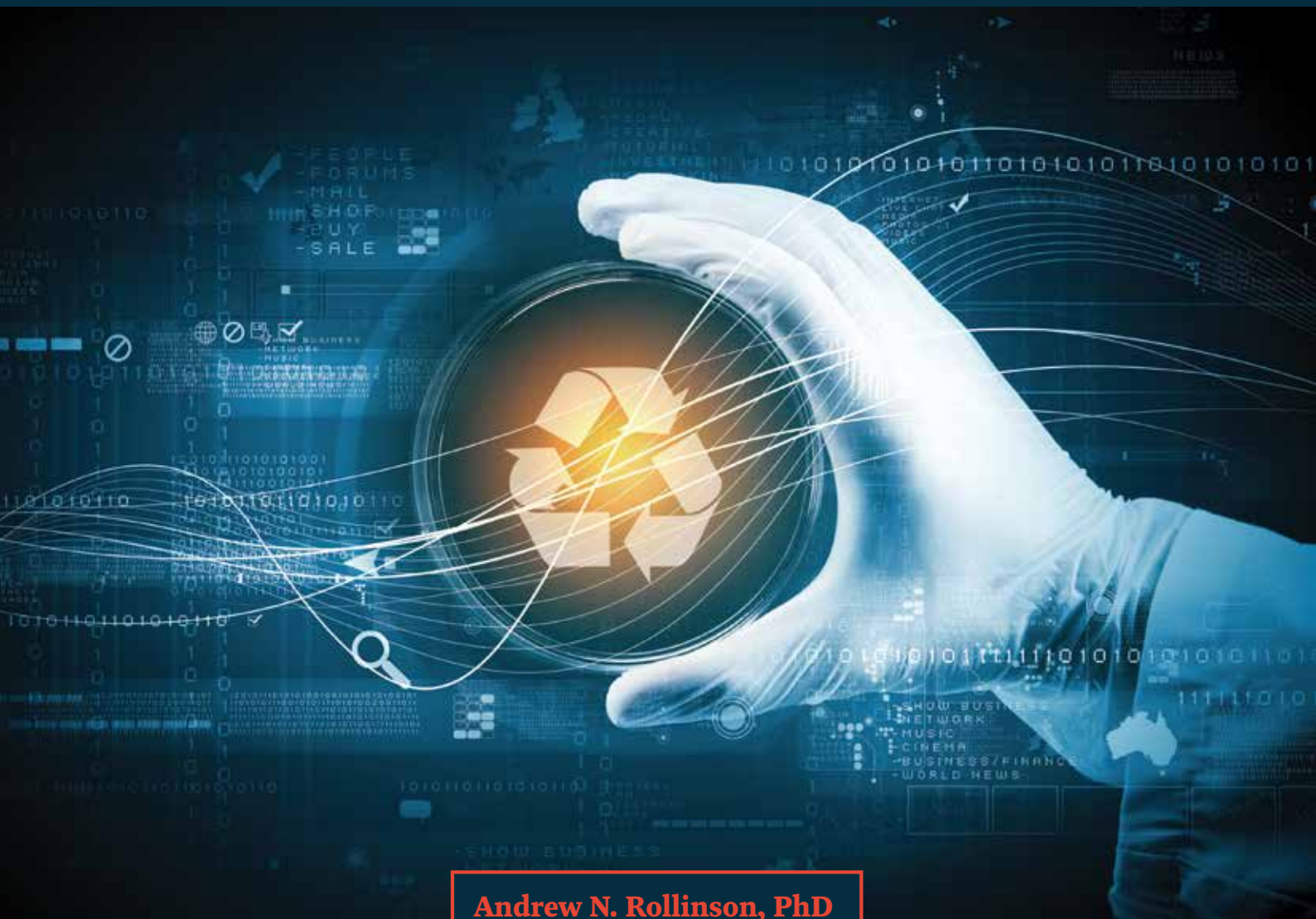


# CHEMICKÁ RECYKLACE:

JEJÍ STAV, UDRŽITELNOST  
A VLIVY NA ŽIVOTNÍ  
PROSTŘEDÍ



**Andrew N. Rollinson, PhD**  
**Jumoke Oladejo, PhD**



## Poděkování

Autory tohoto technického hodnocení jsou Andrew N. Rollinson, PhD a Jumoke Oladejo, PhD. Editovali ho Neil Tangri, PhD a Doun Moon a další podporu poskytli Agnese Marcon, Claire Arkin, Denise Patel, Janek Vahk, Marisa Nordstrom, Sirine Rached, Sonia Astudilo a Yobel Novian Putra.

Vypracování této studie částečně umožnila finanční podpora z fondu Plastic Solutions Fund (PSF). Názory vyjadřované v této publikaci nemusí nutně odrážet názory PSF.

Tuto zprávu nebo její části je možné reprodukovat pro nekomerční účely za podmínky, že bude plně uveden zdroj. Reprodukce k prodeji nebo komerčním účelům je zakázána bez písemného souhlasu držitele autorských práv.

**Citujte tuto studii takto:** Rollinson, A., Oladejo, J. (2020). Chemical Recycling: Status, Sustainability, and Environmental Impacts. *Global Alliance for Incinerator Alternatives*. doi: 10.46556/ONLS4535

**Originální text této publikace *Chemical Recycling: Status, Sustainability, and Environmental Impact* v anglickém jazyce najdete na tomto odkazu:** [www.no-burn.org/cr-technical-assessment](http://www.no-burn.org/cr-technical-assessment)



© 2020 Global Alliance for Incinerator Alternatives  
1958 University Avenue  
Berkeley, CA 94704, USA  
[www.no-burn.org](http://www.no-burn.org)

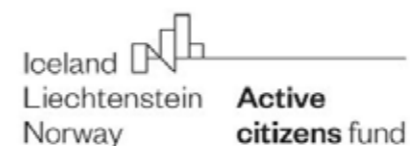
GAIA je globální síť více než 800 občanských iniciativ, nevládních organizací a jednotlivců. Naším cílem je spravedlivý svět bez odpadů, postavený na respektu k ekologickým mezím a lidským právům, kde lidé nejsou zatíženi toxickým znečištěním a zdroje jsou udržitelným způsobem zachovávány, ne páleny nebo ukládány na skládky. Podporujeme globální posun směrem k environmentální spravedlnosti pomocí posilování občanských sociálních hnutí, která napomáhají řešení problému odpadů a znečištění.



Arnika je česká nezisková organizace. Naším posláním je chránit přírodu a zdravé životní prostředí pro budoucí generace doma i ve světě. Dlouhodobě prosazujeme méně odpadů a nebezpečných látek, živé řeky a pestrou přírodu a právo občanů rozhodovat o životním prostředí.

Projekt, v rámci kterého český překlad studie vznikl, podpořila Nadace OSF v rámci programu Active Citizens Fund, jehož cílem je podpora občanské společnosti a posílení kapacit neziskových organizací. Cílem programu je dále inspirace k aktivnímu občanství a pomoc znevýhodněným skupinám. Program Active Citizens Fund vstoupil do České republiky v září roku 2019 s cílem podpořit neziskové organizace neohledně na jejich velikost a zkušenosti. V České republice jej spravuje konsorcium, které tvoří Nadace OSF, Výbor dobré vůle - Nadace Olgy Havlové a Skautský institut. Program je realizován v rámci Fondů EHP a Norska 2014 - 2021. Prostřednictvím Fondů EHP a Norska přispívají státy Island, Lichtenštejnsko a Norsko ke snižování ekonomických a sociálních rozdílů v Evropském hospodářském prostoru (EHP) a k posilování spolupráce s 15 evropskými státy. Důležitým posláním programu je také spolupráce mezi Českou republikou a dárcovskými státy. Jde o spolupráci mezi českými neziskovými organizacemi a organizacemi z Islandu, Lichtenštejnska a Norska.

Vydání českého překladu studie finančně podpořil také Global Greengrants Fund.



| Nadace OSF



Český překlad této studie připravila v roce 2021 organizace **Arnika - program Toxické látky a odpady**.

