických znečišťujících látek, čímž zesiluje ekologické poruchy a ohrožuje lidské zdraví [20]. Stupňující se rozsah znečištění plasty podtrhuje naléhavost zavedení udržitelných řešení ke zmírnění jejich dopadů na životní prostředí a k podpoře přechodu na oběhové a regenerativní hospodářství plastů [21]. Cílem politiky EU v oblasti odpadů je vytvořit oběhové hospodářství, v němž se materiály a zdroje udrží v ekonomice co nejdéle a v němž je odstraňování odpadů poslední možností nakládání s odpady [22]. V současné době existují tři hlavní způsoby zpracování odpadu: chemické, mechanické a energetické využití. Rozdíl mezi těmito metodami spočívá v tom, že chemická recyklace zahrnuje rozklad chemické struktury plastových polymerů na jejich složkové monomery, zatímco mechanická recyklace se zaměřuje na fyzikální zpracování plastů bez změny jejich chemické struktury. Pokud jde o druhou metodu, k energetickému využití dochází spalováním plastového odpadu. Maximální množství plastového odpadu, které lze vytřídit a mechanicky zpracovat, se odhaduje na 29-45 % [23]. Tradiční metody recyklace jsou nedostatečné a často vedou spíše k downcyklaci nebo spalování než k účinné recyklaci [24]. Toto dilema zhoršuje emise skleníkových plynů a přispívá ke změně klimatu. Problém ještě zhoršuje skutečnost, že recyklační toky jsou často kontaminovány, což zhoršuje kvalitu recyklovaných materiálů [25]. Účinnost mechanické recyklace závisí na faktorech, jako je kvalita shromážděných plastů a použité techniky třídění. Nejúčinnější je u některých typů plastů, jako jsou PET, HDPE a PP [26]. Mechanická recyklace je sice cenná, ale naráží na omezení při účinném zvládání některých technických problémů spojených s plastovým odpadem

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

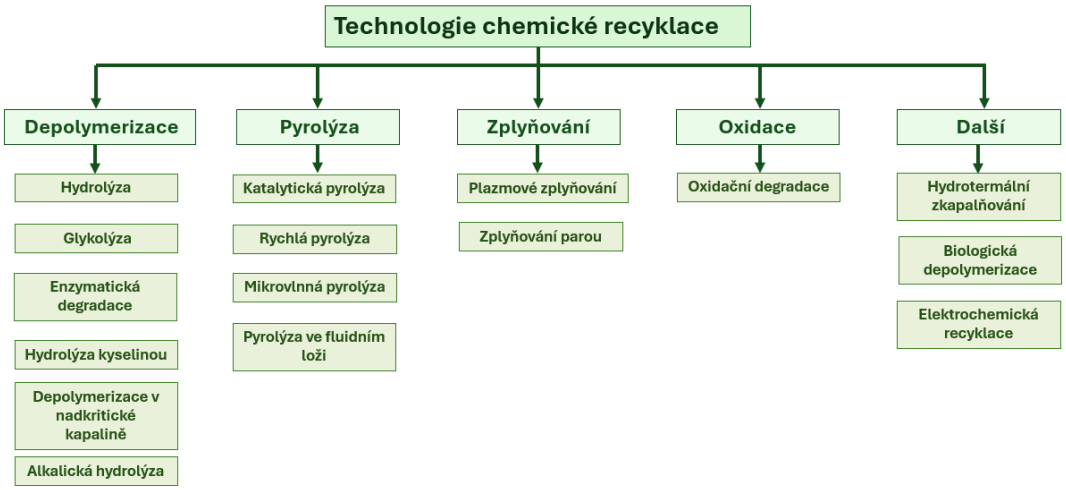
[27]. Procesu brání nemožnost nakládat se smíšenými nebo kontaminovanými plasty [28]. Recyklovaný plast získaný mechanickou recyklací není tak kvalitní jako primární plast. Může mít nečistoty, sníženou pevnost a barevné odchylky [29]. Kromě toho může mechanická recyklace některých polymerů vést ke zhoršení jejich vlastností, což je činí méně vhodnými pro vysoce hodnotné aplikace [30]. Mechanické zpracování zpracovává oddělený proud jednoho polymeru, který je promyt, granulován a poté znovu extrudován, aby se získaly recyklované pelety připravené k použití [31]. Kvůli těmto omezením je obtížné dosáhnout systému uzavřeného cyklu pro všechny druhy plastového odpadu [32]. Nedostatečnost stávajících postupů nakládání s odpady podtrhuje nutnost inovativních přístupů k recyklaci plastů, jako je chemická recyklace, které nabízejí potenciál uvolnit hodnotu z plastového odpadu a podpořit oběhovost v hodnotovém řetězci plastů. V tomto dynamickém prostředí se chemická recyklace jeví jako klíčový hráč při hledání udržitelnějšího a účinnějšího přístupu k řešení globální krize plastového odpadu [33]. Chemická recyklace jako koncept se vyvíjí již několik desetiletí, ale její zvýšená pozornost a přijetí jsou novější. Procesy chemické recyklace založené na depolymerizaci a zpracování suroviny rozkládají dlouhé uhlovodíkové řetězce v plastu na kratší uhlovodíkové frakce nebo monomery prostřednictvím chemických, tepelných nebo katalytických procesů. Pomocí chemického zpracování lze plastový odpad přeměnit na plnohodnotný tržní produkt, který lze využít například v palivářském průmyslu a slouží jako alternativa k běžně používaným zemědělským produktům (biokomponenty) [34].

Celosvětová krize znečištění plastem je charakterizována rychlým růstem výroby plastů, který převyšuje kapacitu infrastruktury pro nakládání s odpady, a také hromaděním milionů tun plastového odpadu na skládkách a v oceánech. Nedostatky tradičních metod likvidace, zejména mechanické recyklace, často vedou k tomu, že se odpad spaluje nebo skládkuje, což zhoršuje problémy životního prostředí a přispívá k emisím skleníkových plynů. Vývoz plastového odpadu z EU, který je způsoben nedostatkem místních zpracovatelských kapacit, zkomplikovalo zavedení omezení dovozu plastů v zemích, jako je např. Za slibný alternativní přístup se považuje chemická recyklace, která zahrnuje rozklad polymerů na monomery a přeměnu odpadu na užitečné výrobky, i když se potýká s technickými a ekonomickými problémy. Potřeba zavést udržitelná řešení je klíčovým faktorem pro snížení negativního dopadu plastů na životní prostředí a vytvoření oběhového hospodářství v oblasti recyklace plastů.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

# 2. Technologie chemické recyklace

Chemická recyklace zahrnuje přeměnu plastových polymerů na menší molekuly nebo monomery prostřednictvím různých chemických procesů. Cílem těchto procesů je rozložit dlouhé řetězce polymerů, které se nacházejí v plastovém odpadu, což umožňuje získat cenné zdroje, které lze využít k výrobě nových materiálů nebo paliv. V současné době již existuje značné množství metod chemické recyklace. Klasifikace technologií chemické recyklace zahrnuje jejich rozdělení do kategorií na základě různých kritérií, jako je typ chemických reakcí, vstupní materiály, podmínky procesu a dopad na životní prostředí. V této práci jsme známé techniky klasifikovali podle typu chemické reakce. Výsledky klasifikace jsou uvedeny na obrázku 1.




Obrázek 1. Klasifikace technologií chemické recyklace plastů podle typu chemické reakce.

## 4.1. Současné metody chemické recyklace plastů

Na rozdíl od mechanické recyklace, která obvykle vede ke snížení kvality materiálu (tzv. "downcycling"), chemická recyklace umožňuje získat čisté suroviny, které lze znovu použít k výrobě plastů stejné kvality. Tímto způsobem může chemická recyklace přispět k uzavření koloběhu materiálů a snížení závislosti na primárních surovinách, jako je ropa.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.1 Hydrolýza

Hydrolýza plastů obvykle zahrnuje rozbití esterových vazeb přítomných v polymerních řetězcích, což vede ke vzniku příslušných monomerů. Hydrolýza je heterogenní reakce, která probíhá na povrchu materiálu [35]. Nejtypičtějším produktem hydrolýzy je PET. Proces této technologie je ovlivněn mnoha faktory. Výsledný efekt závisí na použitém katalyzátoru, teplotě, tlaku a velikosti plastových části [36]. Provozní teplota této technologie se pohybuje od 150 °C do 300 °C [37]. Pro tento proces je charakteristické použití katalyzátorů, jako je kyselina sírová, kyselina chlorovodíková, oxidy kovů (např. TiO2, ZnO, MgO) a zeolity (např. ZSM-5) [38]. Důležité je také prostředí hydrolýzy, které může být kyselé, zásadité nebo neutrální [39]. Neutrální hydrolýza je považována za nejšetrnější k životnímu prostředí, protože nevyžaduje použití agresivních chemických látek, protože reakce probíhá při pH blízkém neutrálnímu [40]. Neutrální hydrolýzu lze provádět při nižších teplotách ve srovnání s kyselou nebo zásaditou hydrolýzou, které často vyžadují vyšší teploty k usnadnění reakce, což vede k větší energetické účinnosti [41]. Neutrální hydrolýza však nezohledňuje mechanické nečistoty v PET odpadu, což vede k tomu, že konečný produkt obsahuje více nečistot než produkt získaný alkalickou hydrolýzou [42]. Hlavními produkty hydrolýzy jsou kyselina tereftalová, ethylenglykol a diethylenglykol [43]. Ucelenější přehled výstupních produktů získaných chemickou recyklací je uveden v tabulce 1.

### 2.1.2. Glykolýza

Glykolýza zahrnuje depolymeraci plastů, typicky PET, prostřednictvím řady chemických reakcí [44]. Při glykolýze se polymer PET rozkládá na molekulární úrovni za přítomnosti transesterifikačního katalyzátoru. Nejčastěji používané glykoly pro tento účel jsou ethylenglykol, diethylenglykol, propylenglykol a dipropylenglykol za účasti: katalytické, rozpouštědlem asistované, superkritické a mikrovlnné glykolýzy [45]. Esterové vazby v PET se štěpí, což vede ke vzniku EG a TPA nebo jeho derivátů jako reakčních produktů [46]. Úspěch glykolýzy závisí do značné míry na optimalizaci provozních podmínek, včetně teploty, tlaku, reakční doby a poměru reaktantů [47]. Obvykle se glykolýza provádí při zvýšených teplotách od 150 °C do 250 °C, za atmosférického nebo mírně zvýšeného tlaku [48]. Katalyzátor je jedním z nejdůležitějších faktorů v procesu glykolýzy PET [49]. Běžně se používají katalyzátory jako octan zinečnatý, oxid antimonitý, oxid titaničitý, oxid zinečnatý a zeolity [50]. Vývoj účinných katalyzátorů a strategií optimalizace procesu je nezbytný pro zvýšení

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

ekonomické životaschopnosti a škálovatelnosti technologií glykolýzy [51]. Reakční doba se může pohybovat od několika hodin až po dny v závislosti na konkrétním návrhu procesu a požadovaných výsledcích [52]. Monomery získané z glykolýzy lze využít jako stavební bloky pro syntézu nových polymerů nebo speciálních chemických látek, čímž se uzavírá smyčka koloběhu plastových materiálů [53].

### 2.1.3. Enzymatická degradace

Tato metoda využívá specifické enzymy k rozkladu polymerní struktury plastů na menší, lépe zpracovatelné molekuly, které lze dále zpracovat na užitečné výrobky [54]. Úspěch enzymatické degradace do značné míry závisí na výběru vhodných enzymů [55]. Enzymy katalyzují štěpení esterových vazeb, což vede k fragmentaci polymerních řetězců na menší oligomerní fragmenty [56]. Enzymy, jako jsou lipázy, proteázy a esterázy, prokázaly slibnou aktivitu při rozkladu různých typů plastů, včetně PET, PE a PP [57]. Optimalizace reakčních podmínek je nezbytná pro maximalizaci účinnosti enzymatické degradace při současném zajištění zachování aktivity enzymů [58]. Klíčové parametry, včetně teploty, pH, koncentrace substrátu a koncentrace enzymu, jsou pečlivě regulovány, aby se usnadnila optimální enzymová aktivita a přístupnost substrátu [59]. Teplotní rozmezí pro enzymatickou degradaci se obvykle pohybuje od 20 °C do 60 °C v závislosti na konkrétních použitých enzymech, zatímco optimální pH se liší podle vlastností enzymu a zahrnuje kyselé až zásadité podmínky [60]. Monomerní jednotky získané z enzymatické degradace slouží jako prekurzory pro syntézu nových polymerů, biopaliv nebo chemických surovin prostřednictvím polymeračních reakcí [61]. Dimery a oligomery získané enzymatickou degradací nacházejí uplatnění jako chemické meziprodukty nebo přísady v různých průmyslových procesech [62]. Stojí také za zmínku, že tato metoda se ukazuje jako slibná při řešení problému hromadění textilního odpadu, zejména při enzymatické degradaci přírodních vláken v tkaninách z polyesteru a bavlny za účelem získání polyesterových [63]. Při tomto procesu se k enzymatické degradaci používají specifické enzymy, jako jsou celulázy, které mohou rozkládat přírodní vlákna, jako je bavlna (složená z celulózy), přičemž polyester zůstává neporušený [64]. Jeho průmyslové využití však vyžaduje další výzkum a optimalizaci.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.4. Kyselá hydrolýza

Kyselá hydrolýza plastů, zejména polymerních materiálů, jako je PET nebo PS, spočívá v rozkladu dlouhých polymerních řetězců na menší molekuly působením silných kyselin za přítomnosti vody [65]. Silné kyseliny, jako je kyselina sírová nebo kyselina chlorovodíková, protonují atomy kyslíku v těchto vazbách, což vede ke vzniku hydroxylových skupin [66]. Následná hydrolýza těchto modifikovaných vazeb vodou vede ke štěpení polymerních řetězců, čímž vznikají menší molekuly. Kinetika kyselé hydrolýzy je ovlivněna faktory, jako je teplota, koncentrace kyseliny a reakční doba, které určují rychlost a rozsah degradace polymeru. Obvykle se teplota procesu pohybuje v rozmezí 100 °C až 150 °C. Obvykle se používají koncentrované kyseliny. Koncentrace kyseliny je rozhodující a liší se v závislosti na typu plastu a požadované rychlosti reakce [67]. Výstupní produkty obvykle zahrnují menší molekuly, jako jsou monomery, oligomery a fragmenty páteře polymeru [68].

### 2.1.5. Depolymerizace v nadkritické kapalině

Superkritická fluidní depolymerizace je inovativní chemický proces používaný k rozkladu plastů na jejich monomery nebo jiné cenné chemické produkty s využitím superkritických kapalin jako média [69]. Mezi běžné nadkritické kapaliny používané při SCFD patří oxid uhličitý a voda [70]. Při SCFD slouží nadkritická kapalina jako rozpouštědlo i jako reaktant [71]. Nadkritická kapalina proniká do polymerní matrice, bobtná a snižuje její viskozitu. To umožňuje interakci kapaliny s polymerními řetězci, což vede ke štěpení páteře polymeru a vzniku menších molekul, jako jsou monomery nebo oligomery [72]. SCFD se obvykle provádí při teplotách vyšších než kritická teplota superkritické kapaliny, která se pohybuje v rozmezí 100 °C až 400 °C [73]. Tlak se udržuje nad kritickým tlakem nadkritické kapaliny, obvykle v rozmezí 70 až 300 barů [74]. Ke zvýšení rychlosti a selektivity depolymerizační reakce lze použít katalyzátory. Mezi běžné katalyzátory patří oxidy kovů, zeolity a kyselé/bazické katalyzátory [75].

### 2.1.6. Alkalická hydrolýza

Alkalická hydrolýza je podobná výše popsaným procesům hydrolýzy, liší se pouze tím, že v tomto případě dochází k rozkladu polymerních materiálů pomocí alkálií. V případě kyselé hydrolýzy působí kyseliny jako katalyzátory, které zvyšují protonizaci funkčních skupin polymeru, zatímco při alkalické hydrolýze působí zásady jako nukleofily, které atakují specifické atomy v polymeru, jako je například

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

atom karbonylu, což vede ke štěpení vazeb a vzniku nových produktů. Při tomto procesu se rozdrcený plast smísí s alkalickým roztokem a po dokončení reakce se směs ochladí a výsledné produkty se oddělí filtrací [76]. Alkalickou hydrolýzou plastových materiálů, zejména PET, vznikají především dva důležité produkty: ethylenglykol a kyselina tereftalová [77]. Účinnost tohoto procesu závisí na koncentraci alkalického roztoku a použitém systému rozpouštědel [78]. Studie [79], [80] například ukázaly, že v přítomnosti polárního aprotického rozpouštědla a malého množství vody se rozklad nenasycené polyesterové pryskyřice na cenné suroviny, jako jsou produkty obsahující karboxylát, výrazně zvyšuje díky úloze rozpouštědla při fragmentaci polymerní sítě. Podobně optimalizace reakčních podmínek, jako je teplota a složení rozpouštědla, může vést k vysokým výtěžkům TPA a EG, přičemž některé studie dosahují až 95% konverze za mírných podmínek. Hlavními parametry ovlivňujícími proces jsou teplota, která se obvykle pohybuje v rozmezí 150 °C až 200 °C, tlak 2 až 3 MPa a doba trvání reakce 1 až 6 hodin [76], [81], [82], [83], [84]. Nastavení všech těchto parametrů samozřejmě závisí na použité zásadě. Typickými zásadami pro tento proces jsou hydroxid sodný, hydroxid draselný a hydroxid amonný [85]. Výběr konkrétní zásady pro alkalickou hydrolýzu závisí na požadovaných vlastnostech procesu a konečných produktů s ohledem na specifika materiálů a technické požadavky [86].

### 2.1.7. Katalytická pyrolýza

Katalytická pyrolýza zahrnuje tepelný rozklad plastových materiálů za přítomnosti katalyzátoru. Katalytická pyrolýza závisí na faktorech, jako je teplota, doba zdržení, složení vstupní suroviny a katalyzátor [87]. Je zřejmý silný vliv reakční teploty a doby zdržení na výstupní produkty pyrolýzy. Teplota typická pro proces pyrolýzy se pohybuje v rozmezí 400 °C až 600 °C [88]. Doba zdržení obvykle závisí na různých faktorech, včetně konstrukce reaktoru, provozních podmínek a konkrétního použitého katalyzátoru [89]. Obvykle se doba retence pohybuje v rozmezí 20 až 60 minut [90], [91]. Výstup produktu závisí na použité vstupní surovině, jejíž charakterizací lze do určité míry předpovědět distribuci produktu [92]. V porovnání s pyrolýzou jednotlivých plastů se při pyrolýze směsných plastů získá méně než 50 % hmot. ropného produktu, který může být z hlediska kvality rovnocenný [93]. Mezi použité katalyzátory lze zařadit FCC, HZSM-5, zeolit-ß, Fe2O3, přírodní zeolit, červené bahno [94], [95], [96], [97]. Vyrobené kapalné palivo má potenciál pro využití v několika energetických aplikacích, jako je výroba elektřiny, palivo pro dopravu a pro topné účely, jeho průměrná HHV (vyšší výhřevnost) je 40 MJ/kg [98].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.8. Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza plastů obvykle probíhá při teplotách mezi 500 °C a 800 °C, s odchylkami v závislosti na typu plastu a specifičnosti použité technologie [99]. Rychlá pyrolýza zahrnuje rychlý tepelný rozklad plastových materiálů za nepřítomnosti kyslíku. Tento typ pyrolýzy obvykle probíhá při vyšších teplotách a relativně krátké době zdržení (od sekund do minut) [100]. V tomto případě je důležitá rychlost zahřívání plastů, přičemž průměrná hodnota je 50 °C $min^{-1}$ [101]. Mezi primární produkty rychlé pyrolýzy patří pyrolýzní olej, který lze dále zpracovat na dopravní palivo, pevný zbytek nebo dřevěné uhlí, směs plynů zahrnující vodík, metan, oxid uhelnatý a oxid uhličitý, kterou lze využít pro výrobu tepla a energie nebo jako chemickou surovinu [102]. Stejně jako v jiných případech hodně záleží na složení vstupní suroviny a kvalitě získaných produktů. Vzhledem k vysokým teplotám potřebným k provedení procesu je tato technologie poměrně energeticky náročná. Mezi výhody této metody chemické recyklace lze uvést její poměrně vysokou účinnost. Pokud jde o nevýhody, patří k nim vysoká energetická náročnost [103].

### 2.1.9. Mikrovlnná pyrolýza

Mikrovlnné záření se používá k vytváření tepla v plastovém materiálu interakcí elektromagnetických vln s polárními molekulami přítomnými v plastu [104]. Mikrovlnné záření rovnoměrně ohřívá látku jako celek, místo aby zpočátku ohřívalo vnější povrch, jak je tomu u konvenčního ohřevu [105]. V tomto případě je kritickým parametrem úroveň výkonu mikrovlnného záření, která určuje rychlost ohřevu a rozložení teploty uvnitř plastového materiálu [106]. Vyšší úrovně výkonu vedou k rychlejšímu ohřevu, ale mohou také vést k lokálnímu přehřátí a tepelné degradaci [107]. Hlavními výstupními produkty jsou plyn, olej, vosk a olej + vosk [108]. Charakteristická teplota pro tento proces se pohybuje od 400 °C do 1200 °C. Přesné řízení teploty pyrolýzy je nezbytné pro optimalizaci výtěžku a kvality produktu [109]. Při mikrovlnné pyrolýze je na 1 tunu plastu potřeba v průměru 1389 kWh energie [110]. Pro tento proces jsou rovněž charakteristická aditiva, jako je karbid křemíku nebo aktivní uhlí, která se používají v poměru 5-20 % ke vstupní surovině. Tyto přísady zvyšují absorpci mikrovln, čímž zajišťují účinnější a rovnoměrnější ohřev [111]. Jednou z nevýhod této metody je její silná závislost na dielektrických vlastnostech materiálu [112].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.10. Pyrolýza ve fluidním loži

Pevné částice (obvykle písek, oxid hlinitý nebo oxid křemičitý) jsou fluidizovány proudem plynu (obvykle dusíku nebo páry) proudícím vzhůru reaktorem. Vysoká plocha povrchu a těsný kontakt mezi pevnými částicemi a plastovou surovinou podporují rychlý a účinný ohřev, což vede k rychlejší pyrolýze [113]. Při této metodě dochází k tepelnému rozkladu plastových materiálů za nepřítomnosti kyslíku při zvýšených teplotách (obvykle od 400 °C do 800 °C) uvnitř reaktoru s pseudotekutou vrstvou [114]. Záleží na velikosti pevných částic; menší a hustší částice zajišťují lepší fluidizaci a přenos tepla, zatímco větší částice mohou vést ke špatnému míchání a distribuci tepla [115]. Doba setrvání plynu v reaktoru, známá také jako doba setrvání plynu, ovlivňuje rozsah pyrolýzních reakcí a výtěžky produktů. Řídí se nastavením parametrů, jako je průtok plynu, geometrie reaktoru a distribuce velikosti částic [116]. Ačkoli měrný příkon je různý, typické malé až střední provozy mohou spotřebovávat přibližně 50 kW až 500 kW v závislosti na rozsahu a výkonu. Spotřebovaná energie byla ovlivněna teplotou a hmotnostním tokem vstupního materiálu. Na druhou stranu, jelikož spotřeba energie závisí na množství reagujícího krmiva, vyšší toky krmiva rozdělovaly teplo mezi větší množství hmoty, čímž se snižovala energie spotřebovaná na kilogram vyrobeného benzinu [117]. Spotřeba je menší a souvisí především s chladicími a kondenzačními systémy. Hlavními výstupními produkty jsou pyrolýzní olej, nekondenzovatelné plyny a biochar [118]. Mezi perspektivami této metody lze vyzdvihnout flexibilitu a škálovatelnost. Tento proces lze přizpůsobit různým provozním měřítkům a podmínkám potřebným pro získání produktů požadované kvality [119].

### 2.1.11. Plazmové zplyňování

Plazmové zplyňování je alotermický proces zplyňování, při němž teplo potřebné pro endotermické reakce dodává tepelné plazma, obvykle generované stejnosměrnými obloukovými plazmovými hořáky [120]. Při kontaktu odpadu s tepelným plazmatem se jeho organická frakce přeměňuje na synplyn a anorganická frakce se přeměňuje na vitrifikovanou strusku [121]. Tento proces probíhá při extrémně vysokých teplotách, obvykle v rozmezí 3000 °C až 8000 °C [122]. Na výstupu se získává syntetický plyn a struska [123]. Spotřeba energie se může pohybovat od 800 do 950 kWh na tunu zpracovaného odpadu [124]. V závislosti na vstupním množství odpadu a požadované kvalitě syntézního plynu lze k úpravě chemických reakcí a vlastností strusky použít přísady, jako je vápno nebo zdroje uhlíku [125]. Výhody této metody spočívají ve schopnosti pracovat prakticky s jakýmkoli

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

druhem odpadu. Nevýhodou však je, že tato technologie vyžaduje značnou spotřebu energie a značné počáteční investice.

### 2.1.12. Parní zplyňování

Parní zplyňování plastů zahrnuje použití páry k rozkladu plastového odpadu při vysokých teplotách, obvykle mezi 600 °C a 1200 °C, v kontrolovaném kyslíkovém prostředí [126]. Výstupem je synplyn, který se skládá z přibližně 20 % vodíku a 20 % oxidu uhelnatého, zbytek tvoří CO2 a další plyny. Synplyn se používá v chemické syntéze, při výrobě energie a jako průmyslové palivo [127]. Účinnost přeměny uhlíku může dosahovat až 91 %, přičemž objemové emise oxidu uhličitého jsou za optimálních podmínek pouhých 15 % [128]. Pro zlepšení kvality výstupních produktů se přidávají katalyzátory, jako je draslík, lithium nebo nikl [129]. Ve srovnání s pyrolýzou si zplyňování poradí s rozmanitějším spektrem vstupních surovin a pracuje s vyšší účinností, potenciálně s více než 80 % při tepelné konverzi.

### 2.1.13. Oxidační degradace

Oxidační degradace plastů znamená chemický rozklad plastových materiálů reakcí s kyslíkem [130]. Tento proces rozkládá velké polymerní řetězce na jednodušší sloučeniny. Ačkoli ne vždy vede ke vzniku původních monomerů, stále se jedná o chemickou přeměnu plastů. Tento proces lze urychlit přidáním látek, jako je stearan železitý, běžný pomocný prostředek fotooxidace. Degradace začíná štěpením vazeb uhlík-vodík a uhlík-uhlík v polymerních řetězcích, což vede ke vzniku různých reaktivních radikálů, jako jsou primární alkylové makroradikály a vodíkové radikály. Tyto radikály po reakci s kyslíkem znamenají přechod materiálu do fáze oxidační degradace, při níž vznikají četné funkční skupiny obsahující kyslík a snižuje se molekulová hmotnost polymeru [131]. Oxidační degradace plastů obvykle probíhá při teplotách od 30 °C do 150 °C [132]. Účinnost procesu je ovlivněna typem plastu, teplotou, dobou zdržení a katalyzátory [133]. Za katalyzátory lze považovat TiO2 a ZnO, které přispívají k degradaci plastových polymerů vlivem světla [134]. Obecně tento proces vede ke vzniku menších molekul, jako jsou monomery, oligomery a polymery se sníženou molekulovou hmotností, a také různých typů skupin obsahujících kyslík, jako jsou karboxylové kyseliny, aldehydy a alkoholy. Při složitějších oxidačních procesech, zejména těch, které zahrnují fotokatalýzu, mohou konečné produkty kromě výše uvedených sloučenin zahrnovat vodu, oxid uhličitý a minerální kyseliny [135].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

### 2.1.14. Hydrotermální zkapalňování

Hydrotermální zkapalňování je proces, který se objevil při valorizaci biomasy a lze jej použít i na plastový odpad za účelem energetického využití a získání chemických produktů [136]. Hydrotermální zkapalňování obvykle probíhá při teplotách od 250 °C do 374 °C. Optimální rychlosti konverze se často dosahuje mezi 300 °C a 350 °C při udržování vysokého tlaku mezi 10 a 25 MPa [137]. Výstupními produkty tohoto procesu jsou surový bioolej, biochar a plyny [138]. Vzhledem k požadavku na vysoké teploty je tento proces poměrně energeticky náročný [139]. Nevýhodou této metody je, že kontrola vedlejších produktů, zejména z vodné fáze, obvykle vyžaduje další stupně zpracování [140]. Účinnost hydrotermálního zkapalňování plastů je ovlivněna teplotou, tlakem, poměrem vody a plastu, dobou zdržení a samozřejmě různými typy katalyzátorů [141], [142].

### 2.1.15. Biologická depolymerizace

Biologická depolymerizace plastů je proces, který využívá především enzymy k rozkladu plastů na jejich monomerní formy za mírných podmínek [143], [144]. Tato metoda je účinná zejména u plastů, jako je PET [145]. Enzymy, jako je PETasa a její varianty, mohou katalyzovat hydrolýzu PET, účinně štěpit esterové vazby a přeměnit plast zpět na původní monomery, jako je ethylenglykol a kyselina tereftalová [146]. Biologická depolymerizace obvykle probíhá při mírných teplotách, 28-50 °C [147]. Mezi hlavní přísady patří specifické enzymy a někdy mírné chemické látky pro předběžnou úpravu, aby se zvýšila citlivost substrátu k enzymatickému působení [148]. Typickými výstupními produkty jsou monomery, jako je ethylenglykol a kyselina tereftalová z PET [149]. Mezi hlavní výhody patří nižší energetické nároky, zatímco nevýhodou je nižší míra depolymerizace a potenciální neúčinnost při rozkladu odolnějších polymerů bez důkladné předúpravy [150]. Za zmínku také stojí, že biologická depolymerizace je příbuznou metodou enzymatické degradace. Obě metody zahrnují použití biologických systémů k usnadnění rozkladu materiálů. Dalo by se říci, že se tyto dvě metody vzájemně doplňují: enzymy mohou urychlit rozklad, zatímco biologické systémy poskytují prostředí a další mechanismy pro proces rozkladu [151]. Z technického hlediska spočívá rozdíl mezi biologickou depolymerizací a enzymatickým rozkladem v mechanismech a podmínkách, za nichž probíhají. Konkrétně enzymatická degradace zahrnuje použití specifických enzymů, které katalyzací určitých chemických reakcí rozkládají polymery na monomery nebo oligomery. Naproti tomu biologická depolymerizace zahrnuje chemické nebo mikrobiologické děje, včetně enzymatické degradace [152],

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[153]. Enzymatická degradace je ve srovnání s biologickou depolymerizací specifičtější a řízenější proces, ale ta má širší rozsah podmínek, za nichž může probíhat. Zanedbávat některou z těchto metod by nebylo moudré, protože každá z nich je rozhodující pro účinnou recyklaci polymerů za různých podmínek a poskytuje komplexní přístup.

### 2.1.16. Elektrochemická recyklace

Jádrem tohoto procesu jsou elektrochemické reakce, při nichž se polymery rozkládají na menší molekuly nebo dokonce monomery. Tento proces začíná čištěním a drcením plastu, který je poté umístěn do elektrochemické komory obsahující vhodné rozpouštědlo a elektrolyt. Poté se přiloží napětí a plast na elektrodách podléhá oxidačním nebo redukčním reakcím [154]. Účinnost tohoto procesu závisí na materiálu a konstrukci elektrody, typu elektrolytu, parametrech napětí a proudu, teplotě, tlaku a samozřejmě na předběžné úpravě plastového odpadu [155]. Charakteristické pro tento proces jsou teploty v rozmezí 350 °C až 500 °C [156]. Výstupem elektrochemické recyklace plastů jsou cenné chemické látky, jako je tereftalát a mravenčan, získané z PET [157].

## 2.2. Porovnání technologií

Chemická recyklace plastů představuje inovativní způsob, jak zvládnout stále rostoucí množství plastového odpadu. Mezi nejběžnější metody patří pyrolýza, depolymerizace, zplyňování a solvolýza. Každá z těchto technologií má své silné stránky, ale i slabiny. Abychom mohli určit, která technologie je nejvhodnější pro konkrétní aplikace, je nutné je porovnat podle několika klíčových kritérií.

### 2.2.1. Výstupní produkty

Na rozdíl od mechanické recyklace, která často vede ke ztrátě kvality materiálu, chemická recyklace rozkládá plasty na základní chemické složky. Výstupní produkty těchto procesů se mohou lišit v závislosti na zvolené technologii, ale obecně lze výsledné látky rozdělit do několika hlavních kategorií.