Autor překladu: Tomáš Hakr

Autor grafické úpravy: Pavel Jaloševský

Český překlad shrnutí této studie vznikl v roce 2020 pod názvem Chemická recyklace:

Odvedení pozornosti, ne řešení a najdete ho na našich stránkách [www.arnika.org](http://www.arnika.org).





## Obsah

Poděkování.....	3
<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Vysvětlení konceptu chemické recyklace .....</b>	<b>9</b>
2. 1. Terminologie .....	9
Chemická recyklace	
Recyklace	
Plasty používané jako surovina	
2. 2. Typy technologií.....	11
Zplyňování (gasifikace) a pyrolýza	
Převedení plastů na plasty (P2P) pomocí pyrolýzy a zplyňování	
Převedení plastů na palivo (P2F) pomocí pyrolýzy a zplyňování	
Technologie solvolýzy / zkapalňování	
2. 3. Srovnání se zavedenými technologiemi nakládání s odpady.....	15
Srovnání mechanické a chemické recyklace	
Spalování	
2. 4. Shrnutí .....	16
<b>3. Problémy.....</b>	<b>17</b>
3. 1. Nízká praktická využitelnost a nedostatek dat.....	17
3. 2. Nepříznivé vlivy na životní prostředí .....	21
Toxické látky přítomné v plastech	
Emise a vedlejší produkty vznikající během procesu	
Toxicita výsledného plynu, oleje a uhlíkového zbytku	
3. 3. Spotřeba energie a produkce oxidu uhličitého .....	25
<b>4. Perspektiva systémů .....</b>	<b>28</b>
<b>5. Závěry.....</b>	<b>29</b>
<b>Slovníček pojmů, zkratky a literatura.....</b>	<b>30</b>

## 1. Úvod

V důsledku extrémně rychlého růstu produkce plastů, v kombinaci se současnými nedostatkami mechanické recyklace a nynějším rozpadem globálních exportních trhů, se mnohé orgány místní správy a národní vlády usilovně snaží zvládnout problém hromadícího se plastového odpadu. V reakci na to rychle roste počet navrhovaných technologií, které údajně mají účinně a udržitelně přeměňovat odpadní plast buď na palivo, nebo na petrochemické suroviny (Closed Loop Partners, 2019). V polovině listopadu 2019 popsal výkonný viceprezident globální chemické sekce firmy Shell tuto myšlenku následovně (Hydrocarbon Processing, 2019):

**„Chceme vzít odpadní plasty, které je těžké recyklovat tradičními způsoby, a znovu z nich vyrobit chemické suroviny – vytvořit cyklus. Dává to smysl z hlediska životního prostředí i podnikání.“**

Mnozí kritici však přínosy chemické recyklace pro životní prostředí a její udržitelnost zpochybňují. Například na mezinárodní konferenci v říjnu 2019 profesor Peter Quicker uvedl, že motivy k podpoře technologií označovaných jako chemická recyklace „nejsou závislé na jejím ekologickém smyslu a racionalitě“ (Quicker, 2019). Dále popsal praktické výhrady vůči těmto technologiím následovně:

**„(..) podle mnoha odborníků nejsou technologie chemické recyklace správnou cestou. To, co je na plastech cenné, tedy polymerní struktura, se rozloží a převede se na horší produkt, jako je málo kvalitní olej, který je potřeba velmi složitě zpracovávat, aby se z něj znovu vyrobil plast.“**

Společnost hledá cesty, jak opustit spotřebu fosilních paliv a zmírňovat nebezpečí, které představuje znečištění plasty. Vlády, občané a nevládní organizace se proto v současné době snaží posoudit koncept chemické recyklace, postrádají však nezávislá data o takto označovaných technologiích a jejich možnostech nebo jich nemají dostatek. V zájmu řešení tohoto problému se tato studie, vycházející převážně z recenzované literatury, která nebyla financována průmyslem, zabývá následujícími otázkami souvisejícími s chemickou recyklací plastů:

- \* **1. V čem tyto technologie spočívají a jak vypadá jejich srovnání s jinými způsoby nakládání s plastovým odpadem?**
- \* **2. Jaké jsou jejich vlivy na životní prostředí?**
- \* **3. Jsou trvale udržitelné?**
- \* **4. Existuje dnes technologie připravená k reálnému využití? Případně je pravděpodobné, že bude existovat během příštích deseti let?**

## 2. Vysvětlení konceptu chemické recyklace

### Terminologie

### Typy technologií

### Srovnání se zavedenými technologiemi nakládání s odpady

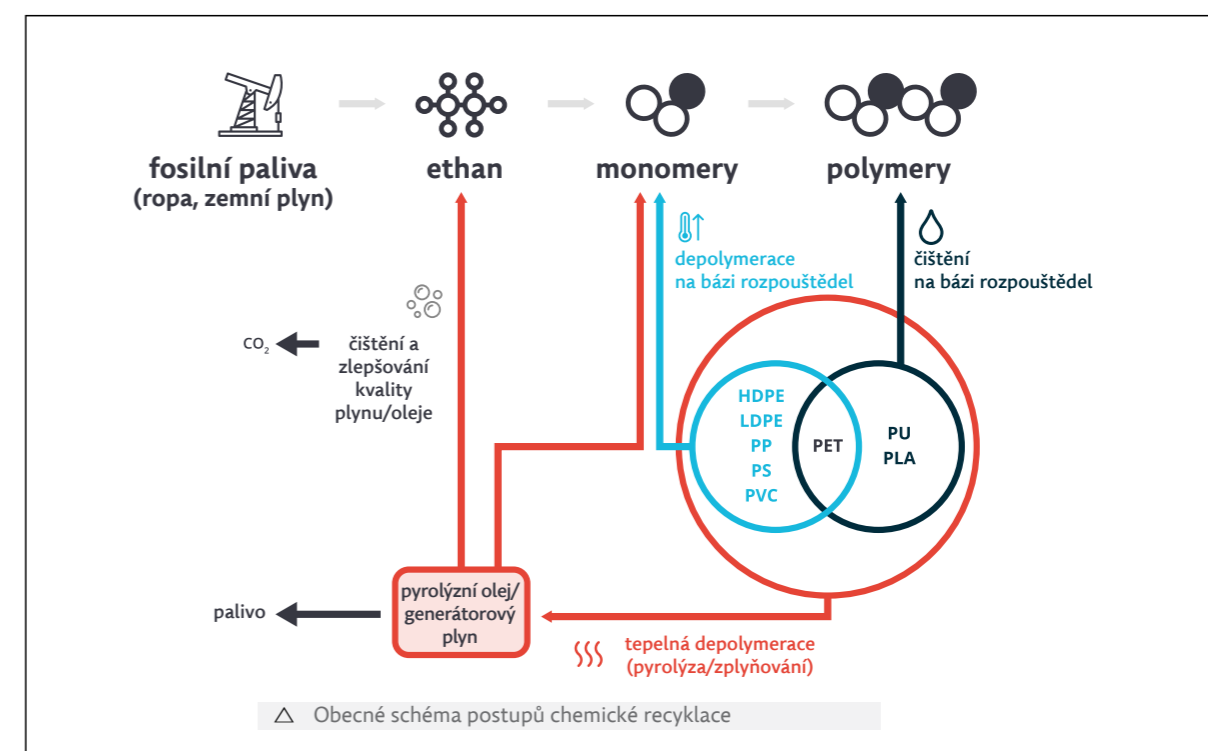
### Shrnutí

### 2. 1. Terminologie

#### Chemická recyklace

Termín „chemická recyklace“ nemá formální definici, ale označuje různorodý soubor technologií vyvinutých chemickým inženýrstvím. Tyto technologie obecně podrobují plastový odpad kombinaci působení tepla, tlaku a/nebo dalších chemických látek v nějakém typu reakční nádoby. Z produktu tohoto procesu je potom teoreticky možné vyrobit nové plasty nebo palivo, v závislosti na použité technologii a následném zpracování (obrázek 1).

Obrázek 1:



Vysvětlení zkratk jednotlivých typů plastů viz Slovníček pojmů, zkratky a literatura.

## Recyklace

Evropská unie definuje „recyklaci“ následovně:

**„Jakýkoli způsob využití, jímž je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo pro jiné účely. Zahrnuje přepracování organických materiálů, ale nezahrnuje energetické využití a přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo (...).“**

Oxfordský slovník angličtiny nabízí přísnější definici recyklace. Podle něj jde o: **„navrácení (materiálu) do předchozího stádia cyklického procesu“.**

Při hodnocení chemické recyklace je klíčové rozlišovat mezi přeměnou odpadního plastu zpět na plast podobné kvality a jeho přeměnou na jiné produkty s nižší hodnotou, jako je palivo. První zmíněný postup dává možnost uzavřené materiálové smyčky u plastů, kterou se minimalizuje jak likvidace odpadů, tak těžba přírodních zdrojů. Druhý pak má relativně malý přínos pro životní prostředí (Hopewell et al., 2009).

## Plasty používané jako surovina

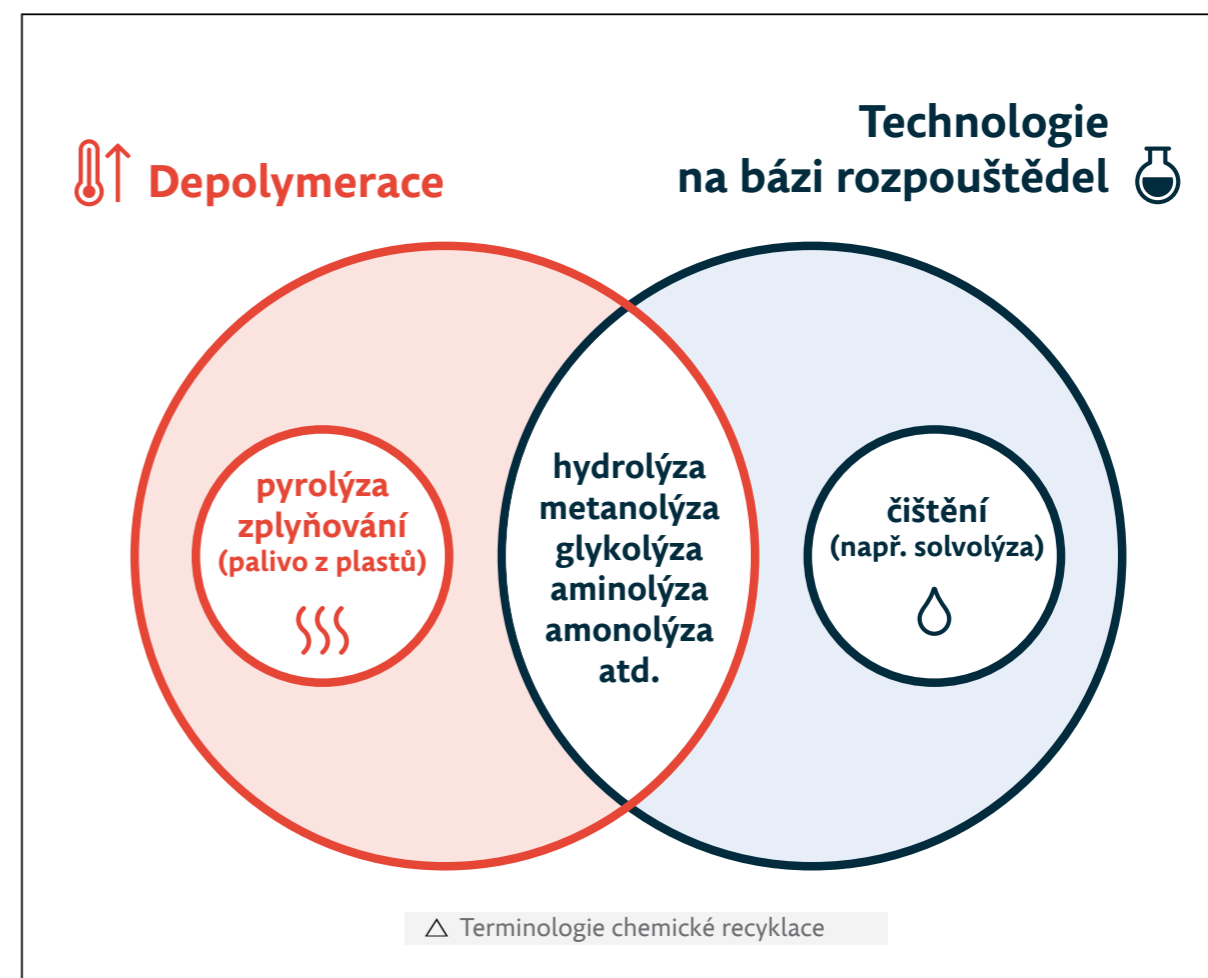
Slovo „plast“ vychází ze schopnosti materiálu za určitých podmínek teploty a tlaku téci nebo se deformovat. „Plasty“, jak se tento termín běžně používá, jsou uhlovodíkové polymery – sloučeniny s dlouhými řetězci, složené z menších monomerů, které tvoří rozvětvené a cyklické makromolekuly – které v některém stupni výrobního procesu tečou nebo se deformují. Nejběžnějšími typy odpadních plastů jsou: polyolefiny, včetně vysokohustotního polyetyleny (HDPE), nízkohustotního polyetyleny (LDPE) a polypropylenu (PP), polystyren (PS), polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC), kopolymer etylenu a propylenu (EPC), polyamid (PA), polymléčná kyselina (PLA) a polyuretan (PU).

Plastové polymery se původně vyráběly z přírodní celulózy, dnes se jich ale velká většina vyrábí z petrochemických produktů, přičemž za zvyšováním výroby stojí zejména břídlíkový plyn (American Chemistry Council, 2019). Výhodné vlastnosti petrochemických plastů – jejich trvanlivost a odolnost vůči přirozenému enzymatickému rozkladu – jsou tytéž vlastnosti, které způsobují, že jsou nebezpečné pro biosféru. Ačkoli jsou k dispozici biologicky odbouratelné plasty a plasty biologického původu, jejich využití není příliš rozšířené (Spierling et al., 2018).

V terminologii chemické technologie se jako „surovina“ označují materiálové vstupy určitého procesu. Naše studie se týká plastového odpadu jakožto suroviny chemické recyklace. Některé z popsaných technologií chemické recyklace jsou schopné zpracovávat jako surovinu pouze jediný polymer. Jiné jsou schopné zpracovávat různé plasty, v takovém případě však u nich může být nutné provedení rozsáhlých změn v nastavení, což znamená, že je prakticky pro každý polymer potřeba zvláštního zařízení.

## 2. 2. Typy technologií

Obrázek 2:



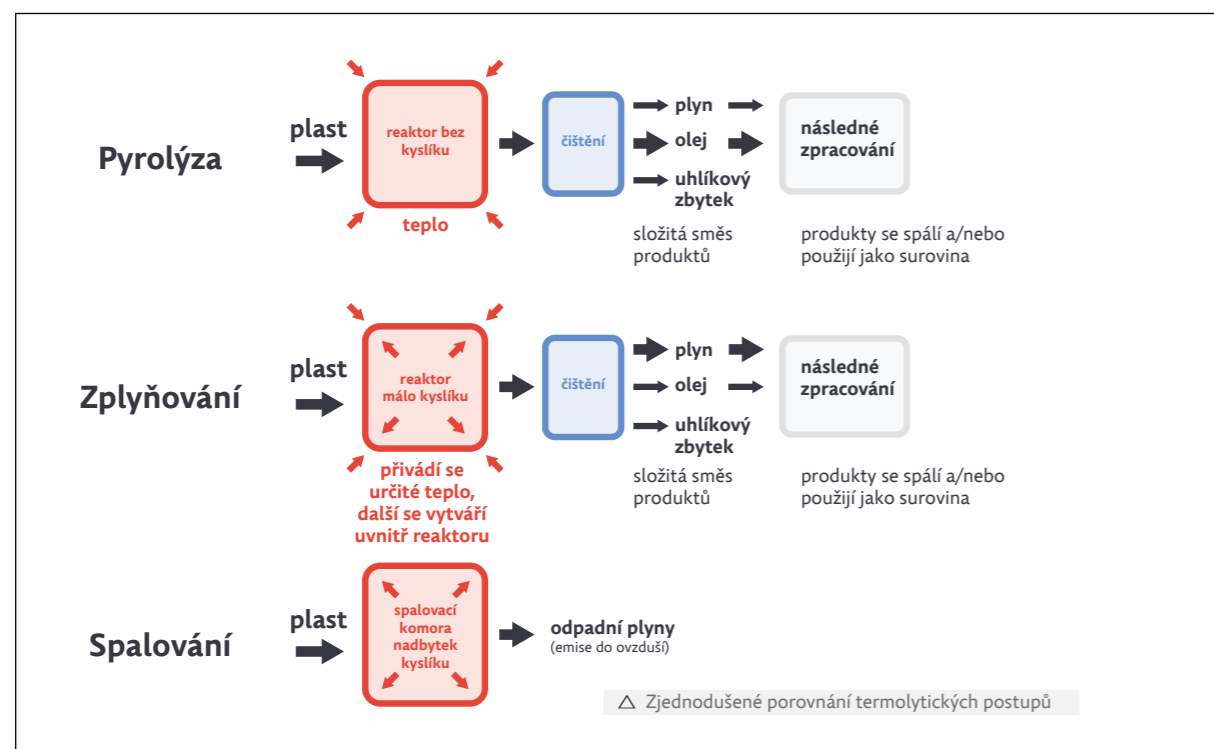
*Produkty pyrolýzy a zplyňování je možné po dalším zlepšení jejich kvality použít k výrobě nových plastů, typicky se ale spalují pro získání energie.*

Technologie chemické recyklace je možné rozdělit do dvou kategorií: termolýzu a postupy na bázi rozpouštědel (obrázek 2). Termolýza doslova znamená „změna působením tepla“ a ačkoli v širokém slova smyslu zahrnuje spalování a rozsáhlou řadu jiných chemických procesů, jsou jedinými způsoby termolýzy využitelnými pro chemickou recyklaci pyrolýza a zplyňování (gasifikace). Při nich se na plasty používané jako surovina působí v reaktoru, z něhož byl odčerpán kyslík, vysokými teplotami s cílem rozštěpit polymery na menší fragmenty. Proto se tyto procesy označují také jako depolymerační či depolymerizační technologie. Tyto fragmenty lze poté teoreticky znovu polymerovat pro získání nových plastů, nebo je jednoduše pálit jako palivo s jinými produkty (např. elektrická energie nebo teplo). Technologie na bázi rozpouštědel používají pro zpracování plastů řadu látek, často postupně. Některé z nich plasty depolymerují, zatímco jiné odstraňují nečistoty a nechávají polymerní řetězce relativně neporušené. Je matoucí, že u mnoha technologií na bázi rozpouštědel se rovněž používají vysoké teploty, nepovažují se ale za termolýzu.

## Zplyňování (gasifikace) a pyrolýza

Zplyňování (gasifikace) a pyrolýza jsou na první pohled velmi jednoduchými postupy. Byly vynalezeny před více než sto lety jako technologie pro přeměnu dřevnaté biomasy a uhlí na plynné a kapalné chemikálie, přičemž jsou při nich současně produkovány pevné materiály bohaté na uhlík. Názvy těchto procesů jsou odvozeny od jejich využití v minulosti.

Obrázek 3:



Při pyrolýze (nahore) se plastový odpad zahřívá bez přístupu kyslíku. Vzniká při tom v první řadě kapalný produkt (pyrolýzní olej) a jako další produkt plyn, který se obvykle spaluje. Pyrolýzní olej lze spalovat nebo zvyšovat jeho kvalitu pro opětovnou polymeraci. Při zplyňování (uprostřed) se plastový odpad zahřívá za (typicky) omezeného přístupu kyslíku, čímž se vyrábí plyn, který se musí před použitím dále zpracovávat. Při spalování (dole) se plastový odpad spaluje, aniž by se musela používat další paliva, z výstupů procesu ale není možné znovu vyrobit plasty. Existuje mnoho různých variant těchto procesů.

Velmi obecně řečeno, technologie zplyňování a pyrolýzy se od spalování liší nízkým množstvím přítomného kyslíku (obrázek 3). Jak při pyrolýze, tak při zplyňování se využívá skutečnost, že ve všech situacích, kdy se uhlovodíkové polymery nejprve zahřejí (tedy pomocí externího zdroje tepla), uvolní se velká část materiálu ve formě plynu. Bez kyslíku tento plyn neshoří. Klíčové je zde nastavit podmínky tak, aby se zabránilo hoření. Přivádí se tedy teplo, ale omezuje se přístup kyslíku. Pyrolýza a zplyňování rovněž fungují při relativně nízkých teplotách (cca 500 °C až 850 °C) a jsou to jak samostatné reaktory, tak jednotlivé stupně v technologickém řetězci chemické recyklace (Wong et al., 2015).

Všechny plyny produkovány zplyňovacími zařízeními vznikají pyrolýzou, nicméně reaktor zkonstruovaný pro zplyňování („zplyňovací zařízení“) podporuje i průběh jiných

chemických reakcí. Zplyňování není dáno teplotou nebo množstvím kyslíku, který může vstupovat do reaktoru, ale je to jednoduše, jak název napovídá, „přeměna něčeho na plyn“.

Bližší podrobnosti, jak pyrolýza a zplyňování fungují, ale zdaleka nejsou jednoduché a zejména zplyňování je v moderních návrzích nakládání s odpadem často špatně pochopeno a zkreslováno. Podrobné vysvětlení zplyňování a pyrolýzy přesahuje rozsah této studie, informace je ale možné najít v několika vědeckých publikacích (Kaupp, 1984; Reed, Das, 1988; Rollinson, 2018; Rollinson, Oladejo, 2019).

Výsledným produktem zplyňování a pyrolýzy je směs nespálených a nově syntetizovaných molekul uhlovodíků, které jsou v plynném, kapalném i pevném skupenství. Kvalita produktu a provozní stabilita je řízena složitými a vysoce problematickými vzájemnými vztahy chemických, fyzikálních a tepelných faktorů. V důsledku toho je zplyňování a pyrolýza podobnější zařízením chemického průmyslu než běžným spalovnám (Rollinson, 2018; Rollinson, Oladejo, 2019).

### Zplyňování (gasifikace)

Zplyňování nebo také gasifikace, jak se tento proces někdy nazývá, bylo optimalizováno před více než sto lety a zjistilo se, že ho lze dosáhnout pouze ve velmi specifických typech reaktorů, v nichž se jako surovina používá pouze dřevitá biomasa, dřevěné uhlí nebo uhlí (Rollinson, 2018). V těchto specifických případech se zplyňováním může vyrábět plyn (historicky nazývaný „generátorový plyn“), který je relativně bohatý na oxid uhelnatý (CO) a vodík (H<sub>2</sub>). Parním reformováním metanu (což je způsob výroby vodíku, obvykle ze zemního plynu) se rovněž získává plyn podobného složení (známý jako „syntetický plyn“), který je surovinou pro výrobu plastů. To vedlo k myšlence, že zplyňování plastů by mohlo být jednou z metod chemické recyklace.

### Pyrolýza

Původní význam slova pyrolýza je „uvolnění nebo změna teplem nebo ohněm“. Obvykle se jím však označuje zahřívání bez přístupu kyslíku v dávkových reaktorech. Pyrolýza je známá od dob antiky a používala se pro výrobu užitečných chemikálií jako je metanol, aceton a kreosot ze dřeva. Jedná se o proces, při kterém se spotřebovává energie (endotermní proces), který je mnohem primitivnější než zplyňování. Vyrábí se jím plyn mnohem horší kvality, který je vysoce bohatý na složitou směs uhlovodíků, a kapalina tvořená složitou směsí látek s vyšší molekulovou hmotností (olej / dehet) (Rollinson, Oladejo, 2019).