Tabulka 1. Výstupní produkty procesů chemické recyklace plastů

| Způsob | Pevný (s) | Kapalina (l) | Plynný (g) | Použití |
|---|---|---|---|---|

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **recyklace** | | | | |
| **Hydrolýza** | Pet vločky (zbytky kyseliny tereftalové, pevné nečistoty) | Kyselina tereftalová, ethylen a diethylenglykol | N/a (někdy oxid uhličitý, metan) | S - zpětně získaný a znovu použitý při výrobě nového domácího mazlíčka.<br><br>L - používá se jako surovina pro syntézu nových polymerů, jako nemrznoucí směs atd.<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Glykolýza** | Zbytky pevných nečistot (polyuretany), nezreagované fragmenty domácích zvířat | Bhet (bis(2-hydroxyethyl)tereftalát) monomer a přebytečný glykol | N/a | S - plniva nebo zpevňující látky pro použití v nových výrobcích z pufru.<br><br>L - používá se při syntéze nových materiálů pro domácí zvířata. |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Enzymatická degradace** | Oligomerní polymerní fragmenty | Kyselina tereftalová, ethylenglykol a organické kyseliny | Může obsahovat oxid uhličitý a v některých případech metan a h2o, | Monomery a oligomery mohou být repolymerizovány nebo využity při syntéze nových materiálů, alkoholy a organické kyseliny mohou sloužit jako prekurzory v chemickém průmyslu a plynné vedlejší produkty přispívají ke koloběhu uhlíku, ať už jsou přirozeně zachyceny nebo uvolněny do atmosféry. |
| **Kyselá hydrolýza** | Uhlíkové uhlíky bohaté na uhlík | Kyselina tereftalová, menší oligomery také oleje nebo vosky | Zahrnují vodík, metan, oxid uhličitý a | S - používá se například jako plnivo do stavebních materiálů nebo |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | jiné lehké uhlovodíky. | jako prekurzor pro výrobu aktivního uhlí.<br><br>L - opětovné použití při výrobě nových plastových materiálů. Oleje nebo vosky rafinované na syntetická maziva nebo používané jako palivo.<br><br>G - používá se jako zdroj energie. |
| **Depolymerizace v nadkritické kapalině** | Nezreagovaný pet, pevné uhlíkové zbytky (dřevěné uhlí) | Ropa (uhlovodíky podobné naftě) | Vodík, metan a oxid uhličitý, ethylen, rropylen | S - výplňový materiál v konstrukci.<br><br>L - používá se jako směsný benzin, surovina pro chemickou výrobu nebo pro přímé použití jako palivo. |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | G - používá se jako zdroj energie. |
| **Alkalická hydrolýza** | Nezreagovaný polymer | etylenglykol, kyselina tereftalová, aprolaktam | Čpavek, oxid uhličitý | S - zpětně získaný a znovu použitý při výrobě nového domácího mazlíčka.<br><br>L - používá se jako surovina pro syntézu nových polymerů, jako nemrznoucí směs atd.<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Katalytická pyrolýza** | Char | Kapalné uhlovodíky (alkany, alkeny, alkeny řady $C_5$ -$C_{20}$ ) | Metan, etylen, vodík | S - používá se při výrobě energie nebo jako prekurzor aktivního uhlí<br><br>L - používá se jako kapalné palivo pro vznětové motory |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | nebo se dále rafinuje na vysoce hodnotné chemikálie.<br><br>G - používá se pro energii a syntézu. |
| **Rychlá pyrolýza** | Dřevěný uhlík (pevný uhlík, především saze) | Pyrolýzní olej (směs alkanů, alkenů, aromatických uhlovodíků) | Synplyn ($H_2$ , CO, $CO_2$ , CH )$_4$ | S - lze dále zpracovat na aktivní uhlí<br><br>L - rafinovaný na palivo<br><br>G - používá se pro výrobu energie nebo chemickou syntézu. |
| **Mikrovlnná pyrolýza** | Uhlíky (saze, zbytky oxidu křemičitého, pokud jsou přítomny) | Ropa (uhlovodíky $C_5$ - $C_{12}$ ), vosk (uhlovodíky podobné parafínu) | Syngas | S - jako stavební materiál nebo jako prekurzor pro uhlíkové nanotrubičky.<br><br>L - lze použít přímo jako palivo nebo dále rafinovat na |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | chemikálie s vyšší hodnotou.<br><br>G - používá se k výrobě energie. |
| **Pyrolýza ve fluidní vrstvě** | Biochar (uhlíkatý materiál, potenciální stopové kovy) | Pyrolýzní olej ($C_5$ -$C_{20}$ uhlovodíky, dehet) | Syngas | S - používá se jako doplněk půdy nebo palivo<br><br>L - používá se jako chemická surovina nebo k rafinaci na paliva, jako je nafta.<br><br>G - používá se jako energetická nebo chemická surovina. |
| **Plazmové zplyňování** | Vitrifikovaná struska (křemičitany, hlinitokřemičitany, oxidy kovů) | N/a | Synplyn ($h_2$ , CO, $CO_2$ , CH )$_4$ | S - používá se pro stavební materiály<br><br>L -<br><br>G - používá se pro výrobu energie nebo chemickou |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | výrobu |
| **Parní zplynování** | Zbytkový uhlík (pevná látka bohatá na uhlík) | N/a | Syngas | S - používá se jako materiál pro výrobu aktivního uhlí, jako půdní doplněk (biochar) nebo v některých případech dokonce jako tuhé palivo.<br><br>L -<br><br>G - používá se pro chemickou syntézu, výrobu energie nebo jako průmyslové palivo. |
| **Oxidační rozklad** | Částečně oxidované fragmenty polymerů a materiály bohaté na uhlík | Karboxylové kyseliny (např. kyselina octová), laktony, alkoholy, ketony a aldehydy. | Oxid uhličitý, oxid uhelnatý, amoniak a kyanovodík (hcn). | S - výplňový materiál v konstrukci.<br><br>L - mají potenciální využití jako suroviny v chemickém |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | průmyslu<br><br>G - používá se jako zdroj paliva. |
| **Hydrotermální zkapalňování** | Biochar (uhlík, minerální zbytky) | Surový bioolej (mastné kyseliny, fenoly, uhlovodíky) | $CO_2$, lehké uhlovodíky (C -C )14 | S - používá se ke zlepšení půdy<br><br>L - používá se k výrobě paliva<br><br>G - používá se k rekuperaci energie. |
| **Biologická depolymerizace** | Zbytky biomasy (organický materiál, nezreagované polymery) | Kyselina tereftalová, ethylenglykol | Oxid uhličitý, metan | S - používá se jako půdní kondicionér nebo kompost, přispívá k úrodnosti půdy<br><br>L - mohou být dále zpracovány na biopaliva nebo použity při výrobě biochemických látek, jako jsou rozpouštědla nebo prekurzory pro biologicky |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | rozložitelné polymery.<br><br>G - používá se jako zdroj obnovitelné energie. |
| **Elektrochemická recyklace** | Materiály bohaté na uhlík | Zahrnují řadu uhlovodíků, alkoholů, kyselin a esterů. | Vodík, metan, oxid uhelnatý a oxid uhličitý, kyslík z elektrolýzy. | S - výroba aktivního uhlí nebo jako plniva do stavebních materiálů<br><br>L - lze rafinovat na paliva, jako je nafta nebo benzin<br><br>G - lze použít v různých průmyslových procesech nebo jako čisté palivo. |

### 2.2.2. Sladění typu plastu s technologií

Různé druhy plastů mají odlišné chemické složení a fyzikální vlastnosti, což ovlivňuje jejich vhodnost pro konkrétní technologie chemické recyklace. Zatímco některé plasty, jako je PET nebo polystyren, lze efektivně recyklovat depolymerizací či solvolýzou, jiné polymery, například polyolefiny (PE, PP), se lépe zpracovávají pomocí pyrolýzy nebo zplyňování.

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Tabulka 2. Komplexní přehled zkoumaných technologií recyklace plastů

| Technologie | Plastový typ | Výhody | Nevýhody | Společnost | Výhled do budoucnosti |
|---|---|---|---|---|---|
| **Hydrolýza** | PET, PLA, nylon, PC | Vysoká čistota výstupu, recyklace chemikálií | Energeticky náročné | Ioniqa Technologies, Eastman Chemical Company | Optimalizace teploty a katalyzátorů pro úsporu energie |
| **Glykolýza** | PET, PBT, PLA, PC | Obnovení monomerů, nižší energie než při hydrolýze | Problémy s obnovou katalyzátoru | Loop Industries, Indorama Ventures | Vývoj pokročilých katalytických systémů pro zvýšení účinnosti |
| **Enzymatická degradace** | PLA, PET, PBT | Šetrné k životnímu prostředí, nízké teploty | Pomalé reakční rychlosti, škálovatelnost | Carbios, Novozymes | Inženýrské enzymy pro rychlejší a univerzálnější rozklad plastů |
| **Kyselá hydrolýza** | PET, PLA, nylon, PC | Manipulace s kontaminovanými plasty | Žíravý, nebezpečný odpad | BASF, DuPont | Vylepšené systémy pro zpětné získávání kyselin pro bezpečnější zpracování |

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Depolymerizace v nadkritické kapalině** | PET, PU, PS, PC, PLA | Vysoké reakční rychlosti, výtěžnost rozpouštědel | Vysoký příkon energie | Repsol, ExxonMobil | Optimalizace spotřeby energie prostřednictvím alternativních technologií vytápění |
| **Alkalická hydrolýza** | PET, nylon, PUR, PLA | Vysoké výtěžky monomerů, jednoduchá chemie | Žíravý, vyžaduje neutralizaci | Gr3n Recycling, Coca-Cola Company | Vývoj bezpečnějších a škálovatelnějších alkalických systémů |
| **Katalytická pyrolýza** | PE, PP, PET, PS | Přeměna plastů na palivo, nižší energetická náročnost | Deaktivace katalyzátoru, emise | Agilyx, Pyrowave | Vývoj katalyzátorů s dlouhou životností pro kontinuální zpracování |
| **Rychlá pyrolýza** | PE, PP, PET, PS, PVC, MPW (směsný plastov | Rychlá přeměna plastového odpadu na použitelný olej | Komplexní směs produktů | BASF, Brightmark | Vylepšené systémy pro lepší kontrolu složení výrobků |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ý odpad) | | | | |
| **Mikrovlnná pyrolýza** | PE, PP, PS, PVC, PET, PA, ABS, MPW | Účinný ohřev, rychlé reakce | Vysoké kapitálové náklady, problémy s rozšiřováním | Pyrowave, GreenMantra Technologies | Lepší škálovatelnost mikrovlnných reaktorů |
| **Pyrolýza ve fluidním loži** | PE, PP, PS, PET, PVC, MPW | Vysoký přenos tepla, velká kapacita zpracování | Složitý provoz, obtížná optimalizace | Skupina recyklačních technologií, BASF | Zdokonalení konstrukce reaktorů pro velkokapacitní provoz |
| **Plazmové zplyňování** | PET, PE, PP, PS, PVC, MPW | Lze zpracovávat širokou škálu typů plastů | Vysoká spotřeba energie, nákladná infrastruktura | Alter NRG, Hitachi Zosen Inova | Snížení poptávky po energii a nákladů na infrastrukturu |
| **Parní zplyňování** | PP, PE, PS, PET, PVC, MPW | Vyrábí vysoce kvalitní syntézu ze směsného plastového odpadu | Vysoké investiční a provozní náklady | Anellotech, Linde | Zkoumání aplikací synplynu pro průmyslové využití |
| **Oxidační** | PE, PP, PS, | Zmenšuje velikost plastu | Omezená hodnota | BP, Shell, | Kombinované přístupy s |

T A Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **degradace** | PVC, PET | pro další zpracování | vedlejších produktů, ztráta materiálu | ExxonMobil | jinými recyklačními technologiemi |
| **Hydrotermální zkapalňování** | PE, PP, PS, PVC, PET | Přeměna plastů na kapalná paliva | Vyžaduje se vysoká teplota a tlak | Resynergi, Waste2Energy | Výzkum nižších energetických nároků hydrotermálních procesů |
| **Biologická depolymerizace** | PET, PA, PU, PLA, Nylon | Udržitelné, nízkoenergetické procesy, biologicky odbouratelné enzymy | Dlouhá reakční doba, škálovatelnost | Carbios, Novozymes, LanzaTech | Genetická modifikace enzymů pro rozklad smíšených plastů |
| **Elektrochemická recyklace** | PET, PE, PP, PS | Žádné externí vytápění, nízký potenciál spotřeby energie | vyžaduje vývoj účinných elektrodových materiálů | IBM Research, University of Manchester | Vývoj nových elektrodových materiálů pro zvýšení účinnosti |

## 5. Environmentální a ekonomické důsledky

Cílem zavedení chemické recyklace v plném rozsahu je vyřešit problém hromadění plastového odpadu a zároveň získat cenné materiály. Jednou z nejvíce inzerovaných výhod chemického zpracování je

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

jeho potenciál snížit závislost na fosilních palivech. Přínosy chemického zpracování pro životní prostředí však nejsou bez významných výhrad. Otázka posouzení životního cyklu procesu chemické recyklace zůstává v této situaci otevřená. Výhody plynoucí z chemického zpracování plastů jsou zřejmé, ale v současné době neexistuje dostatečně komplexní výzkum, který by plně posoudil dopad těchto technologií na životní prostředí a lidský organismus [158]. Vzhledem k tomu, že technologie chemické recyklace nejsou v praxi široce uplatňovány, mají stávající modely a jejich výpočty značné rozdíly [159]. Procesy LCA pro chemickou recyklaci jsou rozvíjející se oblastí. [160]. Problém spočívá v různorodosti metod LCA a v nutnosti, aby výzkumníci stanovili parametry specifické pro daný projekt, což znamená, že výsledky jedné LCA jsou jen zřídka srovnatelné s ostatními [161]. Přestože mechanická recyklace má lepší environmentální profil než chemická recyklace, chemicky recyklovaná vlákna lze ve srovnání s mechanicky recyklovanými vlákny použít v širší škále aplikací [162]. Analýza životního cyklu tří scénářů zpracování plastových odpadů (mechanické zpracování, zdokonalené mechanické zpracování a zpracování surovin pyrolýzou) ukázala, že zpracování zaměřené na kvalitu je lepší jak z hlediska životního prostředí, tak z finančního hlediska [163]. V současné době je vhodné zaměřit se na výzkum metod chemického zpracování plastů, spíše než pokračovat v jejich porovnávání s mechanickými metodami. [164]. Pro provádění LCA je nutné mít k dispozici rozsáhlý soubor údajů, aby bylo možné zajistit spolehlivé výsledky výzkumu [165].

## 3.1.Metodika LCA

Pro získání komplexního pochopení celkového dopadu zkoumaných procesů je vhodné provést výzkum pomocí metody LCA, která nabízí holistický přístup ke stanovení dopadů na životní prostředí. LCA je uznávána jako nejlepší nástroj pro posuzování dopadů životního cyklu výrobků nebo procesů [166], [167]. LCA umožňuje identifikovat energeticky nejnáročnější a na zdroje nejnáročnější fáze, které mají největší dopad na životní prostředí, zejména při třídění, čištění a zpracování polymerů. Analýzou těchto fází je možné identifikovat "horká místa", kde může dojít k významné optimalizaci, například zavedením pokročilých třídicích technologií, které snižují znečištění a ztráty materiálu. LCA rovněž umožňuje vyhodnotit energetickou účinnost různých metod recyklace, jako je mechanická nebo chemická recyklace, což pomáhá zvolit optimální strategie na základě konkrétních typů plastů. Výhoda využití metody LCA pro analýzu systému nakládání s odpady spočívá v její schopnosti poskytnout komplexní pohled na příslušné procesy a dopady, a to i s ohledem na jejich propojení s dalšími odvětvími [168].

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Jednou z klíčových výhod této metody je její schopnost poskytovat užitečné informace ve fázi návrhu, protože umožňuje identifikovat alternativy plánování [169]. Z ekonomického hlediska pomáhá LCA snižovat náklady optimalizací procesů a zlepšováním kvality druhotných surovin, což potenciálně zvyšuje ziskovost recyklace plastů. Jedním z klíčových řešení je přijetí koncepcí "ekodesignu", které se zaměřují na vývoj materiálů, jež se snadněji recyklují, čímž se snižují náklady na zpracování a zvyšuje se hodnota konečného výrobku. Stávající studie LCA o metodách chemické recyklace plastů mají bohužel mezery ve výzkumu příslušných druhů odpadů a samotných metod [170], [171]. Nejrozsáhleji analyzovanými metodami chemické recyklace pomocí LCA jsou pyrolýza a zplyňování [172], [158], [173], [174]. Podle studie LCA [175] lze dopad pyrolýzy na životní prostředí snížit využitím energie z obnovitelných zdrojů. Výzkum [176], naznačuje, že experimenty s pyrolýzou by se měly zaměřit na zlepšení účinnosti přeměny uhlíku a využití obnovitelných zdrojů energie ve spojení s přístupy chemické recyklace, protože významné emise během tohoto procesu souvisejí především se spotřebou energie [175], [177], [178]. Přesto je technologie pyrolýzy plastů stále nedostatečně prozkoumána a pro úplný přechod od srovnávací perspektivy k holističtějšímu přístupu - kdy je pyrolýza plastů považována za nedílnou součást udržitelného systému nakládání s odpady - je potřeba specializovaná databáze LCI [179]. Posouzení životního cyklu procesu zplyňování [180] prokazuje jasné výhody zplyňování oproti konvenční technologii spalování. LCA zplyňování plastů odhalilo, že hlavním problémem je elektrická energie potřebná k rozkladu plastového odpadu v reaktoru [158]. Na druhé straně autoři [181] ve své studii životního cyklu metanolu a vodíku vyrobených zplyňováním komunálního plastového odpadu zjistili, že emise skleníkových plynů z cest zplyňování MPW se podle odhadů zvýší o 166 %, resp. 36 %. Výsledky LCA [182] ukazují, že vodík získaný ze směsného plastového odpadu má ve srovnání s plastem z jednoho proudu nižší dopad na životní prostředí. Kromě toho při porovnání životního cyklu zplyňování a skládkování tuhého komunálního odpadu autoři [183] zdůrazňují, že zplyňování má výrazně nižší dopad na lidské zdraví, včetně rizika rakoviny a nenádorových onemocnění. Pokud jde o studie LCA procesů hydrolýzy a glykolýzy, většina výzkumníků se shoduje na tom, že dostupnost a kvalita údajů je nízká [160]. Autoři [184] ve své studii LCA procesu hydrolýzy PET dospěli k závěru, že klíč ke snížení emisí uhlíku spočívá v udržení nízké spotřeby energie zvýšením poměru pevné látky ke kapalině a zamezením nadměrného přidávání

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

vody při čištění monomeru. Pokud jde o výsledky LCA dvou procesů glykolýzy PET, bylo zjištěno, že glykolýza s použitím ethylenglykolu má vyšší potenciál globálního oteplování než glykolýza s použitím propylenglykolu [185]. Pro procesy, jako je biologická depolymerizace a enzymatická degradace, je k dispozici podstatně méně studií LCA. Autoři např. [186] při porovnávání životního cyklu enzymatické recyklace plastů se spalováním dospěli k závěru, že enzymatická recyklace by mohla představovat cennou alternativu ke spalování jak z energetického, tak z environmentálního hlediska, zejména pokud následné možnosti využití pevných a kapalných frakcí zahrnují spoluspalování a anaerobní digesci pro výrobu bioplynu. Jiná studie LCA ukazuje, že v procesu depolymerizace jsou klíčovými nákladovými faktory stupeň rozkladu PET, zatížení pevnou látkou, náklady na enzymy a zatížení enzymy [187]. Za zmínku rovněž stojí, že výzkum biologicky rozložitelných plastů hraje významnou roli ve vývoji biologické depolymerizace a enzymatické degradace [188], [189], [190], [191]. V případě elektrochemické recyklace plastů je k dispozici méně studií LCA, přičemž stávající výzkumy se tomuto tématu věnují pouze částečně [192], [193]. Vzhledem k tomu, že elektrochemická recyklace pokovených plastů prokázala významné zlepšení životního prostředí díky elektrochemickému procesu [194], mají studie LCA této technologie potenciál pro budoucí implementaci [195]. Posouzení životního cyklu technologie superkritické fluidní depolymerizace bylo publikováno v několika studiích, které obecně naznačují větší dopad na životní prostředí ve srovnání s procesy spalování a skládkování (pokud se neuvažují recyklované produkty) [196]. Energetickou náročnost by bylo možné snížit energetickou optimalizací, které by bylo dosaženo využitím odpadního tepla vznikajícího při chemickém rozkladu plastového odpadu [197]. Hydrotermální zkapalňování plastů nebylo z hlediska LCA rozsáhle studováno, přičemž nejpodrobnější popisy lze nalézt v publikaci [198] a [199]. Pokud jde o oxidační degradaci, nejsou k dispozici žádné komplexní studie LCA, pouze dílčí úvahy na toto téma [200], [201], [202]. Z výše uvedeného vyplývá, že většina procesů chemické recyklace plastů vyžaduje další výzkum z hlediska hodnocení životního cyklu. Studie LCA chemických recyklačních procesů by měly zahrnovat soubor faktorů a předpokladů založených na sociálních, ekonomických a technologických prognózách [160]. Pravděpodobný scénář vývoje recyklace plastů zahrnuje kombinaci několika metod, které se vzájemně doplňují a v konečném důsledku přinášejí nejefektivnější výsledek. To dokládá studie [327] která ukazuje,

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

že analýza posouzení životního cyklu (LCA) scénáře "Míra recyklace 10,64 % odeslaná do MR (mechanická recyklace) plus potenciální 2 x P (pyrolýza); zbytek odeslaný do WTE (Waste-to-Energy)" má nejmenší dopad na životní prostředí.