### Převodění plastů na plasty (P2P) pomocí pyrolýzy a zplyňování

Konečným cílem pyrolýzy a zplyňování při chemické recyklaci plastů na plasty (P2P) by bylo využití oleje a plynu, které jsou jejich produkty, jako stavebních prvků pro nové plasty. Nicméně vzhledem k povaze zplyňování a pyrolýzy je extrémně obtížné nebo přímo nemožné vyrábět výsledný olej a plyn v kvalitě, která je nutná pro výrobu plastů. Během repolymerace, která případně následuje, probíhá další chemické zpracování a je spotřebovávána další energie.

## Převedení plastů na palivo (P2F) pomocí pyrolýzy a zplyňování

Rozdíl mezi P2P a P2F spočívá v konečném použití. V případě P2F se produkty pyrolýzy a zplyňování používají jako surovina pro rafinaci ropy. To znamená, že se nakonec spalují. Z toho důvodu nemůže P2F přispívat v případě plastového odpadu k oběhovému hospodářství – nevyrábí se nový plast.

Je důležité rozlišovat mezi spalováním produktů zplyňování a pyrolýzy ve spojitosti s jejich výrobou a jejich pozdějším používáním jako paliva, kdy jsou alternativou k ropě a jejím derivátům. V prvním uvedeném případě jsou produkty okamžitě spalovány ve stejném zařízení, přičemž teplo buď uniká, nebo se používá k výrobě elektřiny či k dodání části energie potřebné pro pyrolýzu. Z hlediska účelu jsou tato zařízení stejná jako tzv. „zařízení na energetické využití odpadů“ (ZEVO), ve kterých dochází ke spalování odpadů a výrobě určitého množství energie. Pokud je palivo získané z plastů určené pro pozdější použití, nespaluje se takto vytvořené palivo okamžitě, ale uskladní se a často se transportuje mimo výrobní areál. U těchto paliv je ale potřeba další zpracování, aby splňovala mnohem vyšší normy kvality, například pokud se používají ve spalovacích motorech (Kalargaris et al., 2017; Wong et al., 2015).

## Technologie solvolýzy / zkapalňování

V tomto případě se k „uvolnění nebo změně“ plastového odpadu místo depolymerace působením tepla používají různá rozpouštědla. Cílem je získat vyčištěné polymery, oligomery nebo monomery. Mnohé z těchto postupů zahrnují rovněž více stupňů zpracování, kdy se obvykle provádí zpracování vysokým tlakem a teplotou v řádu několika stovek barů a od 100 °C do 350 °C, s působením katalyzátorů (Al-Sabagh et al., 2016; Arturi et al., 2018; Sherwood, 2020). Neexistuje jednoznačná shoda, jak tyto alternativní technologie rozdělit, což je jasným dokladem toho, jak je celý jejich systém složitý. Jednotlivé postupy se vzájemně překrývají a v některých případech navíc platí omezení v souvislosti s uplatněním práv k duševnímu vlastnictví. My používáme rozdělení, které vypracovali Crippa et al. (2019).

### Čištění na bázi rozpouštědel

Cílem tohoto postupu je rozpustit nebo zkapalnit plast, aniž by se poškodila polymerní struktura. Často se volí pro třídění směsných plastů nebo izolaci určitých polymerů z některých typů kompozitních plastových materiálů. Je to vícestupňový postup zahrnující odstraňování barev, nečistot a kontaminujících látek s následnou filtrací, extrakcí kapalnou fází a srážením polymeru „antirozpouštědlem“ (Sherwood, 2020). Výběr rozpouštědla se musí přesně přizpůsobit přísně homogenní surovině nebo cílové sloučenině. Dochází k určitému snížení kvality produktu, což znamená, že postup není „cyklický“, a v tomto ohledu je více podobný mechanické recyklaci, jelikož produkt není možné recyklovat donekonečna nebo jím plně nahradit polymer nově vyrobený z fosilních paliv (Crippa et al., 2019). V produktu mohou rovněž zůstat zbytky toxických kontaminujících látek a kromě toho může být problematická i likvidace chemikálií použitých v rámci procesu (Sherwood, 2020). Zůstává nejasné, jestli je tento postup využitelný v praxi.

### Depolymerace na bázi rozpouštědel

Při řadě depolymeračních procesů se plastový odpad rozpouští v kapalnou lázni s cílem získat oligomery a monomery. Lázeň může být tvořena jednou nebo více z mnoha různých kapalin, podle kterých se postup jmenuje: mimo jiné vodou (neutrální, kyselá nebo alkalická hydrolýza), metanolem (metanolýza), glykolem (glykolýza), amoniakem (amonolýza) a různými aminy (aminolýza). Proces se často usnadňuje vysokou teplotou, tlakem a/nebo působením katalyzátorů a využívají se jeho modifikace, jako hydrogenace a transesterifikace. Ze všech možností chemické recyklace je tento postup nejnovější a informací jak o kvalitě produktů, tak o spotřebě energie je u této kategorie technologií nejméně a jsou rozporuplné.

## 2. 3. Srovnání se zavedenými technologiemi nakládání s odpady

Kromě skládkování a technologií popsaných výše se k nakládání s plastovým odpadem používá hlavně mechanická recyklace a spalování. V této kapitole chemickou recyklaci stručně porovnáme s těmito procesy.

### Srovnání mechanické a chemické recyklace

Mechanická recyklace plastového odpadu sestává z řady fází, včetně předtřídění, rozměňování, mytí, drcení a extrudování nebo peletizace suroviny. Poté se může provádět tavení a fyzikální tváření, často za použití přísad. Tyto fáze, i když jsou méně energeticky náročné než chemická recyklace, spotřebovávají vzhledem k hodnotě plastového recyklátu významné množství energie (Levidow, Raman, 2019). I když má mechanická recyklace za cíl nahradit plasty nově vyráběné z fosilních paliv v podobných oblastech použití, je u některých druhů plastového odpadu, zejména obalů, v důsledku proměnlivé kvality a přenosu kontaminantů recyklace v uzavřené smyčce extrémně obtížná. I při využití výše zmíněných způsobů intenzivního předzpracování zůstávají v materiálu nečistoty pocházející jak ze samotné struktury plastů, tak z vnějších zdrojů. Z toho důvodu nyní zpracovatelé hledají nové postupy mytí, kterými by bylo možné odstranit kontaminující látky, pachy, nálepky a sloučeniny rozpustné ve vodě.

Zatímco u depolymeračních technologií je cílem rozštěpit plastové polymery na menší molekuly (monomery a oligomery), mechanická recyklace chce polymery zachovat. V praxi se délka polymerů obecně zkracuje a v důsledku toho má získaný plast nižší kvalitu než plast původní (Baytekin et al., 2013). Tento jev se označuje jako „downcycling“ nebo „recyklace v otevřené smyčce“, jelikož představuje určité omezení toho, do jaké míry může mechanicky recyklovaný polymer nahradit polymer vyrobený nově z fosilních paliv. Recyklovaný plast místo toho obvykle nahrazuje alternativní polymery s horšími vlastnostmi. Právě z tohoto důvodu a kvůli ambiciózním recyklačním cílům v mnoha zemích se propaguje koncept chemické recyklace, která je však mnohem méně připravená pro využití v praxi (Quicker, 2019). Chemická recyklace ve srovnání s mechanickou recyklací trpí tím, že je to novější a složitější postup, nečistoty v surovině u ní však představují stejný problém.



I když má mechanická recyklace svá omezení, existují pádné argumenty, že je z hlediska životního prostředí výhodnější než chemická recyklace. Je tomu tak proto, že má nižší spotřebu energie a tudíž i menší uhlíkovou stopu a produkuje menší množství toxických vedlejších produktů.