## 3.2. Energetické zatížení

Chemické zpracování často vyžaduje značné množství tepla a elektrické energie. Přínosy pro životní prostředí do značné míry závisí na zdroji energie. Pokud se používá energie z fosilních paliv, mohou celkové emise uhlíku převážit nad přínosem snížení množství plastového odpadu pro životní prostředí. Z výše uvedených studovaných metod je plazmové zplyňování považováno za energeticky nejnáročnější. Důvodem je použití plazmového hořáku k vytvoření vysokoteplotního plazmového oblouku, který za přítomnosti páry zplyňuje surovinu. Tento proces je vysoce energeticky náročný, spotřeba se pohybuje v rozmezí 11,0-30,3 MJ/kg, protože je třeba vytvářet plazmu při teplotách vyšších než 3 000 °C [254], [255], [256]. Hlavní spotřeba energie při zplyňování je určena na ohřev reaktorů na vysoké teploty. Vysoké teploty podporují výrobu čistšího syntézního plynu s menším množstvím znečišťujících látek [257]. Pokud jde o zplyňování parou, není tato metoda o nic méně energeticky náročná, protože rovněž vyžaduje vysoké teploty (600 °C - 1200 °C). V tomto případě se však hlavní část energie spotřebuje na ohřev vody k výrobě páry - přibližně 12 - 20 MJ/kg [258], [259], [260]. Technologie pyrolýzy, která je založena na procesech termického rozkladu (500-800 °C), vyžaduje sama o sobě značné množství energie k dosažení potřebných teplot [261], [262], [263]. Pyrolýza plastů vyžaduje v průměru 4 - 10 MJ/kg energie [264], [265]. Depolymerizační procesy (obr. 1), ačkoli vyžadují nižší teploty (180-374 °C), jsou stále poměrně energeticky náročné, protože některé z nich vyžadují udržování tlaku kolem 22,1 MPa [266], [267], [268]. Průměrná spotřeba energie při depolymerizačních procesech se pohybuje od 2,8 do 9 MJ/kg [269], [270]. Oxidační rozklad vyžaduje ve srovnání s výše popsanými procesy výrazně nižší teploty a je energeticky méně náročný (2-7 MJ/kg). Na druhou stranu je však tento proces vysoce závislý na pomocných faktorech, jako jsou katalyzátory [271], [272]. Pro depolymeraci plastů metodou hydrotermálního zkapalňování je nutné vytvořit podmínky nadkritické vody (> 374 °C; > 23 MPa). Díky těmto požadavkům je postup poměrně energeticky náročný, spotřebuje se přibližně 12 až 22 MJ/kg [273]. U procesu biologické degradace připadá většina spotřeby energie na kultivaci mikrobů, produkci enzymů a provoz samotného bioreaktoru (energie na míchání, regulaci teploty a monitorování systému), a to v rozmezí 1 až 3 MJ/kg [274], [275]. Spotřeba energie během procesu elektrochemické recyklace plastů přímo závisí na konstrukci elektrochemického článku (materiály elektrod, membrána, složení elektrolytu) a

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

také na požadavcích na napětí a proud. Tato spotřeba se obvykle pohybuje mezi 5-12 MJ/kg [161], [196], [276]. Z energetického hlediska jsou vyhlídky chemické recyklace nejednoznačné. Na jedné straně existuje potenciál pro výrazné snížení objemu plastového odpadu a vytvoření více oběhového hospodářství. Na druhou stranu ji současná vysoká energetická náročnost činí méně atraktivní. Dokud nebude k dispozici dostatečné množství energie z obnovitelných zdrojů, budou výše uvedené procesy balancovat mezi snižováním dopadu na životní prostředí prostřednictvím snižování množství plastového odpadu a emisí spojených s energií. Některé metody chemického zpracování navíc vytvářejí nebezpečné vedlejší produkty nebo vyžadují použití škodlivých chemikálií, což představuje riziko pro životní prostředí i lidské zdraví, pokud není řádně řízeno. Pro metody chemické recyklace, jako je glykolýza, katalytická pyrolýza, pyrolýza ve fluidním loži, hydrotermální zkapalňování a elektrochemické zpracování, je neodmyslitelnou součástí používání různých typů katalyzátorů, které zvyšují účinnost reakcí, snižují energetické nároky a zlepšují kvalitu konečných produktů [277], [278], [279], [280]. Použití katalyzátorů však přináší i další otázky týkající se výroby, regenerace a likvidace katalytických materiálů [281]. Kromě toho manipulace s katalyzátory vyžaduje další činnosti, které často vytvářejí další emise do životního prostředí [282], [283], [284], [285]. V případě elektrochemické recyklace plastů se zvyšuje zátěž životního prostředí v důsledku manipulace s elektrodovými materiály a odpadem. Kromě toho vznikají další emise při použití technologie enzymatické degradace, zejména v důsledku průmyslové výroby a čištění enzymů a udržování optimálních podmínek pro aktivitu enzymů [286]. V případě kyselé hydrolýzy vznikají dodatečné emise v důsledku výroby a manipulace se silnými kyselinami, energie potřebné pro reakci a zpracování kyselého odpadu. Při biologické depolymerizaci vznikají dodatečné emise z kultivace, údržby a případné genetické modifikace mikroorganismů, jakož i z likvidace biologického odpadu. [287]. Výzkumníci z [288] prokázali, že mechanické zpracování překonává enzymatickou hydrolýzu, glykolýzu a methanolýzu PET vloček, stejně jako výrobu primárního plastu z hlediska ekonomického a environmentálního. Vykazovala však nižší kvalitu materiálu a další technické ukazatele. Přitom mezi metodami chemické recyklace PET poskytovala glykolýza nejlepší ekonomické a environmentální výsledky. Podobné výsledky ukázala i studie [289], kde analýza LCA (hodnocení životního cyklu) využití PLA (kyseliny polymléčné) ukázala, že nejmenší dopad na životní prostředí má mechanické zpracování, následované chemickou recyklací a kompostováním. Studie [290] ukazuje, že všechny způsoby chemické recyklace mohou snížit dopad globálního oteplování a vyčerpávání fosilních zdrojů, pokud se využijí vytříděné plastové obaly, které by jinak byly zpracovány v zařízeních na energetické využití komunálního odpadu.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

## 3.3. Ekonomické zatížení

Vytvoření rovnováhy mezi environmentálními a ekonomickými hledisky má zásadní význam pro dosažení širokého rozšíření této revoluční technologie. Ekonomická životaschopnost a škálovatelnost představují výzvu pro široké zavedení chemické recyklace. V současné době tyto procesy vyžadují vyšší finanční investice ve srovnání s tradičními metodami recyklace, což je činí méně ekonomicky atraktivními. Tato ekonomická výzva ovlivňuje škálovatelnost recyklace chemických látek a následně i potenciální přínosy pro životní prostředí. Výsledky studie [328] jsou příkladem významných ekonomických výzev při recyklaci plastů prostřednictvím pyrolýzy a zplyňování, přičemž druhá cesta je obzvláště složitá. Studie [329] ukazuje, že koncepce recyklace bioplastů může hrát zásadní roli při přechodu na více biologicky založené a oběhové odvětví plastů. Důležitou roli v této situaci hrají také vysoké náklady na katalyzátory, které přímo ovlivňují účinnost recyklačního procesu a kvalitu konečných produktů [330]. Značné počáteční investice potřebné pro rozsáhlé uplatnění chemické recyklace mohou být pro investory vážnou výzvou. Studie však [331] naznačuje, že za určitých aspektů může takový přístup výrazně zvýšit hospodářskou konkurenceschopnost. Cenová konkurenceschopnost chemicky zpracovaných plastů je ovlivněna cenami primárních plastů, které se získávají z ropných produktů, na světovém trhu. Výkyvy cen ropy mohou ovlivnit ekonomickou životaschopnost chemické recyklace plastů, protože nižší ceny ropy mohou zlevnit primární plasty, a tím snížit poptávku po recyklovaných materiálech. Výsledky dynamiky trhu ukazují, že spotřeba zemního plynu v procesu chemické recyklace odpadního HDPE zvyšuje tržní cenu a nabídku zemního plynu o 0,1 %, zatímco výroba propylenu na místě snižuje tržní cenu propylenu o 5,46 %, snižuje nabídku propylenu o 8,8 % a zvyšuje poptávku po propylenu o 10,2 % [332]. Studie [333] ukazuje, že mazací oleje získané pyrolýzou a hydrogenolýzou mají kladnou návratnost investic, zatímco zplyňování, hydrokrakování a HTL (hydrotermální zkapalňování) mají náklady vyšší než zisk. Je tedy zřejmé, že v současné době neexistuje dokonalý proces chemické recyklace plastů, který by bylo možné bezproblémově aplikovat v praxi. Z výše popsaných metod vyplývá, že problematickými oblastmi jsou buď značná spotřeba energie, vysoké náklady, nebo zvýšené emise do životního prostředí.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

# 6. Použití v praxi

Poptávka po recyklovaných plastech roste díky informovanosti spotřebitelů a zvýšenému tlaku regulačních orgánů na výrobce, aby používali materiály šetrné k životnímu prostředí. Vládní politika hraje zásadní roli v ekonomické životaschopnosti chemického zpracování. Dotace, daňové pobídky a granty mohou kompenzovat některé počáteční náklady a učinit tuto činnost ziskovější. Názory moderních vědců a ekologů na chemické zpracování se liší. Zastánci, jako jsou autoři [334], tvrdí, že pokrok v konstrukci katalyzátorů a reaktorů může výrazně zvýšit účinnost chemického zpracování, čímž se stane robustnějším a ekonomicky životaschopnějším. Zlepšením účinnosti a selektivity katalyzátorů je možné maximalizovat výtěžek požadovaných produktů a zároveň minimalizovat vedlejší produkty a odpad [335]. Jiní se domnívají, že samotná recyklace není řešením; jedinou cestou vpřed je zcela přehodnotit způsob výroby, přepravy, spotřeby a likvidace výrobků; to znamená, že potřebujeme kompletní přepracování a okamžité zaměření na opakovaně použitelné výrobky a systémy s uzavřenou smyčkou [336], [337]. Ti tvrdí, že stávající problémy lze řešit omezením výroby a používání plastů, zlepšením metod mechanické recyklace a podporou alternativních materiálů.

## 4.1. Příklady použití v praxi

K dnešnímu dni existuje řada organizací, které se snaží aplikovat nebo zkoumat různé metody chemické recyklace plastového odpadu ve větším měřítku. Jednou z nejznámějších organizací v Evropě je Plastic Energy, založená v roce 2011 v Londýně. Ta recykluje plasty pomocí vlastního patentovaného procesu, kdy se plast zahřívá za nepřítomnosti kyslíku za vzniku uhlovodíkových par, které se následně kondenzují na recyklovaný olej zvaný TACOIL™ (Thermal Anaerobic Conversion Oil). Podle analýzy LCA, kterou organizace pro tuto technologii provedla, je typ použité energie významný a přechod na 100% obnovitelnou elektřinu může výrazně snížit uhlíkovou stopu procesu chemické recyklace. Chemickou recyklací plastů se zabývá také organizace BASF ChemCycling. Z analýzy LCA, kterou pro společnost BASF provedla společnost Sphera a kterou posoudili tři nezávislí odborníci, vyplynulo, že pyrolýza směsného plastového odpadu vypouští o 50 % méně $CO_2$ než spalování. Studie rovněž ukázala, že emise $CO_2$ klesají při výrobě produktů na bázi pyrolýzního oleje s využitím přístupu hmotnostní bilance namísto ropy. Další organizace, Mura Technology, recykluje plasty pomocí vlastní vyvinuté technologie hydrotermálního zpracování, nazvané HydroPRS™. Tento proces zahrnuje recyklaci plastů pomocí superkritické vody (voda pod vysokým tlakem a teplotou). Studie LCA tohoto procesu ukazuje 80% snížení GWP (potenciálu globálního oteplování) v porovnání

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

s energetickým využitím odpadu (spalováním), čímž se ušetří více než 1,8 tuny $CO_2$ ekv. GWP na tunu zpracovaného plastu. Organizace Quantafuel nabízí řešení, při kterém se plastový odpad zahřívá, rozkládá a znovu skládá na hodnotné výrobky. Hlavní výhodou jejich technologie je, že umožňuje zpracování nečistot a směsi různých barev a typů plastů. Proces je založen na pyrolýze, po níž následuje čištění pyrolýzního plynu a použití dvoustupňového katalyzátoru v plynné fázi. Plyn se poté kondenzuje a destilací se rozdělí na potřebné olejové frakce. Společnost Clariter byla založena v roce 2003 a vyvinula a zdokonalila vlastní technologii chemické recyklace. Společnost Clariter používá třístupňový proces chemické recyklace, který zahrnuje tepelné krakování, hydrorafinaci a destilaci a míchání. Tento proces dokáže zpracovat většinu typů plastů ze všech toků odpadů a vyžaduje relativně jednoduchou přípravu suroviny. V budoucnu chce společnost Clariter rozšířit svou činnost po celém světě zřízením plnohodnotných recyklačních závodů v různých regionech. Společnost Covestro je známou organizací, která se zaměřuje na inovace a udržitelný rozvoj a investuje do výzkumu a vývoje s cílem rozšířit možnosti chemické recyklace. Organizace ve svých postupech aktivně využívá pyrolýzu, hydrolýzu a glykolýzu. Další organizací zabývající se udržitelnými technologiemi chemické recyklace plastů je Loop. Technologie depolymerizace společnosti Loop rozkládá dříve nerecyklovatelný plastový odpad z polyethylentereftalátu a polyesterových vláken na jejich základní stavební prvky, dimethylentereftalát a monoethylenglykol, a to za použití nízkého tepla a bez přidaného tlaku. Další významnou organizací usilující o zavedení rozsáhlé chemické recyklace je společnost ORLEN Unipetrol v České republice. Společnost ORLEN Unipetrol je významným hráčem, který se zaměřuje na několik pokročilých metod recyklace, včetně katalytické pyrolýzy a hydrotermálního zkapalňování. Jejich pyrolýzní závod v Litvínově přeměňuje směsný plastový odpad na uhlovodíky pro výrobu nových polymerů a paliv. Organizace Pryme pracuje také na optimalizaci procesu pyrolýzy. Důležitou roli při prosazování zavádění chemické recyklace a podpoře recyklovaných výrobků hrají také různá sdružení. Jednou z takových organizací je Plastics Europe, která se snaží popularizovat výhody plastů a zároveň prosazovat ekologické postupy a podporovat přechod na oběhové hospodářství. Plastics Europe spolupracuje s tvůrci politik, průmyslovými subjekty a výzkumnými institucemi na prosazování předpisů a politik, které podporují vývoj a zavádění technologií chemické recyklace. Plastics Europe podporuje vývoj a zavádění různých technologií chemické recyklace, jako je pyrolýza, zplyňování nebo depolymerizace.