## Spalování

Nejjednodušším způsobem depolymerace plastů je jejich spalování (Quicker, 2019). Na rozdíl od pyrolýzy, při které se omezuje množství kyslíku pro získání hořlavého plynu, je cílem spalování dosáhnout úplného shoření suroviny. Produktem je popel, oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a vodní pára ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Při spalování směsného odpadu může být popel vysoce toxický a i přes více než stoletý vývoj má tento postup stále nevyřešené problémy (jako je koroze působením kyselých plynů). Nehledě na tyto problémy je spalování destruktivní postup a výsledné molekuly nelze z energetického hlediska využít ani jako palivo ani jako stavební prvky pro výrobu polymerů. Nejedná se tudíž o chemickou recyklaci, takže se jím v tomto hodnocení nebudeme dále zabývat.

## 2. 4. Shrnutí

Všechny technické postupy chemické recyklace popisované v této studii se týkají pouze prvního stupně (tedy depolymerace) dvoustupňového postupu destrukce / tvorby nové struktury. Nejedná se o svévolné rozhodnutí, jelikož problém úspěšného využití chemické recyklace spočívá v dosažení a udržování takové kvality a kvantity plastového recyklátu, které jsou dostatečné k tomu, aby jej bylo možné prakticky využít jako suroviny pro repolymeraci nebo jako paliva pro motory. To není snadné. Kvůli požadavkům kladeným na výsledný produkt je nutná vysoce přísná kontrola kvality, a pokud tyto požadavky nejsou splněny, výsledný plyn nebo olej se v nejlepším případě spaluje. V důsledku toho není rozdíl mezi postupy P2P a P2F často jasný a snahy nazývat tyto dva procesy souhrnně chemickou „recyklací“ byly často považovány za „natírání na zeleno“ („greenwashing“) (GAIA, 2019).

## 3. Problémy

**Nízká praktická využitelnost a nedostatek dat**

**Nepříznivé vlivy na životní prostředí**

**Spotřeba energie a produkce oxidu uhličitého**

Termolýza plastů byla experimentálně zkoumána nejméně od 50. let 20. století a výsledky experimentů prováděných v laboratorních podmínkách lze nalézt ve standardních textech (Fifield, Haines, 2000). První snahy o chemickou recyklaci plastů v komerčním měřítku se datují přinejmenším do 70. let 20. století (Matsumoto et al., 1975; Porteous, 1975). Zdá se, že pokud jde o plné využití v praxi, technologie chemické recyklace od té doby stagnují, navzdory některým opačným tvrzením objevujícím se v současnosti v médiích.

Pro vyřešení technických problémů termolýzy byly navrhovány různé úpravy, jako je použití vodíkové atmosféry a/nebo katalyzátorů. U těchto modifikací však vznikají další náklady a problémy, jako je: 1. obtížná zpětná izolace vyčerpaného katalyzátoru; 2. náklady na katalyzátor a/nebo vodík; 3. likvidace nebo regenerace vyčerpaného katalyzátoru (regenerace je náročná na energii a vytváří se při ní další odpadní vedlejší produkty); 4. účinnost katalyzátoru se snižuje hned po zahájení procesu, jelikož se zanáší částicemi plastu a místa na povrchu jsou blokována ukládáním uhlíku (Miskolczi et al., 2004; Loper et al., 2017).

Experimenty rovněž prokázaly, že chemická recyklace není jednoduše reverzibilní proces. Když se dosáhne tepelného rozkladu plastů, v důsledku fragmentace vznikají molekuly odlišné od monomerů, ze kterých se plasty skládaly (tedy od jejich „stavebních kamenů“). Například z relativně jednoduchého PP se tvoří velké množství benzenu, xylenu, toluenu a polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) (Williams, Williams, 1999). Podobné je to v případě PVC. Jak se z něj postupně odstraňuje chlor, vytváří se nové vazby mezi atomy uhlíku a vznikají aromatické látky, jako je inden, naftalen a alkylované naftaleny (Scheirs, Karminsky, 2006). Tyto látky jsou v kombinaci s mnoha přísadami, které se do plastů přidávají (viz kapitola 3. 2.), nebezpečné pro lidské zdraví. To znamená, že příslušné provozy by musely být regulovány a řízeny tak, aby se zabránilo potenciálně vysoce rizikovým situacím, a to jak v areálu provozu, tak mimo něj. Je pravděpodobné, že z takového množství plastů, které by se vyplatilo zpracovávat v jednom zařízení, by tyto chemikálie vznikaly během zpracování a skladování ve významných množstvích.

### 3. 1. Nízká praktická využitelnost a nedostatek dat

Při přípravě této studie jsme prostudovali mnoho vědeckých článků posuzujících koncept chemické recyklace. Všechny kladly důraz na jeho „inovativnost“ a věnovaly jen malou pozornost kritické analýze jejího fungování v provozu nebo se jím vůbec nezabývaly (viz například: Butler et al., 2011; Panda et al., 2010; Rageart et al., 2017). Zprávy o úspěšném provozu (a nezdarech), kromě laboratorních zkoušek, většinou nejsou zveřejňovány a ten, kdo se o věc zajímá, najde hodně teoretických prací, ale jen málo informací z praxe, pokud

vůbec nějaké získá. Logicky z toho lze vyvodit závěr, že tato myšlenka přináší jenom nebo hlavně problémy a ne pozitiva. V případě pyrolýzy a zplyňování existují přesvědčivé důkazy, které tuto domněnku podporují, jelikož tyto technologie mají extrémní problémy, když se jimi mají zpracovávat směsné nebo nestandardní suroviny a když se firmy snaží uplatnit je ve větším měřítku (viz literatura, kterou uvádějí Rollinson, 2018 a Rollinson, Oladejo, 2019). Velmi stručně shrnuli situaci Wong et al. (2015):

**„I když je v laboratorním měřítku možné docílit uspokojivého výtěžku a složení produktu, bude pro techniky průmyslových podniků velkou výzvou dosáhnout požadovaného výsledku i při provádění pyrolýzy polymerů ve větším měřítku.“**

Problém, který představuje zpracování plastů těmito technologiemi, pokud jde o postupy P2F, popisují Lopez et al. (2017):

**„I když se může zdát, že běžná pyrolýza je vhodným způsobem přeměny pevného plastového odpadu na palivo, při středně vysokých teplotách je možné získat pouze palivo s nízkým oktanovým číslem a vysokým obsahem zbytků. Z toho důvodu není výroba paliv typu benzínu efektivní (...).“**

Pokud jde o P2F, jsou někdy zveřejňovány výsledky dalších experimentálních zkoušek, viz například Kalargaris et al. (2017). Ti vyráběli olej pyrolýzou plastů a i přes velmi vysokou teplotu zpracování (900 °C) olej stále vykazoval vyšší hustotu a obsahoval vyšší koncentraci pevných zbytků, kyslíku a PAU než motorová nafta. Autoři uvádějí, že předtím, než je možné použít olej získaný pyrolýzou plastů jako palivo pro dopravní prostředky, je nutné podstatně zlepšit jeho kvalitu. Důkazem toho je skutečnost, že když se tento olej spaloval ve stabilním motoru, vznikalo větší množství znečišťujících látek. Ve srovnání s motorovou naftou byly vyšší emise oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), sazí, CO a  $\text{CO}_2$ .

Nenašli jsme žádné důkazy, které by dokládaly současná tvrzení o technologické účinnosti chemické recyklace. Nezávislé články posuzující chemickou recyklaci ve skutečnosti docházejí k opačnému závěru. Zmiňujeme je v chronologickém pořadí: V roce 2011 bylo zjištěno, že v provozu není ani jedna úspěšná a široce rozšířená technologie pyrolýzy plastů (Butler et al., 2011). Stav v roce 2016 popisují Miandad et al., 2016:

**„Teplota potřebná pro získání produktů vysoké kvality se může zvyšovat na 700 nebo 900 °C“ [ale] „plynné produkty pyrolýzy rovněž nejsou vhodné jako zdroj paliva a před použitím je nutná jejich rafinace.“**

Autoři nerozebírají, proč tomu tak je, pravděpodobně ale jde o nízkou kvalitu uhlovodíků v produktu, i přes velmi vysoké reakční teploty. Autoři uvádějí, že kvalitu oleje zhoršuje rovněž přítomnost znečišťujících látek, a popisují, jak je pyrolýza v důsledku své endotermní povahy vysoce náročná na energii.

O rok později docházejí Lopez et al. (2017) k závěru:

**„Ačkoli se pyrolýza plastů rozsáhle zkoumala, většina studií je předběžné povahy a úroveň vývoje pyrolýzních jednotek je obecně nízká.“**

Nejnovější zhodnocení uvádí Quicker (2019):

**„Jelikož v současné době neexistuje žádné známé pyrolýzní zařízení v (polo)průmyslovém provozu, které by produkovalo relevantní množství [chemicky recyklovatelného plastu] pro další zvýšení kvality, například v chemickém průmyslu, není zde možné uvést žádné příklady tohoto postupu.“**

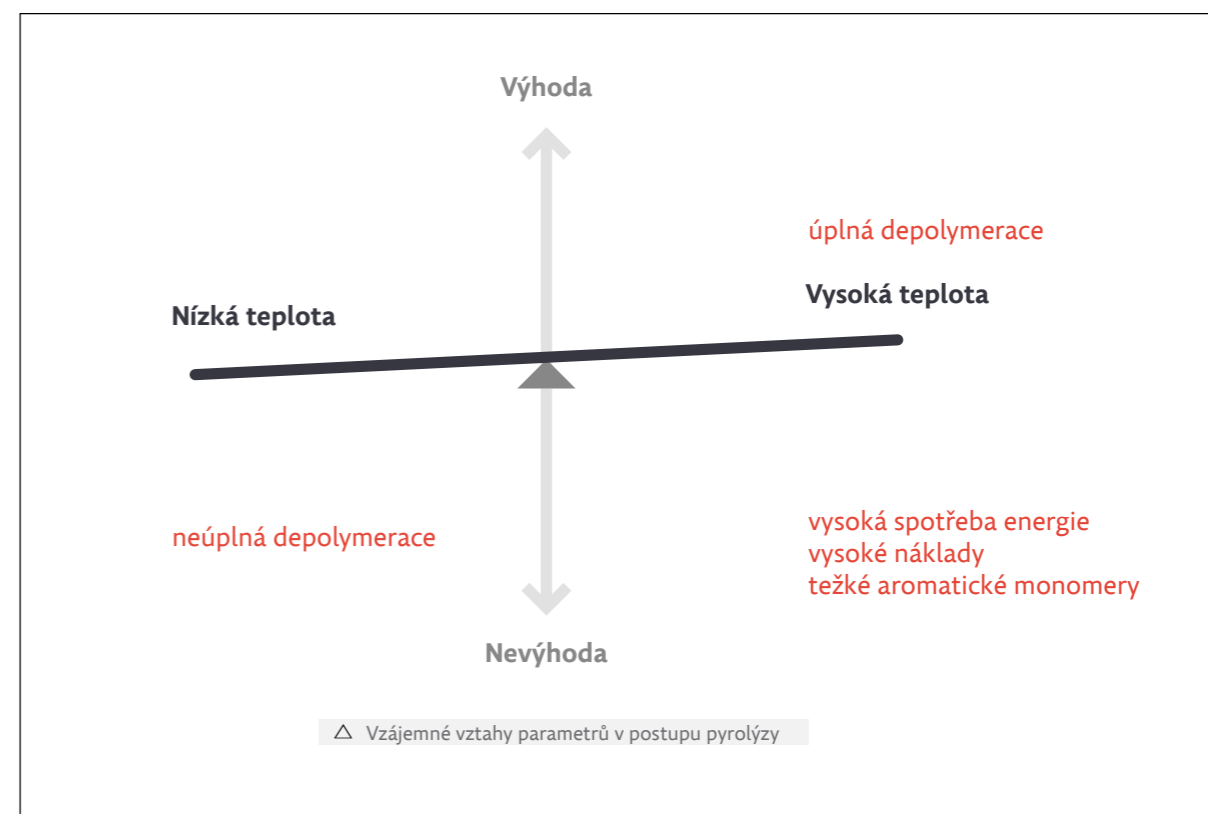
Pokud jde o budoucí potenciál zplyňování plastů, Quicker (2019) uvádí:

**„I v případě nezbytného a promyšleného předzpracování není ve skutečnosti možné očekávat ekonomický provoz takového zplyňovacího zařízení, kterým se z plastů vyrábí palivo.“**

Tento problém je přitom zcela zásadní. Pro optimální reakční kinetiku je nutné udržovat určitou teplotu a cirkulaci plynu, přičemž teplota zároveň nesmí být příliš vysoká, aby se zabránilo sekundární a terciární syntéze nežádoucích molekul. Pokud se proces provádí při nízké teplotě (a s nízkými náklady), budou se tvořit určité lehčí monomery, depolymerace ale nebude úplná. Pokud se proces provádí při vyšší teplotě (a s vyššími náklady) pro zvýšení primární depolymerace, bude se vytvářet větší množství těžších aromatických molekul (obrázek 4). Byla zkonstruována zplyňovací zařízení, která zvládnou tyto rozporné požadavky vyřešit, ale pouze při použití přísně vymezených typů homogenní suroviny a ne něčeho tak „nestandardního“, jako je plastový odpad (Rollinson, 2018). Pro vyřešení problému se používá řada stupňů předzpracování a následného zpracování, které s sebou nesou vysoké náklady a spotřebu energie, a i přesto bylo zaznamenáno mnoho neúspěšných pokusů zpracovávat ve větším měřítku směsný odpad nebo jiná nestandardní surovina (Quicker, 2019):

**„I přes negativní zkušenosti s alternativními technologiemi tepelného zpracování v minulosti, jsou tyto procesy znovu vychvalovány jako řešení, tentokrát pro recyklaci plastů.“**

Obrázek 4:



*Nízké teploty (a nízké náklady) nerozloží plně plastový odpad, zatímco při vysokých teplotách vznikají nežádoucí chemické látky.*

Pokud jde o novější metody chemické recyklace, existují rovněž přesvědčivé důkazy, že je tento koncept problematický a nevhodný. V důsledku vysokých provozních nákladů nejsou známy žádné záměry využití hydrogenace v průmyslovém měřítku, solvolýza je ještě ve stádiu vývoje a katalytická depolymerace v olejové lázni se zkoušela v poloprovozním měřítku pouze s vysokou spotřebou energie a s neuspokojivými výsledky (Quicker, 2019). Ačkoli existují zařízení, která jsou po určitou dobu v plném provozu (jako je Viny-loop®), chemická recyklace metodou solvolýzy zůstává v současné době technologií používanou pouze v laboratorním prostředí nebo poloprovozním měřítku (Sherwood, 2020). Současnou situaci popsala nedávno zpráva Evropské komise (Crippa et al., 2019):

**„Jelikož jeden z mála komerčních provozů (čištění PVC na bázi rozpouštědel) byl nedávno uzavřen a většina výše popsaných iniciativ se provádí v laboratorním měřítku nebo na poloprovozní úrovni, je zřejmé, že pro zlepšení těchto technologií je potřeba vynaložit další zdroje a čas.“**

I někteří zástupci průmyslového sektoru odhadují, že je „optimistické myslet si, že chemická recyklace odpadních plastů bude prakticky využitelná v příštím desetiletí“ (Doherty, 2019). Jiní se domnívají, že růstu bude možné dosáhnout až za 17 let (Closed Loop Partners, 2019). Na řešení rychle se zvětšující krize s plastovým odpadem to může být příliš pozdě.