## 4.2. Výzvy spojené s praktickým použitím

Prvním a jedním z nejzávažnějších problémů je vysoká energetická náročnost procesů

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

chemické recyklace, zejména u technologií jako pyrolýza nebo zplyňování. Tyto metody vyžadují zahřívání materiálu na velmi vysoké teploty, často přesahující 400 °C. Výsledkem je značná spotřeba energie, která může být z velké části získávána z neobnovitelných zdrojů. Energetické vstupy potřebné pro tyto procesy nejenže zvyšují provozní náklady, ale zároveň zpochybňují jejich ekologickou udržitelnost, pokud nejsou integrovány s obnovitelnými zdroji energie. Dalším problémem je komplexnost složení plastového odpadu, který často obsahuje směs různých polymerů, přísad a kontaminantů. Zatímco mechanická recyklace vyžaduje pečlivé třídění plastů podle typu polymeru, chemická recyklace může být flexibilnější. Avšak i zde dochází k problémům, kdy zpracování kontaminovaných nebo smíšených plastů vede k nižší kvalitě výsledných produktů. Kontaminace, jako jsou barviva, plniva nebo zbytky potravin, může narušovat chemické reakce a zvyšovat potřebu dodatečných čistících procesů, což opět zvyšuje celkové náklady. Technologická složitost procesů je další významnou překážkou. Zatímco některé technologie, například depolymerizace PET nebo polystyrenu, jsou již dobře zvládnuté a pilotně ověřené, jiné procesy, jako je solvolýza polyuretanů nebo pyrolýza polyolefinů, vyžadují další výzkum a vývoj. Při praktickém zavádění těchto technologií do průmyslového měřítka často dochází k technickým komplikacím spojeným s řízením procesů, optimalizací výtěžnosti a kvalitou výstupních produktů. Zajištění konstantní kvality výsledných surovin je přitom zásadní pro konkurenceschopnost chemické recyklace na trhu. Ekonomické výzvy hrají klíčovou roli při rozhodování o implementaci chemické recyklace. Náklady na vybudování a provoz zařízení pro chemickou recyklaci jsou výrazně vyšší než u mechanické recyklace. Navíc současné trhy s ropnými surovinami a primárními polymery jsou stále dominantní a levnější než recyklované chemické produkty. To znamená, že ekonomická návratnost investic do chemické recyklace je do značné míry závislá na podporách a pobídkách ze strany vládních institucí nebo legislativních regulací. Bez dostatečné politické a finanční podpory zůstává rozšíření chemické recyklace omezené. V neposlední řadě je zde otázka environmentální bezpečnosti. I když chemická recyklace nabízí řešení pro plasty, které jsou nerecyklovatelné mechanickými metodami, samotné procesy mohou generovat vedlejší produkty, jako jsou emise skleníkových plynů, toxické látky nebo zbytky chemických rozpouštědel. Například při zplyňování nebo pyrolýze může docházet k emisím oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého, což může mít negativní dopad na životní prostředí. Tyto vedlejší

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

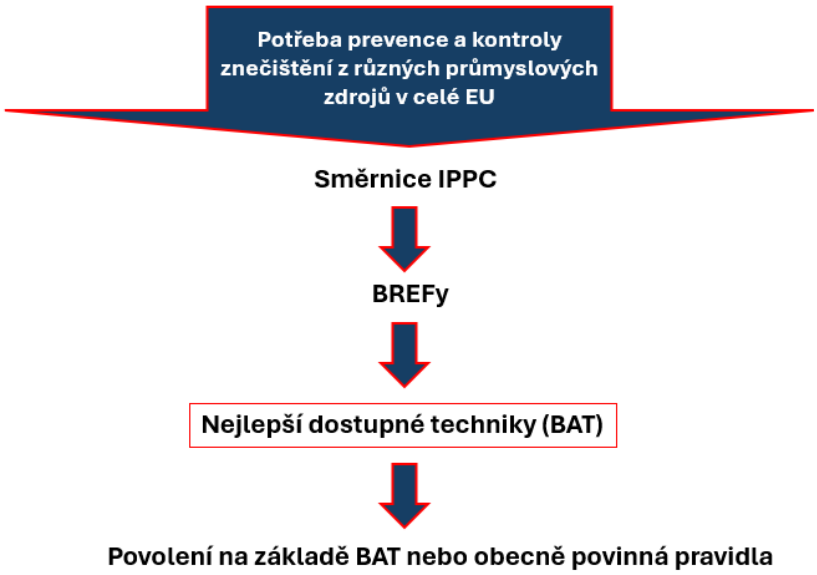
produkty vyžadují implementaci dodatečných technologií pro jejich zachytávání a bezpečnou likvidaci, což dále zvyšuje náklady. Výzkum se také zaměřuje na efektivitu a selektivitu chemických procesů, protože mnohé současné technologie nejsou dostatečně optimalizované. Například při pyrolýze polyolefinů může být výtěžnost kvalitního pyrolytického oleje proměnlivá v závislosti na vstupním materiálu a přesnosti řízení procesních parametrů. K dosažení stabilních výsledků je proto nezbytné investovat do vývoje katalyzátorů, které umožní zlepšení efektivity a snížení teplot potřebných pro reakci. Chemické metody recyklace plastů mají sice značný potenciál při řešení znečištění plasty, ale čelí řadě zásadních problémů, které lze překonat komplexními opatřeními na úrovni výzkumu, politiky a infrastruktury. Pro snížení spotřeby energie a nákladů na chemickou recyklaci je nezbytné investovat do výzkumu a vývoje nových, energeticky účinnějších technologií. Jednou z klíčových oblastí jsou investice do výzkumu zaměřeného na zdokonalení katalyzátorů a procesů, které sníží spotřebu energie a zvýší účinnost recyklace komplexních polymerních odpadů. Například výzkum v oblasti vývoje nízkoteplotních depolymerizačních procesů by mohl výrazně snížit náklady na energii, což je jeden z hlavních faktorů přispívajících k vysokým nákladům na chemickou recyklaci. Politické iniciativy, jako jsou daňové pobídky a dotace, mohou zároveň podnítit inovace v této oblasti, zatímco přísné předpisy o nakládání s odpady zvýší poptávku po chemicky recyklovaných výrobcích. Příkladem může být Evropská unie, která v rámci svého "Akčního plánu pro oběhové hospodářství" navrhuje opatření ke zvýšení míry recyklace plastů a využívání druhotných materiálů. Účinná recyklace směsných a kontaminovaných plastů je jednou z hlavních technických výzev, proto by se měla věnovat zvláštní pozornost optimalizaci složení vstupních surovin a zavedení norem pro výrobu plastů, které usnadní jejich následnou recyklaci. Spolupráce mezi vládními institucemi, průmyslem a výzkumnými organizacemi - například partnerství zahrnující velké chemické společnosti - může navíc urychlit uvádění nových technologií na trh. Pro snížení výrobních nákladů je vhodné rozšířit chemickou recyklaci, což umožní úspory z rozsahu, a také integrovat tyto procesy do stávajících průmyslových infrastruktur. Například integrace chemické recyklace s petrochemickými závody může snížit počáteční kapitálové investice. Další důležitou strategií je zvyšování povědomí spotřebitelů a rozšiřování odpovědnosti výrobců, což znamená, že výrobci nesou odpovědnost za nakládání s plastovým odpadem po skončení jeho životního cyklu. Z hlediska dopadu na životní prostředí

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

je třeba se zaměřit na vývoj energeticky účinných technologií a zavádění technologií zachycování a využívání uhlíku s cílem minimalizovat dopady změny klimatu. Podporu vyžaduje také trh s druhotnými výrobky, protože chemicky recyklované výrobky musí kvalitou a cenou konkurovat primárním materiálům, takže vývoj technologií, které dokáží vyrábět vysoce kvalitní druhotné polymery, je kriticky důležitý. Klíčem k překonání hlavních problémů chemické recyklace plastů je proto komplexní přístup, který zahrnuje technologické inovace, regulační podporu, rozvoj infrastruktury a snižování dopadů na životní prostředí.

## 4.3.BAT pro chemickou recyklaci plastů

Základem pro vytvoření BREF bylo přijetí směrnice o průmyslových emisích (Industrial Emissions Directive, IED). BREF je referenční dokument o nejlepších dostupných technikách (BAT) vypracovaný v rámci legislativy Evropské unie pro regulaci průmyslových emisí a minimalizaci dopadů na životní prostředí. V dokumentech jsou popsány použité metody, současné úrovně emisí a spotřeby, zvažované metody pro určení nejlepší dostupné technologie a závěry o BAT a případných nových metodách. BAT jsou technologie, metody a postupy, které jsou považovány za nejlepší dostupné pro snížení dopadu průmyslu na životní prostředí. Jsou vypracovány na základě BREF a definovány jako standard pro konkrétní činnosti. BAT jsou stanoveny na základě kritérií účinnosti, přínosu pro životní prostředí, ekonomické proveditelnosti a technické dostupnosti.




T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Obrázek 2. Proces stanovení BAT.

NEJLEPŠÍ - nejúčinnější při dosahování ochrany životního prostředí jako celku.

DOSTUPNÉ - ekonomicky a technicky proveditelné, s přihlédnutím k nákladům a výhodám, přiměřeně přístupné.

TECHNIKY - používaná technologie a způsob, jakým je zařízení navrženo, postaveno, udržováno, provozováno a vyřazeno z provozu. Na základě BREF a BAT vnitrostátní regulační orgány vydávají podnikům ekologická povolení. To znamená, že povolení k provozování určitých průmyslových činností nebo zařízení se vydává v souladu s normami a požadavky BAT. V těchto povoleních mohou být stanoveny konkrétní environmentální podmínky a omezení, které musí podniky dodržovat. Tato povolení jsou povinná a regulují emise a další environmentální faktory.

Dokumenty BREF vypracované pro každé průmyslové odvětví a definují standardy BAT, včetně doporučených úrovní emisí pro různé látky a procesy. Tyto emisní hodnoty se nazývají úrovně emisí související s BAT (**Emission Limit Values**) (BAT-AEL) a definují rozsah koncentrací znečišťujících látek, kterých mohou podniky dosáhnout pomocí BAT. Když průmyslové zařízení žádá o ekologické povolení, regulační orgán bere v úvahu hodnoty BAT-AEL z příslušného dokumentu BREF. Na základě toho a s ohledem na specifika místních podmínek (např. typ výroby, emise, charakteristiky životního prostředí) stanoví regulátor pro konkrétní zařízení hodnoty ELV, které se pak stanou podmínkami povolení k ochraně životního prostředí. Pro nakládání s odpady byly vypracovány dva referenční dokumenty: referenční dokument pro zpracování odpadu a referenční dokument pro spalovaní odpadu.

**Referenční dokument pro zpracování odpadu:**

- Hydrolysis
- Glycolysis
- Enzymatic Degradation
- Acid Hydrolysis

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- Supercritical Fluid Depolymerization
- Alkaline Hydrolysis
- Oxidative Degradation
- Hydrothermal Liquefaction
- Biological Depolymerization
- Electrochemical Recycling

**Tento BREF zahrnuje:**

5.1. Odstraňování nebo využívání nebezpečných odpadů s kapacitou nad 10 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností:

(a) biologická úprava;
(b) fyzikálně-chemická úprava;
(c) míchání nebo mísení před předáním k jiným činnostem uvedeným v bodech 5.1 a 5.2 přílohy I směrnice 2010/75/EU;
(d) opětovné balení před předáním k jiným činnostem uvedeným v bodech 5.1 a 5.2 přílohy I směrnice 2010/75/EU;
(e) regenerace/obnova rozpouštědel;
(f) recyklace/obnova anorganických materiálů, jako jsou kovy nebo sloučeniny kovů;
(g) regenerace kyselin nebo zásad;
(h) obnova složek používaných ke snížení znečištění;
(i) obnova složek z katalyzátorů;
(j) rafinace nebo jiné opětovné použití oleje.

5.3. (a) Odstraňování nebezpečných odpadů s kapacitou nad 50 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností, jako například:

(i) biologická úprava;
(ii) fyzikálně-chemická úprava;
(iii) předběžná úprava odpadů pro jejich spalování nebo spoluspalování;

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

(iv) likvidace popela;
(v) úprava ve drtičích kovového odpadu, vysloužilého elektrického a elektronického zařízení a součástí vozidel.

(b) Obnova, nebo kombinace obnovy a likvidace, nebezpečných odpadů s kapacitou nad 75 tun denně, zahrnující jednu nebo více z následujících činností a vylučující činnosti regulované směrnicí 91/271/EHS:

(i) biologická úprava;
(ii) předběžná úprava odpadů pro spalování nebo spoluspalování;
(iii) likvidace popela;
(iv) úprava ve drtičích kovového odpadu, vysloužilého elektrického a elektronického zařízení a součástí vozidel.

5.5. Dočasné skladování nebezpečných odpadů, na které se nevztahuje bod (a) přílohy I směrnice 2010/75/EU, před zahájením některé z činností uvedených v bodech 5.4 a 5.6 této přílohy I, s celkovou kapacitou nad 50 tun, vyjma dočasného skladování na místě před shromážděním odpadu v místě jeho vzniku.

6.11. Samostatně provozované čistírny odpadních vod regulované směrnicí 91/271/EHS a vypouštěné zařízením, na které se vztahuje některá z činností uvedených v bodech 5.1, 5.3 nebo 5.5, jak je uvedeno výše.

**Tento BREF nezahrnuje následující:**

- Povrchové skladování.
- Odstraňování nebo recyklaci zvířecích těl nebo živočišných odpadů, na které se vztahuje popis v bodě 6.5 přílohy I směrnice 2010/75/EU, protože to pokrývá BREF pro jatky a odvětví vedlejších živočišných produktů (SA).
- Zpracování hnoje na farmách, pokud je to pokryto BREF pro intenzivní chov drůbeže nebo prasat (IRPP).
- Přímé využití (tj. bez předběžného zpracování) odpadů jako náhrady surovin v provozech provádějících činnosti pokryté jinými BREF, například:

- Přímé využití olova (např. z baterií), solí zinku nebo hliníku nebo obnova kovů z katalyzátorů. To může být pokryto BREF pro průmysl neželezných kovů (NFM).
- Recyklace papíru pro opětovné použití. To může být pokryto BREF pro výrobu buničiny, papíru a lepenky (PP).
- Použití odpadu jako paliva/suroviny v cementárnách. To může být pokryto BREF pro výrobu cementu, vápna a oxidu hořečnatého (CLM).

- Spalování (spoluspalování), pyrolýza a zplyňování odpadů. To může být pokryto BREF pro spalování odpadů (WI) nebo BREF pro velké spalovací zařízení (LCP).
- Skartace odpadů. To je pokryto směrnicí 1999/31/ES o skládkování odpadu. Zejména podzemní trvalé a dlouhodobé skladování (≥ 1 rok před likvidací, ≥ 3 roky před využitím) je pokryto směrnicí 1999/31/ES.
- In situ sanace kontaminované půdy (tj. nevytěžené půdy).
- Zpracování strusky a spodního popela. To může být pokryto BREF pro spalování odpadu (WI) nebo BREF pro velké spalovací zařízení (LCP).
- Tavení kovového šrotu a materiálů obsahujících kovy. To může být pokryto BREF pro průmysl neželezných kovů (NFM), BREF pro výrobu železa a oceli (IS) a/nebo BREF pro kovárny a slévárny (SF).
- Regenerace použitých kyselin a zásad, pokud je to pokryto BREF pro zpracování kovů.
- Spalování paliva, pokud nevytváří horké plyny, které přicházejí do přímého kontaktu s odpadem. To může být pokryto BREF pro velká spalovací zařízení (LCP) nebo směrnicí 2015/2193/EU.

**Referenční dokument pro spalování odpadů:**

- Catalytic Pyrolysis
- Fast Pyrolysis

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- Microwave Pyrolysis
- Fluidized Bed Pyrolysis
- Plasma Gasification
- Steam Gasification

Velmi často se stává, že dodržení stanovených limitů není reálné a nelze použít všechny doporučené techniky. To platí zejména v případě, že daná technologie ještě není široce používána. Tak je tomu například v případě technologií chemické recyklace plastů, kde většina technologií ještě není v provozu ve velkém rozsahu a některé jsou stále v pilotních verzích.

# 5. Chemická recyklace plastů v ČR

Chemická recyklace plastů v České republice nabývá na významu jako klíčová součást přechodu k oběhovému hospodářství. Tato technologie umožňuje zpracování plastového odpadu, který je obtížně recyklovatelný mechanickými metodami, a přeměňuje jej na základní chemické suroviny pro výrobu nových plastů.

## 5.1. Přehled firem zabývajících se chemickou recyklací plastů

V České republice se chemickou recyklací aktivně zabývá společnost **ORLEN Unipetrol**. V Litvínově provozuje testovací pyrolýzní jednotku, která zpracovává plastový odpad na pyrolyzní olej. Tento olej po dočištění nahrazuje fosilní suroviny při výrobě nových plastů. Společnost plánuje rozšířit kapacitu této jednotky na přibližně 20 tisíc tun ročně do roku 2027. Dalším příkladem je firma **Green Future**, která uvádí do komerčního provozu pyrolýzní jednotku s kapacitou 5,5 tisíce tun plastu ročně. V plánu má výstavbu dalších dvou jednotek v rámci ČR s celkovou kapacitou 22 tisíc tun ročně. Implementace chemické recyklace v ČR čelí výzvám, jako je zajištění konzistentní kvality vstupních surovin, efektivní třídění odpadu a vytvoření trhu s produkty chemické recyklace. Důležitá je také legislativní podpora a jasné regulační rámce pro nakládání s plastovým odpadem a využití metod chemické recyklace. Celkově chemická recyklace představuje perspektivní doplněk k mechanické recyklaci, který může významně přispět k dosažení recyklačních cílů stanovených evropskou a národní legislativou. Její rozvoj v České republice závisí na technologických inovacích, investicích a spolupráci mezi průmyslem, vládou a vědeckou komunitou.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

## 5.2. Databáze ParaBAT

Nicméně její implementace v průmyslovém měřítku čelí významným problémům, zejména z pohledu plnění limitů BAT (*Best Available Techniques*), které definují nejefektivnější a ekologicky šetrné technologické postupy. Cílem těchto limitů je minimalizovat emise znečišťujících látek a snížit environmentální dopady průmyslových procesů. Při aplikaci metod chemické recyklace plastů je jejich plnění výzvou, a otázka obcházení těchto limitů může být citlivým tématem, zejména z etického, právního a technologického hlediska.

**STANDARDNÍ PŘÍSTUP BAT/BREF**

**Environmentální dopady hodnoceny na úrovni požadavku na plnění limitů:**

- na úrovni spotřeby energií a médií, například účinnost, maximální spotřeba media, materiálu apod.
- na úrovni maximálně množství emise
    - definované v absolutní hodnotě za rok
    - definované v měrné jednotce vztažené na hlavní procesní tok (např. mg/Nm$^3$ atd.)
- na úrovni prostředí: vzduch, voda, půda.

**PROBLEMATIKA BAT/BREF**

- **Složitost** – vyžaduje dodržování množství norem a nejlepších praktik pro různá průmyslové odvětví.
- **Chybějící reflexe symbiózy** – referenční dokumenty BREF jsou často vytvářeny pro konkrétní sektory bez zohlednění možnosti symbiózy s jinými sektory.
- **Čas** – zavádění nových technologií často vyžaduje čas na otestování a vyhodnocení jejich účinnosti.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- **Lokální aspekty** – standardy BAT často nezohledňují místní environmentální a socioekonomické aspekty.

Účelem založení databáze ParaBAT bylo vytvořit alternativní možnosti, kterými by se dosáhlo požadované úrovně dopadu na životní prostředí, a to mimo dodržování limitů průmyslových emisí stanovených BAT. Podrobnější informace o fungování a struktuře databáze ParaBAT naleznete níže.

**Pro koho je databáze užitečná:**

- Pro nově vzniklé a pokročilé firmy zabývající se odpady a recyklací
- Vládní a nevládní organizace
- Průmyslové podniky

**Databáze ParaBAT je platforma, kde zainteresovaná strana může:**

- Porovnat aktuální úroveň dopadu procesu na životní prostředí s úrovní dopadu, který reprezentují standardy BAT.
- Dozvědět se a aplikovat alternativní možnosti snížení dopadu svého procesu na životní prostředí.
- Vybrat a kombinovat možnosti snížení dopadu na životní prostředí (BAT, ParaBAT).

**K vytvoření a naplnění databáze ParaBAT byly použity tyto zdroje dat:**

- Referenční dokumenty pro spalování odpadů
- Referenční dokumenty pro zpracování odpadů
- Databáze Sphere
- Databáze EcoInvent
- Databáze Web of Science, Pub Med

Environmentální dopad procesu byl kalkulován pomocí softwaru LCA for Experts. Pilotní verze databáze byla napsána v programovacích jazycích HTML a Java Script.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

**Princip fungování databáze ParaBAT**

7. Uživatel získá výpočet dopadu vlastního procesu na životní prostředí.

8. Uživatel má možnost porovnat své výsledky s výsledky stejného procesu, který zároveň dodržuje limity BAT.

9. Uživatel přezkoumá návrhy, které ParaBAT vypracoval pro jeho proces, a v případě zájmu se rozhodne některý z nich použít.

10. Uživatel automaticky obdrží výpočet dopadu svého procesu na životní prostředí s přihlédnutím ke zvoleným možnostem ParaBAT.

11. Uživatel má možnost porovnat výsledky s původním dopadem svého procesu na životní prostředí a s procesem, který splňuje limity BAT.

**Dopad na životní prostředí vypočítán na základě charakteristických faktorů vynásobených množstvím materiálu, odpadu nebo emisí.**

$$EF_{celkem} = EF_{waste\ pastic}*M + EF_{water\ for\ prepar.}*M + EF_{electricity\ for\ prepar.}*M + EF_{detergent}*M + EF_{MWL(waste\ from\ prep.)}*M + EF_{waste\ water\ from\ prep.}*M + EF_{track}*M + EF_{diesel}*M + EF_{argon}*M + EF_{hydrogen}*M + EF_{electricity\ for\ pyrolysis}*M + EF_{natural\ gas}*M + EF_{water\ for\ pyrolysis}*M + EF_{catalyst}*M + EF_{diesel}*M + EF_{truck\ 1}*M + EF_{truck\ 2}*M + EF_{truck\ 3}*M + EF_{MWI\ char}*M - EF_{naphta}*M_{pyr.oil} + EF_{CO2}*M + EF_{SO2}*M + ....$$

$EF_{Acidification}$, $EF_{Climate\ Change\ -\ total}$, $EF_{Human\ toxicity,\ non\text{-}cancer\ -\ total}$, $EF_{.....}$

**Procesy spojené s pyrolýzou**
**Procesy spojené s přípravou plastů**
**Emise**
**M – mnozstvi**

**Možnosti nabízené ParaBATem pro technologii pyrolýzy zahrnují následující:**

Používání alternativních surovin

- Elektřina z alternativních zdrojů

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- Biokatalyzátory
- Nahrazení dieselového paliva palivem šetrnějším k životnímu prostředí
- Používání ekologicky šetrnější dopravy

Zlepšení parametrů pyrolýzního procesu

- Zvýšení množství katalyzátoru
- Zvýšení teploty
- Zvýšení času

Alternativní manipulace s produkty pyrolýzy

- Přímé spalování jako průmyslové palivo
- Použití v mořském a těžkém průmyslu
- Rafinace na dieselové palivo
- Chemické suroviny pro fenoly a furany
- Společné zpracování v rafinériích
- Zplyňování pro výrobu syntézního plynu

Použití recyklovaných materiálů

- Rekuperace tepla z procesu
- Využití pyrolýzního plynu k ohřevu reaktoru

Uživatel možnost vybrat si z alternativních možností, které ParaBAT nabízí ke snížení dopadu procesu na životní prostředí, tu variantu, kterou lze v procesu skutečně použít.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

# 12. Závěr

Průmyslové organizace mohou pomocí ParaBAT snadněji a efektivněji analyzovat směry investic porovnáváním různých scénářů dopadu na životní prostředí. Mnohem efektivněji lze dosáhnout souladu s regulačními požadavky a konkurenční výhody, přičemž se zároveň zvýší jejich účinnost. Tento přístup je obzvláště výhodný pro zlepšení ADP (Advanced Data Processing - pokročilé zpracování dat). Ve sféře udržitelného rozvoje je pokročilé zpracování dat klíčové pro sběr, analýzu a interpretaci velkých objemů dat souvisejících s ekologickými, ekonomickými a sociálními aspekty. Dostupnost informativních dat přispívá k optimalizaci dopravních a energetických sítí a systémů nakládání s odpady. Tyto údaje jsou podpůrným nástrojem pro kontrolu a optimalizaci celého dodavatelského řetězce. Informace tohoto typu jsou užitečné pro vytváření nových politik, stanovení priorit investic a podporu ekologičtějších postupů, zvýšení transparentnosti a odpovědnosti.

ParaBAT lze uplatnit v jakémkoli sektoru, kde jsou důležité dopady na životní prostředí a udržitelnost. Její komplexní přístup pomáhá organizacím nejen splňovat regulační požadavky, ale také dosahovat širších cílů udržitelného rozvoje, což ji činí aktuální v kontextu současných zpráv, trendů a zákonů, které podporují ekologickou kontrolu a udržitelný rozvoj.

# Literatura

[1] P. Europe, "Plastics—The Facts 2016," *An analysis of European latest plastics production, demand and waste data,* 2016.

[2] S. Lockie, "Sociologies of climate change are not enough. Putting the global biodiversity crisis on the sociological agenda," *Environmental Sociology,* vol. 9, no. 1, pp. 1-5, 2023/01/02 2023, doi: 10.1080/23251042.2023.2170310.

[3] Z. Chen *et al.*, "Adsorption behavior of aniline pollutant on polystyrene microplastics," *Chemosphere,* vol. 323, p. 138187, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138187.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[4] J. Zalasiewicz, S. Gabbott, and C. N. Waters, "Chapter 23 - Plastic Waste: How Plastics Have Become Part of the Earth's Geological Cycle," in *Waste (Second Edition)*, T. M. Letcher and D. A. Vallero Eds.: Academic Press, 2019, pp. 443-452.

[5] M. O. Rodrigues, N. Abrantes, F. J. M. Gonçalves, H. Nogueira, J. C. Marques, and A. M. M. Gonçalves, "Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known?," *Environmental Toxicology and Pharmacology,* vol. 72, p. 103239, 2019/11/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103239.

[6] V. S. a. M. R. Hannah Ritchie, "Plastic Pollution,"

[7] S. R. Department. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2022 [Online] Available: https://www.statista.com//statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/

[8] S. R. Department. Annual production of plastics in Europe from 1950 to 2022 [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/987838/plastics-production-volume-in-the-eu-28/

[9] M. Jaganmohan. Distribution of plastic material production in Europe in 2015, by polymer type [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/687604/plastic-materials-production-european-union-eu/

[10] L. K. Ncube, A. U. Ude, E. N. Ogunmuyiwa, R. Zulkifli, and I. N. Beas, "An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries," *Recycling,* vol. 6, no. 1, p. 12, 2021.

[11] "Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures,"

[12] Main destinations for plastic waste exports from the European Union (EU-27) in 2021, by country [Online] Available: https://www.statista.com/statistics/1269996/plastic-waste-export-destinations-european-union/

[13] "Ban on shipping plastic waste outside the EU,"

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[14] Z. Liu, M. Adams, and T. R. Walker, "Are exports of recyclables from developed to developing countries waste pollution transfer or part of the global circular economy?," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 136, pp. 22-23, 2018/09/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.005.

[15] I. Yani, D. Rosiliani, B. Khona'ah, and F. A. Almahdini, "Identification and plastic type and classification of PET, HDPE, and PP using RGB method," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 857, no. 1, p. 012015, 2020/05/01 2020, doi: 10.1088/1757-899X/857/1/012015.

[16] S. Agarwal, R. Gudi, and P. Saxena, "Image Classification Approaches for Segregation of Plastic Waste Based on Resin Identification Code," *Transactions of the Indian National Academy of Engineering,* vol. 7, no. 3, pp. 739-751, 2022/09/01 2022, doi: 10.1007/s41403-022-00324-4.

[17] K. M. Cantor and P. Watts, "1 - Plastics Materials," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz Ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2011, pp. 3-5.

[18] M. Jaganmohan, "Plastic converters demand in the European Union (EU-27) in 2021, by polymer type,"

[19] W. C. Li, H. F. Tse, and L. Fok, "Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects," *Science of The Total Environment,* vol. 566-567, pp. 333-349, 2016/10/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084.

[20] S. C. Gall and R. C. Thompson, "The impact of debris on marine life," *Marine Pollution Bulletin,* vol. 92, no. 1, pp. 170-179, 2015/03/15/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041.

[21] M. Sigler, "The Effects of Plastic Pollution on Aquatic Wildlife: Current Situations and Future Solutions," *Water, Air, & Soil Pollution,* vol. 225, no. 11, p. 2184, 2014/10/18 2014, doi: 10.1007/s11270-014-2184-6.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[22] "Waste management indicators,"

[23] L. Shen and E. Worrell, "Chapter 31 - Plastic recycling," in *Handbook of Recycling (Second Edition)*, C. Meskers, E. Worrell, and M. A. Reuter Eds.: Elsevier, 2024, pp. 497-510.

[24] F. Perugini, M. L. Mastellone, and U. Arena, "A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes," *Environmental Progress,* vol. 24, no. 2, pp. 137-154, 2005.

[25] Z. O. Schyns and M. P. Shaver, "Mechanical recycling of packaging plastics: A review," *Macromolecular rapid communications,* vol. 42, no. 3, p. 2000415, 2021.

[26] I. Vollmer *et al.*, "Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste," *Angewandte Chemie International Edition,* vol. 59, no. 36, pp. 15402-15423, 2020, doi: https://doi.org/10.1002/anie.201915651.

[27] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Management,* vol. 69, pp. 24-58, 2017/11/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044.

[28] A. Angyal, N. Miskolczi, and L. Bartha, "Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste," *Journal of analytical and applied pyrolysis,* vol. 79, no. 1-2, pp. 409-414, 2007.

[29] F. Vilaplana and S. Karlsson, "Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 293, no. 4, pp. 274-297, 2008, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200700393.

[30] A. Ravve, *Principles of polymer chemistry*. Springer Science & Business Media, 2013.

[31] S. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste management,* vol. 29, no. 10, pp. 2625-2643, 2009.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[32] A. A. Garforth, S. Ali, J. Hernández-Martínez, and A. Akah, "Feedstock recycling of polymer wastes," *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* vol. 8, no. 6, pp. 419-425, 2004/12/01/ 2004, doi: https://doi.org/10.1016/j.cossms.2005.04.003.

[33] P. Quicker, M. Seitz, and J. Vogel, "Chemical recycling: A critical assessment of potential process approaches," *Waste Management & Research,* vol. 40, no. 10, pp. 1494-1504, 2022, doi: 10.1177/0734242x221084044.

[34] M. Garside, "Global plastic production statistics," *Retrieved from Statista. Available online: https://www. statista. com/statistics/282732/global (accessed on 1 August 2020),* 2019.

[35] J. Lusty Beech *et al.*, "A flexible kinetic assay efficiently sorts prospective biocatalysts for PET plastic subunit hydrolysis," *RSC Advances,* 10.1039/D2RA00612J vol. 12, no. 13, pp. 8119-8130, 2022, doi: 10.1039/D2RA00612J.

[36] Y. Li *et al.*, "Toward Making Poly(ethylene terephthalate) Degradable in Aqueous Environment," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 307, no. 4, p. 2100832, 2022, doi: https://doi.org/10.1002/mame.202100832.

[37] Damayanti and H.-S. Wu, "Strategic Possibility Routes of Recycled PET," *Polymers,* vol. 13, no. 9, p. 1475, 2021.

[38] J. R. Campanelli, D. G. Cooper, and M. R. Kamal, "Catalyzed hydrolysis of polyethylene terephthalate melts," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 53, no. 8, pp. 985-991, 1994, doi: https://doi.org/10.1002/app.1994.070530801.

[39] S. Kandasamy, A. Subramaniyan, G. Ramasamy, A. R. Ahamed, N. Manickam, and B. Dhandapani, "Study of alkaline hydrolysis of post consumed polyethylene terephthalate waste," *AIP Conference Proceedings,* vol. 2240, no. 1, 2020, doi: 10.1063/5.0011020.

[40] M. Siddiqui, H. Redhwi, A. Al-Arfaj, and D. Achilias, "Chemical Recycling of PET in the Presence of the Bio-Based Polymers, PLA, PHB and PEF: A Review," *Sustainability,* vol. 13, p. 10528, 09/23 2021, doi: 10.3390/su131910528.

[41] S. Mancini and M. Zanin, "Optimization of Neutral Hydrolysis Reaction of Post-consumer PET for Chemical Recycling," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology,* vol. 20, pp. 117-132, 05/01 2004, doi: 10.1177/147776060402000202.

[42] H. Abedsoltan, "A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate," *Polymer Engineering & Science,* vol. 63, no. 9, pp. 2651-2674, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/pen.26406.

[43] S. Sabde, G. D. Yadav, and R. Narayan, "Conversion of waste into wealth in chemical recycling of polymers: Hydrolytic depolymerization of polyethylene terephthalate into terephthalic acid and ethylene glycol using phase transfer catalysis," *Journal of Cleaner Production,* vol. 420, p. 138312, 2023/09/25/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138312.

[44] L. Krehula, Z. Hrnjak-Murgić, J. Jelenčić, and B. Andričić, "Evaluation of Poly(ethylene-terephthalate) Products of Chemical Recycling by Differential Scanning Calorimetry," *J. Polym. Environ.,* vol. 17, pp. 20-27, 03/01 2009, doi: 10.1007/s10924-009-0121-3.

[45] A. Sheel and D. Pant, "4 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis," in *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*, S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.K, and M. G. Thomas Eds.: William Andrew Publishing, 2019, pp. 61-84.

[46] A. Aguado *et al.*, "Chemical depolymerisation of PET complex waste: hydrolysis vs. glycolysis," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 16, no. 2, pp. 201-210, 2014/04/01 2014, doi: 10.1007/s10163-013-0177-y.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[47] B. Shojaei, M. Abtahi, and M. Najafi, "Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability," *Polymers for Advanced Technologies,* vol. 31, no. 12, pp. 2912-2938, 2020, doi: https://doi.org/10.1002/pat.5023.

[48] G. P. Karayannidis and D. S. Achilias, "Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 292, no. 2, pp. 128-146, 2007, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200600341.

[49] J. Xin *et al.*, "Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate," *Journal of Environmental Management,* vol. 296, p. 113267, 2021/10/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113267.

[50] Q. F. Yue, C. X. Wang, L. N. Zhang, Y. Ni, and Y. X. Jin, "Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts," *Polymer Degradation and Stability,* vol. 96, no. 4, pp. 399-403, 2011/04/01/ 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.020.

[51] X. Zhang, M. Fevre, G. O. Jones, and R. M. Waymouth, "Catalysis as an Enabling Science for Sustainable Polymers," *Chemical Reviews,* vol. 118, no. 2, pp. 839-885, 2018/01/24 2018, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00329.

[52] D. Lei *et al.*, "Rapid Glycolysis of Waste Polyethylene Terephthalate Fibers via a Stepwise Feeding Process," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 61, no. 14, pp. 4794-4802, 2022/04/13 2022, doi: 10.1021/acs.iecr.1c05022.

[53] D. E. Nikles and M. S. Farahat, "New Motivation for the Depolymerization Products Derived from Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Waste: a Review," *Macromolecular Materials and Engineering,* vol. 290, no. 1, pp. 13-30, 2005, doi: https://doi.org/10.1002/mame.200400186.