## 3. 2. Nepříznivé vlivy na životní prostředí

### Toxické látky přítomné v plastech

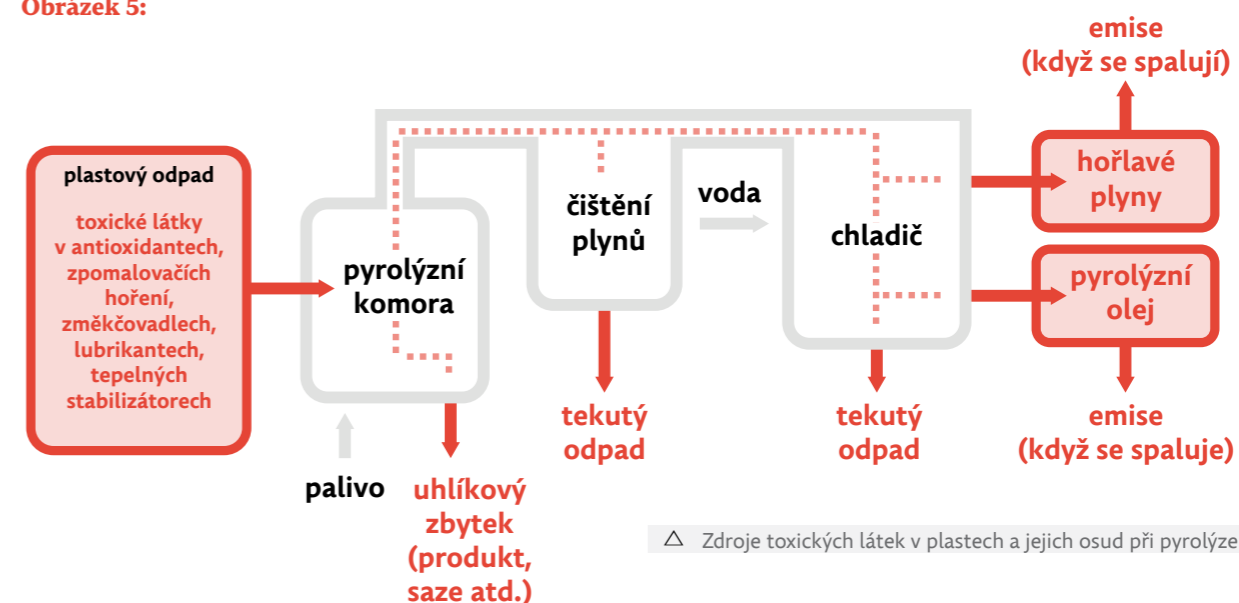
Petrochemické plasty se skládají v první řadě z vodíku a uhlíku a dále obsahují významná množství kyslíku a jiných chemických prvků (známých jako heteroatomy). Přidávají se do nich různé látky, které upravují vlastnosti materiálu a výrobní náklady, jako jsou antioxidanty, zpomalovače hoření, změkčovadla, lubrikanty a stabilizátory proti účinkům tepla. Do plastů se mohou rovněž dostávat toxické kontaminující látky z jejich okolí, jak během výrobního procesu, tak později (Rodrigues et al., 2019). Tyto látky s sebou nesou riziko toxicity spojené se zpracováním po konci životnosti plastů a s jejich nežádoucí migrací. Mezi příklady toxických látek v plastech patří: bisfenol-A (BPA), kadmium, benzen, bromované sloučeniny, ftaláty, olovo, cín, antimon a těkavé organické látky (VOC).

Antioxidanty, používané hlavně v plastových obalech, zpomalují rozklad polymerů, ke kterému může docházet, když na ně působí světlo nebo jiné zdroje tepla. Patří mezi ně: arylaminy, fenolové látky a organofosfáty, jako je BPA, tris-nonylfenylfosfát, oktylfenol, nonylfenol a sloučeniny olova a kadmia. Jsou přítomné v koncentracích 0,05 – 3 % hmotnosti (Hahladakis et al., 2018).

Mezi zpomalovače hoření patří: halogenované uhlovodíky, estery kyseliny fosforečné, oxidy antimonu a hliníku, halogenované fenoly, bromované a fosforované polyoly, sloučeniny typu polybromovaných difenyléterů (PBDE), chlorované parafíny (MCCPs nebo SCCPs), kyselina boritá a sloučeniny fosforu (TCEP nebo TCPP). Jsou přítomné v koncentracích 0,7 - 25 % hmotnosti (Hahladakis et al., 2018).

Změkčovadla, která zlepšují trvanlivost a pružnost plastů, jsou přítomná v koncentracích 10 až 70 % hmotnosti a patří mezi ně ftaláty na uhlovodíkové bázi (DBP / BBP / DEHP / DHCP), adipáty (DAH / HAD / DOA / HOA) a chlorované parafíny (LCCP / MCCP

Obrázek 5:



Mezi toxické látky patří: ftaláty, BPA, polybromované difenylétery, další toxické bromované sloučeniny, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), dusíkaté PAU (N-PAU), oxoderiváty PAU (O-PAH) a N/S/O-heterocyklické PAU, As, Sb, Br, Zn, Cu, Hg, Cd, dioxiny, HCN.

V plastovém odpadu je přítomno mnoho toxických látek a některé, jako dioxiny, se vytvářejí během samotného postupu. Všechny jsou pak přítomné v jednom nebo i více výstupech: pyrolýzním oleji, generátorovém plynu, emisích do ovzduší, tekutém odpadu a uhlíkovém zbytku.

/ SCCP) (Hahladakis et al., 2018). Řada studií potvrdila, že při běžné teplotě prostředí dochází k migraci těchto látek z plastů, které je obsahují, přičemž při vyšších teplotách se migrace zvyšuje. Z toho vyplývá, že použití recyklačních postupů, zejména technologií využívajících vyšší teploty, zvyšuje riziko expozice. Plasty, jako je polystyren a polyestery, nylony a polyuretany, se mohou při teplotě prostředí až při mírně zvýšených teplotách (asi 200 °C) také rozkládat na monomery a oligomery. Tyto látky, jako je styren, formaldehyd, etylen, epoxidové pryskyřice na bázi BPA a vinylchlorid, jsou rovněž toxické.

### Emise a vedlejší produkty vznikající během procesu

Z hlediska správné technické praxe a kvůli požadavkům stanoveným právními předpisy je nutné komplexně posoudit jak přímá provozní rizika, tak množství a toxicitu všech produktů, vedlejších produktů a zbytků procesu. Dalo by se tedy očekávat, že studie chemické recyklace se těmito riziky budou zcela samozřejmě zabývat. Je to překvapivé, ale není tomu tak i přesto, že přítomnost zakázaných látek v procesu chemické recyklace byla označena za hlavní příčinu problémů s komerčním provozem a důležitou oblast, kterou bude v souvislosti s chemickou recyklací potřeba v budoucnu řešit (Sherwood, 2020). Když jsme však při přípravě této studie dělali literární rešerši, nenašli jsme v ní ani jediný podrobný přehled vlivů chemické recyklace plastů na životní prostředí. To podporuje prohlášení uvedené v jedné ze studií, že „takové informace dosud neexistují“ (Crippa et al., 2019).

Pokud jde o koncept chemické recyklace obecně, byla publikována řada souhrnných článků, všechny ale opomíjejí otázku vlivů na životní prostředí (například: Butler et al., 2011; Lopez et al., 2017; Panda et al., 2010; Wong et al., 2015). Našli jsme jenom jeden souhrnný článek, který zmiňoval vlivy na životní prostředí, ale informace, které v něm byly uvedeny, byly staré a/nebo nesouvisely s daným tématem (Ragaert, 2019). To bezpochyby odráží skutečnost, že autoři článků neměli k dispozici příslušné informace. Nevysvětluje to však, proč se ve studiích, které popisují experimenty jak v laboratorním, tak v poloprovozním měřítku, obecně nevěnuje pozornost informacím o emisích a toxicitě vedlejších produktů. Jedním z důvodů by mohla být skutečnost, že výzkum je financován vědeckými institucemi a průmyslovými podniky a kvůli tomu se autoři zaměřují pouze na pozitivní fakta, aby svou práci lépe „prodali“ (Rollinson, Oladejo, 2019). Ať už je důvodem cokoliv, rizika a toxicita chemické recyklace jsou v současné době nedostatečně popsána a nejsou adekvátně zhodnocena. Níže uvádíme první pokus o takové zhodnocení.

Jelikož pyrolýza je stará technologie, byla publikována řada jejích hodnocení (i když ne konkrétně při použití plastů jako suroviny) a je dobře známo, že se při ní tvoří toxické organické