[54] A. Banerjee, K. Chatterjee, and G. Madras, "Enzymatic degradation of polymers: A brief review," *Materials Science and Technology,* vol. 30, no. 5, pp. 567-573, 2014, doi: 10.1179/1743284713y.0000000503.

[55] N. Mohanan, Z. Montazer, P. K. Sharma, and D. B. Levin, "Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics," (in English), *Frontiers in Microbiology,* Review vol. 11, 2020-November-26 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.580709.

[56] M. I. S. Aguiar, A. F. Sousa, G. Teixeira, A. P. M. Tavares, A. M. Ferreira, and J. A. P. Coutinho, "Enhancing plastic waste recycling: Evaluating the impact of additives on the enzymatic polymer degradation," *Catalysis Today,* vol. 429, p. 114492, 2024/03/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114492.

[57] J. Kaushal, M. Khatri, and S. K. Arya, "Recent insight into enzymatic degradation of plastics prevalent in the environment: A mini - review," *Cleaner Engineering and Technology,* vol. 2, p. 100083, 2021/06/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100083.

[58] Roohi *et al.*, "Microbial Enzymatic Degradation of Biodegradable Plastics," *Current Pharmaceutical Biotechnology,* vol. 18, no. 5, pp. 429-440, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.2174/1389201018666170523165742.

[59] A. Papadopoulou, K. Hecht, and R. Buller, "Enzymatic PET Degradation," *CHIMIA,* vol. 73, no. 9, p. 743, 09/18 2019, doi: 10.2533/chimia.2019.743.

[60] S. Giraldo-Narcizo, N. Guenani, A. M. Sánchez-Pérez, and A. Guerrero, "Accelerated Polyethylene Terephthalate (PET) Enzymatic Degradation by Room Temperature Alkali Pre-treatment for Reduced Polymer Crystallinity," *ChemBioChem,* vol. 24, no. 1, p. e202200503, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/cbic.202200503.

[61] S. Thiyagarajan, E. Maaskant-Reilink, T. A. Ewing, M. K. Julsing, and J. van Haveren, "Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes," *RSC Advances,* 10.1039/D1RA08217E vol. 12, no. 2, pp. 947-970, 2022, doi: 10.1039/D1RA08217E.

[62] V. Tournier *et al.*, "Enzymes' Power for Plastics Degradation," *Chemical Reviews,* vol. 123, no. 9, pp. 5612-5701, 2023/05/10 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00644.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[63] L. Navone, K. Moffitt, K.-A. Hansen, J. Blinco, A. Payne, and R. Speight, "Closing the textile loop: Enzymatic fibre separation and recycling of wool/polyester fabric blends," *Waste Management,* vol. 102, pp. 149-160, 2020/02/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.026.

[64] J. Egan, S. Wang, J. Shen, O. Baars, G. Moxley, and S. Salmon, "Enzymatic textile fiber separation for sustainable waste processing," *Resources, Environment and Sustainability,* vol. 13, p. 100118, 2023/09/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100118.

[65] M. S. Islam, Z. Islam, R. Hasan, and A. S. Islam Molla Jamal, "Acidic hydrolysis of recycled polyethylene terephthalate plastic for the production of its monomer terephthalic acid," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology,* vol. 39, no. 1, pp. 12-25, 2023, doi: 10.1177/14777606221128038.

[66] S. D. Mancini and M. Zanin, "Post Consumer Pet Depolymerization by Acid Hydrolysis," *Polymer-Plastics Technology and Engineering,* vol. 46, no. 2, pp. 135-144, 2007/02/14 2007, doi: 10.1080/03602550601152945.

[67] T. Yoshioka, T. Sato, and A. Okuwaki, "Hydrolysis of waste PET by sulfuric acid at 150°C for a chemical recycling," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 52, no. 9, pp. 1353-1355, 1994, doi: https://doi.org/10.1002/app.1994.070520919.

[68] S. Alias and N. A. Abdul-Hakim, "Terephthalic Acid (TPA) Recovery from Plastic Bottle of Polyethylene Terephthalate (PET) through Hydrolysis Treatment," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 1257, no. 1, p. 012007, 2022/10/01 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1257/1/012007.

[69] J. Xu, H. Wei, H. Chu, G. Zhang, and D. Chen, "Supercritical fluids as recorded in quartz megacrysts of the Late Jurassic porphyritic granitic dyke in the giant Dongping gold deposit, Northern China," *Journal of Asian Earth Sciences: X,* vol. 6, p. 100068, 2021.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[70] M. Goto, "Supercritical Water Process for the Chemical Recycling of Waste Plastics," *AIP Conference Proceedings,* vol. 1251, no. 1, pp. 169-172, 2010, doi: 10.1063/1.3529267.

[71] T. Sako *et al.*, "Depolymerization of Polyethylene Terephthalate to Monomers with Supercritical Methanol," *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN,* vol. 30, no. 2, pp. 342-346, 1997, doi: 10.1252/jcej.30.342.

[72] M. Goto, M. Sasaki, and T. Hirose, "Reactions of polymers in supercritical fluids for chemical recycling of waste plastics," *Journal of Materials Science,* vol. 41, no. 5, pp. 1509-1515, 2006/03/01 2006, doi: 10.1007/s10853-006-4615-2.

[73] Y. Li and S. Wang, "Supercritical water oxidation for environmentally friendly treatment of organic wastes," *Advanced Supercritical Fluids Technologies,* pp. 1-27, 2020.

[74] Y. Liu, J. Shi, H. Jin, and L. Guo, "Chemical recycling methods for managing waste plastics: a review," *Environmental Chemistry Letters,* vol. 22, no. 1, pp. 149-169, 2024/02/01 2024, doi: 10.1007/s10311-023-01664-5.

[75] L. Sepini, R. Mochel, I. Petri, A. Chappaz, and H. Demey, "Understanding the conversion mechanisms in supercritical water conditions of PET as a model compound of plastic wastes," *Chemical Engineering Journal,* vol. 488, p. 150567, 2024/05/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150567.

[76] Z. Guo *et al.*, "Chemical recycling of various PET plastic waste under alkaline hydrolysis via the LSR method," *Inorganic Chemistry Communications,* vol. 159, p. 111744, 2024/01/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111744.

[77] A. Barredo *et al.*, "Chemical recycling of monolayer PET tray waste by alkaline hydrolysis," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 11, no. 3, p. 109823, 2023/06/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109823.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[78] M. L. Maniar, D. S. Kalonia, and A. P. Simonelli, "Alkaline Hydrolysis of Oligomers of Tartrate Esters: Effect of a Neighboring Carboxyl on the Reactivity of Ester Groups," *Journal of Pharmaceutical Sciences,* vol. 81, no. 7, pp. 705-709, 1992, doi: 10.1002/jps.2600810724.

[79] K. A. Thorn, P. G. Thorne, and L. G. Cox, "Alkaline Hydrolysis/Polymerization of 2,4,6-Trinitrotoluene: Characterization of Products by 13C and 15N NMR," *Environmental Science & Technology,* vol. 38, no. 7, pp. 2224-2231, 2004/04/01 2004, doi: 10.1021/es030655a.

[80] T. Brueckner, A. Eberl, S. Heumann, M. Rabe, and G. M. Guebitz, "Enzymatic and chemical hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) fabrics," *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry,* vol. 46, no. 19, pp. 6435-6443, 2008, doi: https://doi.org/10.1002/pola.22952.

[81] G. P. Karayannidis, A. P. Chatziavgoustis, and D. S. Achilias, "Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid by alkaline hydrolysis," *Advances in Polymer Technology,* vol. 21, no. 4, pp. 250-259, 2002, doi: https://doi.org/10.1002/adv.10029.

[82] C. S. Bhogle and A. B. Pandit, "Ultrasound-Assisted Alkaline Hydrolysis of Waste Poly(Ethylene Terephthalate) in Aqueous and Non-aqueous Media at Low Temperature," *Indian Chemical Engineer,* vol. 60, no. 2, pp. 122-140, 2018/04/03 2018, doi: 10.1080/00194506.2017.1310634.

[83] G. P. Tsintzou and D. S. Achilias, "Chemical Recycling of Polycarbonate Based Wastes Using Alkaline Hydrolysis Under Microwave Irradiation," *Waste and Biomass Valorization,* vol. 4, no. 1, pp. 3-7, 2013/03/01 2013, doi: 10.1007/s12649-012-9125-7.

[84] S. Kumagai, S. Hirahashi, G. Grause, T. Kameda, H. Toyoda, and T. Yoshioka, "Alkaline hydrolysis of PVC-coated PET fibers for simultaneous recycling of PET and PVC,"

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

*Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 20, no. 1, pp. 439-449, 2018/01/01 2018, doi: 10.1007/s10163-017-0614-4.

[85] I. Čorak, A. Tarbuk, D. Đorđević, K. Višić, and L. Botteri, "Sustainable Alkaline Hydrolysis of Polyester Fabric at Low Temperature," *Materials,* vol. 15, no. 4, p. 1530, 2022.

[86] Z. Guo *et al.*, "Less solvent solid state reaction of sodium sulfite and sulfur," *Inorganic Chemistry Communications,* vol. 151, p. 110619, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110619.

[87] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, and A. S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Safety and Environmental Protection,* vol. 102, pp. 822-838, 2016/07/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022.

[88] I. Velghe, R. Carleer, J. Yperman, and S. Schreurs, "Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 92, no. 2, pp. 366-375, 2011.

[89] J. Scheirs and W. Kaminsky, *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. Chichester, UK; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2006.

[90] D. Chen, L. Yin, H. Wang, and P. He, "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review," *Waste Management,* vol. 34, no. 12, pp. 2466-2486, 2014/12/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004.

[91] A. Deka and R. D. Misra, "Influence of retention time and catalyst concentrations on catalytic pyrolysis yields of polyethylene and polystyrene," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* vol. 46, no. 1, pp. 5072-5093, 2024/12/31 2024, doi: 10.1080/15567036.2024.2335368.

[92] D. Y. Goswami, *The CRC handbook of mechanical engineering*. CRC press, 2004.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[93] G. Grause, S. Matsumoto, T. Kameda, and T. Yoshioka, "Pyrolysis of mixed plastics in a fluidized bed of hard burnt lime," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 50, no. 9, pp. 5459-5466, 2011.

[94] D. Achilias, C. Roupakias, P. Megalokonomos, A. Lappas, and E. Antonakou, "Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP)," *Journal of hazardous materials,* vol. 149, no. 3, pp. 536-542, 2007.

[95] K.-H. Lee, "Effects of the types of zeolites on catalytic upgrading of pyrolysis wax oil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 94, pp. 209-214, 2012.

[96] D. K. Ojha and R. Vinu, "Resource recovery via catalytic fast pyrolysis of polystyrene using zeolites," *Journal of analytical and applied pyrolysis,* vol. 113, pp. 349-359, 2015.

[97] A. López, I. De Marco, B. Caballero, M. Laresgoiti, A. Adrados, and A. Aranzabal, "Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud," *Applied Catalysis B: Environmental,* vol. 104, no. 3-4, pp. 211-219, 2011.

[98] M. Rehan *et al.*, "Pyrolytic liquid fuel: A source of renewable electricity generation in Makkah," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* vol. 38, no. 17, pp. 2598-2603, 2016/09/01 2016, doi: 10.1080/15567036.2016.1153753.

[99] T. Maqsood, J. Dai, Y. Zhang, M. Guang, and B. Li, "Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 159, p. 105295, 2021/10/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295.

[100] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, and P. Gupta, "Impact of fast and slow pyrolysis on the degradation of mixed plastic waste: Product yield analysis and their characterization," *Journal of the Energy Institute,* vol. 92, no. 6, pp. 1647-1657, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.009.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[101] W. J. Hall and P. T. Williams, "Fast Pyrolysis of Halogenated Plastics Recovered from Waste Computers," *Energy & Fuels,* vol. 20, no. 4, pp. 1536-1549, 2006/07/01 2006, doi: 10.1021/ef060088n.

[102] P. T. Williams, "Yield and Composition of Gases and Oils/Waxes from the Feedstock Recycling of Waste Plastic," in *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*, 2006, pp. 285-313.

[103] J. Jamradloedluk and C. Lertsatitthanakorn, "Characterization and Utilization of Char Derived from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes," *Procedia Engineering,* vol. 69, pp. 1437-1442, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.139.

[104] K. N. Aishwarya and N. Sindhu, "Microwave Assisted Pyrolysis of Plastic Waste," *Procedia Technology,* vol. 25, pp. 990-997, 2016/01/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.197.

[105] H. Arshad, S. A. Sulaiman, Z. Hussain, Y. Naz, and F. Basrawi, "Microwave assisted pyrolysis of plastic waste for production of fuels: a review," *MATEC Web Conf.,* vol. 131, p. 02005, 2017.

[106] X. Hu *et al.*, "Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse: A technical review," *Carbon Resources Conversion,* vol. 6, no. 3, pp. 215-228, 2023/09/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.03.002.

[107] A. Undri, L. Rosi, M. Frediani, and P. Frediani, "Efficient disposal of waste polyolefins through microwave assisted pyrolysis," *Fuel,* vol. 116, pp. 662-671, 2014/01/15/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.037.

[108] S. Goodman, "The microwave induced pyrolysis of problematic plastics enabling recovery and component reuse," Imperial College London, 2014.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[109] C. Ludlow-Palafox and H. A. Chase, "Microwave-Induced Pyrolysis of Plastic Wastes," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 40, no. 22, pp. 4749-4756, 2001/10/01 2001, doi: 10.1021/ie010202j.

[110] C. Yang, H. Shang, J. Li, X. Fan, J. Sun, and A. Duan, "A Review on the Microwave-Assisted Pyrolysis of Waste Plastics," *Processes,* vol. 11, no. 5, p. 1487, 2023.

[111] X. Jing *et al.*, "Interaction between feedstocks, absorbers and catalysts in the microwave pyrolysis process of waste plastics," *Journal of Cleaner Production,* vol. 291, p. 125857, 2021/04/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125857.

[112] P. H. M. Putra, S. Rozali, M. F. A. Patah, and A. Idris, "A review of microwave pyrolysis as a sustainable plastic waste management technique," *Journal of Environmental Management,* vol. 303, p. 114240, 2022/02/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114240.

[113] W. Kaminsky, "Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis," *Fuel Communications,* vol. 8, p. 100023, 2021/09/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100023.

[114] W. Kaminsky, "Chemical recycling of mixed plastics of pyrolysis," *Advances in Polymer Technology,* vol. 14, no. 4, pp. 337-344, 1995, doi: https://doi.org/10.1002/adv.1995.060140407.

[115] K. R. Gaston, M. W. Jarvis, P. Pepiot, K. M. Smith, W. J. Frederick, Jr., and M. R. Nimlos, "Biomass Pyrolysis and Gasification of Varying Particle Sizes in a Fluidized-Bed Reactor," *Energy & Fuels,* vol. 25, no. 8, pp. 3747-3757, 2011/08/18 2011, doi: 10.1021/ef200257k.

[116] F. J. Mastral, E. Esperanza, P. García, and M. Juste, "Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 63, no. 1, pp. 1-15, 2002/03/01/ 2002, doi: https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00137-1.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[117] L. A. De la Flor-Barriga and U. F. Rodríguez-Zúñiga, "Numerical analysis on a catalytic pyrolysis reactor design for plastic waste upcycling using CFD modelling," *RSC Advances,* 10.1039/D2RA01407F vol. 12, no. 20, pp. 12436-12445, 2022, doi: 10.1039/D2RA01407F.

[118] H. Zhang, J. Nie, R. Xiao, B. Jin, C. Dong, and G. Xiao, "Catalytic Co-pyrolysis of Biomass and Different Plastics (Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene) To Improve Hydrocarbon Yield in a Fluidized-Bed Reactor," *Energy & Fuels,* vol. 28, no. 3, pp. 1940-1947, 2014/03/20 2014, doi: 10.1021/ef4019299.

[119] S. Clemente-Castro, A. Palma, M. Ruiz-Montoya, I. Giráldez, and M. J. Díaz, "Optimizing pyrolysis parameters and product analysis of a fluidized bed pilot plant for Leucaena leucocephala biomass," *Environmental Sciences Europe,* vol. 35, no. 1, p. 88, 2023/10/31 2023, doi: 10.1186/s12302-023-00800-w.

[120] U. Arena, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review," *Waste management,* vol. 32, no. 4, pp. 625-639, 2012.

[121] K. P. Willis, S. Osada, and K. L. Willerton, "Plasma Gasification: Lessons Learned at Eco-Valley WTE Facility," in *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, 2010, vol. 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference, pp. 133-140, doi: 10.1115/nawtec18-3515. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/NAWTEC18-3515

[122] F. Fabry, C. Rehmet, V. Rohani, and L. Fulcheri, "Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review," *Waste and Biomass Valorization,* vol. 4, no. 3, pp. 421-439, 2013/09/01 2013, doi: 10.1007/s12649-013-9201-7.

[123] S. Kwon and S.-k. Im, "Thermodynamic evaluation of integrated plasma gasification combined cycle with plastic waste feedstock," *Chemical Engineering Journal,* vol. 482, p. 148771, 2024/02/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148771.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[124] D. Cudjoe and H. Wang, "Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis," *Fuel Processing Technology,* vol. 237, p. 107470, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470.

[125] I. J. Cho, H.-W. Park, D.-W. Park, and S. Choi, "Enhancement of synthesis gas production using gasification-plasma hybrid system," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 40, no. 4, pp. 1709-1716, 2015/01/30/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.007.

[126] U. Lee, J. N. Chung, and H. A. Ingley, "High-Temperature Steam Gasification of Municipal Solid Waste, Rubber, Plastic and Wood," *Energy & Fuels,* vol. 28, no. 7, pp. 4573-4587, 2014/07/17 2014, doi: 10.1021/ef500713j.

[127] V. Wilk and H. Hofbauer, "Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier," *Fuel,* vol. 107, pp. 787-799, 2013/05/01/ 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.068.

[128] K. G. Burra and A. K. Gupta, "Synergistic effects in steam gasification of combined biomass and plastic waste mixtures," *Applied Energy,* vol. 211, pp. 230-236, 2018/02/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.130.

[129] Z. Abu El-Rub, E. A. Bramer, and G. Brem, "Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 43, no. 22, pp. 6911-6919, 2004/10/01 2004, doi: 10.1021/ie0498403.

[130] H. C. Beachell and S. P. Nemphos, "Oxidative degradation of polyethylene," *Journal of Polymer Science,* vol. 21, no. 97, pp. 113-124, 1956, doi: https://doi.org/10.1002/pol.1956.120219710.

[131] Z. Wang, Z. Wang, D. Liu, and Q. Wang, "Peculiarity of the Mechanism of Early Stages of Photo-Oxidative Degradation of Linear Low-Density Polyethylene Films in the Presence of Ferric Stearate," *Polymers,* vol. 15, no. 18, p. 3672, 2023.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[132] D. Rasselet, A. Ruellan, A. Guinault, G. Miquelard-Garnier, C. Sollogoub, and B. Fayolle, "Oxidative degradation of polylactide (PLA) and its effects on physical and mechanical properties," *European Polymer Journal,* vol. 50, pp. 109-116, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.10.011.

[133] A. Rovaletti *et al.*, "Recent Theoretical Insights into the Oxidative Degradation of Biopolymers and Plastics by Metalloenzymes," *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 24, no. 7, p. 6368, 2023.

[134] W. Li, W. Zhao, H. Zhu, Z.-J. Li, and W. Wang, "State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics: from fundamental principles to catalysts and applications," *Journal of Materials Chemistry A,* 10.1039/D2TA09523H vol. 11, no. 6, pp. 2503-2527, 2023, doi: 10.1039/D2TA09523H.

[135] Y. Wang *et al.*, "A Review of Degradation and Life Prediction of Polyethylene," *Applied Sciences,* vol. 13, no. 5, p. 3045, 2023.

[136] M. S. Seshasayee and P. E. Savage, "Oil from plastic via hydrothermal liquefaction: Production and characterization," *Applied Energy,* vol. 278, p. 115673, 2020/11/15/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115673.

[137] A. Mathanker, S. Das, D. Pudasainee, M. Khan, A. Kumar, and R. Gupta, "A Review of Hydrothermal Liquefaction of Biomass for Biofuels Production with a Special Focus on the Effect of Process Parameters, Co-Solvents, and Extraction Solvents," *Energies,* vol. 14, no. 16, p. 4916, 2021.

[138] T. Helmer Pedersen and F. Conti, "Improving the circular economy via hydrothermal processing of high-density waste plastics," *Waste Management,* vol. 68, pp. 24-31, 2017/10/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.002.

[139] A. S. Jatoi *et al.*, "Hydrothermal Liquefaction of Lignocellulosic and Protein-Containing Biomass: A Comprehensive Review," *Catalysts,* vol. 12, no. 12, p. 1621, 2022.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[140] T. Rahman *et al.*, "Depolymerization of Household Plastic Waste via Catalytic Hydrothermal Liquefaction," *Energy & Fuels,* vol. 37, no. 17, pp. 13202-13217, 2023/09/07 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c01706.

[141] Y. Shen, "A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products," *Biomass and Bioenergy,* vol. 134, p. 105479, 2020/03/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105479.

[142] T. Lu, K. Jan, and W.-T. Chen, "Hydrothermal liquefaction of pretreated polyethylene-based ocean-bound plastic waste in supercritical water," *Journal of the Energy Institute,* vol. 105, pp. 282-292, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.10.003.

[143] A. Gluth, Z. Xu, L. S. Fifield, and B. Yang, "Advancing biological processing for valorization of plastic wastes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 170, p. 112966, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112966.

[144] J. Gu, "Microbial corrosion of metals and deterioration of polymeric materials," *Journal of Materials Engineering,* 1999.

[145] A. A. Hussein, M. Alzuhairi, and N. H. Aljanabi, "Degradation and depolymerization of plastic waste by local bacterial isolates and bubble column reactor," *AIP Conference Proceedings,* vol. 1968, no. 1, 2018, doi: 10.1063/1.5039268.

[146] Y. Wu, Q. Hu, Y. Che, and Z. Niu, "Opportunities and challenges for plastic depolymerization by biomimetic catalysis," *Chemical Science,* 10.1039/D4SC00070F vol. 15, no. 17, pp. 6200-6217, 2024, doi: 10.1039/D4SC00070F.

[147] S. Meenakshisundaram, A. Fayeulle, E. Léonard, C. Ceballos, X. Liu, and A. Pauss, "Combined Biological and Chemical/Physicochemical Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol and Biomethane Energy Production—A Review," *Applied Microbiology,* vol. 2, no. 4, pp. 716-734, 2022.

T A
Č R
Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[148] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed, "Biological degradation of plastics: A comprehensive review," *Biotechnology Advances,* vol. 26, no. 3, pp. 246-265, 2008/05/01/ 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.

[149] G.-Q. Chen and M. K. Patel, "Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review," *Chemical Reviews,* vol. 112, no. 4, pp. 2082-2099, 2012/04/11 2012, doi: 10.1021/cr200162d.

[150] R. Koshti, L. Mehta, and N. Samarth, "Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review," *Journal of Polymers and the Environment,* vol. 26, no. 8, pp. 3520-3529, 2018/08/01 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1214-7.

[151] R.-T. Guo *et al.*, "Natural and engineered enzymes for polyester degradation: a review," *Environmental Chemistry Letters,* vol. 22, no. 3, pp. 1275-1296, 2024/06/01 2024, doi: 10.1007/s10311-024-01714-6.

[152] C. Weng, X. Peng, and Y. Han, "Depolymerization and conversion of lignin to value-added bioproducts by microbial and enzymatic catalysis," *Biotechnology for Biofuels,* vol. 14, no. 1, p. 84, 2021/04/03 2021, doi: 10.1186/s13068-021-01934-w.

[153] L. Aristizábal-Lanza, S. V. Mankar, C. Tullberg, B. Zhang, and J. A. Linares-Pastén, "Comparison of the enzymatic depolymerization of polyethylene terephthalate and AkestraTM using Humicola insolens cutinase," (in English), *Frontiers in Chemical Engineering,* Original Research vol. 4, 2022-December-13 2022, doi: 10.3389/fceng.2022.1048744.

[154] C. Catizane, Y. Jiang, and J. Sumner, "Improving plastic pyrolysis oil quality via an electrochemical process for polymer recycling: a review," *Energy Advances,* 10.1039/D3YA00389B vol. 3, no. 2, pp. 366-388, 2024, doi: 10.1039/D3YA00389B.

[155] H. A. Petersen, T. H. T. Myren, S. J. O'Sullivan, and O. R. Luca, "Electrochemical methods for materials recycling," *Materials Advances,* 10.1039/D0MA00689K vol. 2, no. 4, pp. 1113-1138, 2021, doi: 10.1039/D0MA00689K.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[156] T. Jiang *et al.*, "STEP polymer degradation: Solar thermo-coupled electrochemical depolymerization of plastics to generate useful fuel plus abundant hydrogen," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 204, p. 110208, 2020/01/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110208.

[157] R. Shi, K.-S. Liu, F. Liu, X. Yang, C.-C. Hou, and Y. Chen, "Electrocatalytic reforming of waste plastics into high value-added chemicals and hydrogen fuel," *Chemical Communications,* 10.1039/D1CC05032J vol. 57, no. 94, pp. 12595-12598, 2021, doi: 10.1039/D1CC05032J.

[158] T. Xayachak, N. Haque, D. Lau, R. Parthasarathy, and B. K. Pramanik, "Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study," *Process Safety and Environmental Protection,* vol. 173, pp. 592-603, 2023/05/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.061.

[159] L. Zou, R. Xu, H. Wang, Z. Wang, Y. Sun, and M. Li, "Chemical recycling of polyolefins: a closed-loop cycle of waste to olefins," *National Science Review,* vol. 10, no. 9, 2023, doi: 10.1093/nsr/nwad207.

[160] M. G. Davidson, R. A. Furlong, and M. C. McManus, "Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review," *Journal of Cleaner Production,* vol. 293, p. 126163, 2021/04/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163.

[161] H. Alhazmi, F. H. Almansour, and Z. Aldhafeeri, "Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies," *Sustainability,* vol. 13, no. 10, p. 5340, 2021.

[162] L. Shen, E. Worrell, and M. K. Patel, "Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 55, no. 1, pp. 34-52, 2010/11/01/ 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

[163] G. Faraca, V. Martinez-Sanchez, and T. F. Astrup, "Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 143, pp. 299-309, 2019/04/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.014.

[164] N. Gandhi, N. Farfaras, N.-H. L. Wang, and W.-T. Chen, "Life Cycle Assessment of Recycling High-Density Polyethylene Plastic Waste," *Journal of Renewable Materials,* vol. 9, no. 8, pp. 1463-1483, // 2021, doi: 10.32604/jrm.2021.015529.

[165] A. Fonseca, E. Ramalho, A. Gouveia, F. Figueiredo, and J. Nunes, "Life Cycle Assessment of PLA Products: A Systematic Literature Review," *Sustainability,* vol. 15, no. 16, p. 12470, 2023.

[166] G. Finnveden *et al.*, "Recent developments in Life Cycle Assessment," *Journal of Environmental Management,* vol. 91, no. 1, pp. 1-21, 2009/10/01/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

[167] E. M. Technical Committee ISO/TC 207, *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006.

[168] G. Finnveden, A. Björklund, M. C. Reich, O. Eriksson, and A. Sörbom, "Flexible and robust strategies for waste management in Sweden," *Waste Management,* vol. 27, no. 8, pp. S1-S8, 2007/01/01/ 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.017.

[169] A. Scipioni, A. Mazzi, M. Niero, and T. Boatto, "LCA to choose among alternative design solutions: The case study of a new Italian incineration line," *Waste Management,* vol. 29, no. 9, pp. 2462-2474, 2009/09/01/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.007.

[170] A. Laurent *et al.*, "Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives," *Waste Management,* vol. 34, no. 3, pp. 573-588, 2014/03/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045.

[171] T. F. Astrup, D. Tonini, R. Turconi, and A. Boldrin, "Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations," *Waste Management,* vol. 37, pp. 104-115, 2015/03/01/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.011.

[172] U. R. Gracida-Alvarez, P. T. Benavides, U. Lee, and M. Wang, "Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis," *Journal of Cleaner Production,* vol. 425, p. 138867, 2023/11/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138867.

[173] A. Demetrious and E. Crossin, "Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 21, no. 4, pp. 850-860, 2019/07/01 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00842-4.

[174] F. Ardolino, C. Lodato, T. F. Astrup, and U. Arena, "Energy recovery from plastic and biomass waste by means of fluidized bed gasification: A life cycle inventory model," *Energy,* vol. 165, pp. 299-314, 2018/12/15/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.158.

[175] H. Stančin, V. Strezov, and H. Mikulčić, "Life cycle assessment of alternative fuel production by co-pyrolysis of waste biomass and plastics," *Journal of Cleaner Production,* vol. 414, p. 137676, 2023/08/15/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137676.

[176] L. Pires Costa, D. M. Vaz de Miranda, and J. C. Pinto, "Critical Evaluation of Life Cycle Assessment Analyses of Plastic Waste Pyrolysis," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 10, no. 12, pp. 3799-3807, 2022/03/28 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c00265.

[177] S. Das, C. Liang, and J. B. Dunn, "Plastics to fuel or plastics: Life cycle assessment-based evaluation of different options for pyrolysis at end-of-life," *Waste Management,*

vol. 153, pp. 81-88, 2022/11/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.015.

[178] M. U. Azam, A. Vete, and W. Afzal, "Process Simulation and Life Cycle Assessment of Waste Plastics: A Comparison of Pyrolysis and Hydrocracking," *Molecules,* vol. 27, no. 22, p. 8084, 2022.

[179] T. Xayachak *et al.*, "Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 10, no. 6, p. 108865, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865.

[180] J. Dong, "MSWs gasification with emphasis on energy, environment and life cycle assessment

Etude de la gazéification d'ordures ménagères avec un intérêt particulier pour les bilans énergétiques, environnementaux couplés à l'analyse de cycle de vie," Ecole des Mines d'Albi-Carmaux

Zhejiang University. Institute for Thermal Power Engineering, 2016EMAC0017, 2016. [Online]. Available: https://theses.hal.science/tel-01540764

[181] S. Afzal *et al.*, "Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen," *Green Chemistry,* 10.1039/D3GC00679D vol. 25, no. 13, pp. 5068-5085, 2023, doi: 10.1039/D3GC00679D.

[182] K. Lan and Y. Yao, "Feasibility of gasifying mixed plastic waste for hydrogen production and carbon capture and storage," *Communications Earth & Environment,* vol. 3, no. 1, p. 300, 2022/11/29 2022, doi: 10.1038/s43247-022-00632-1.

[183] A. S. Ouedraogo, R. S. Frazier, and A. Kumar, "Comparative Life Cycle Assessment of Gasification and Landfilling for Disposal of Municipal Solid Wastes," *Energies,* vol. 14, no. 21, p. 7032, 2021.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[184] S. Ügdüler *et al.*, "Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis," *Green Chemistry,* 10.1039/D0GC00894J vol. 22, no. 16, pp. 5376-5394, 2020, doi: 10.1039/D0GC00894J.

[185] M. Iturrondobeitia, L. Alonso, and E. Lizundia, "Prospective life cycle assessment of poly (ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 198, p. 107182, 2023/11/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107182.

[186] D. Tonini and T. Astrup, "Life-cycle assessment of a waste refinery process for enzymatic treatment of municipal solid waste," *Waste Management,* vol. 32, no. 1, pp. 165-176, 2012/01/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.027.

[187] A. Singh *et al.*, "Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate)," *Joule,* vol. 5, no. 9, pp. 2479-2503, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.06.015.

[188] Y. Yang, K. Seo, J. S.-I. Kwon, and W. Won, "Process Integration for the Production of Bioplastic Monomer: Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Assessment," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 12, no. 30, pp. 11167-11180, 2024/07/29 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.4c01783.

[189] E. Rezvani Ghomi *et al.*, "The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material," *Polymers,* vol. 13, no. 11, p. 1854, 2021.

[190] A. Amobonye, P. Bhagwat, S. Singh, and S. Pillai, "Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes," *Science of The Total Environment,* vol. 759, p. 143536, 2021/03/10/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536.

[191] S. Mohapatra *et al.*, "14 - Life cycle analyses and carbon footprint of bioplastics," in *Bioplastics for Sustainability*, A. K. Mishra and C. M. Hussain Eds.: Elsevier, 2024, pp. 355-369.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

[192] E. A. R. Zuiderveen, D. Ansovini, G.-J. M. Gruter, and L. Shen, "Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process," *Cleaner Environmental Systems,* vol. 2, p. 100036, 2021/06/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100036.

[193] E. M. Iannicelli-Zubiani, M. I. Giani, F. Recanati, G. Dotelli, S. Puricelli, and C. Cristiani, "Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study," *Journal of Cleaner Production,* vol. 140, pp. 1204-1216, 2017/01/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.040.

[194] C. Walls *et al.*, "Recycling of Metallized Plastic as a Case Study for a Continuous Sustainability Improvement Process," *Sustainability,* vol. 15, no. 20, p. 14737, 2023.

[195] R. S. Rubin, M. A. S. d. Castro, D. Brandão, V. Schalch, and A. R. Ometto, "Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap," *Journal of Cleaner Production,* vol. 64, pp. 297-305, 2014/02/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051.

[196] B. Pillain *et al.*, "Positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment," *The Journal of Supercritical Fluids,* vol. 154, p. 104607, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104607.

[197] S. Lee, H. Lee, J. Lee, and H. Cho, "Sustainable chemical recycling of waste plastics into olefins through low-pressure hydrothermal liquefaction and microwave pyrolysis: Techno-economic analysis and life cycle assessment," *Energy Conversion and Management,* vol. 317, p. 118861, 2024/10/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118861.

[198] F. Hussin, N. N. Hazani, M. Khalil, and M. K. Aroua, "Environmental life cycle assessment of biomass conversion using hydrothermal technology: A review," *Fuel*

*Processing Technology,* vol. 246, p. 107747, 2023/07/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107747.

[199] U. Lee, P. T. Benavides, and M. Wang, "Chapter 8 - Life cycle analysis of waste-to-energy pathways," in *Waste-to-Energy*, J. Ren Ed.: Academic Press, 2020, pp. 213-233.

[200] O. García-Depraect *et al.*, "Inspired by nature: Microbial production, degradation and valorization of biodegradable bioplastics for life-cycle-engineered products," *Biotechnology Advances,* vol. 53, p. 107772, 2021/12/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107772.

[201] S. Oh and E. E. Stache, "Recent advances in oxidative degradation of plastics," *Chemical Society Reviews,* 10.1039/D4CS00407H vol. 53, no. 14, pp. 7309-7327, 2024, doi: 10.1039/D4CS00407H.

[202] G. Croxatto Vega, A. Gross, and M. Birkved, "The impacts of plastic products on air pollution - A simulation study for advanced life cycle inventories of plastics covering secondary microplastic production," *Sustainable Production and Consumption,* vol. 28, pp. 848-865, 2021/10/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.008.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz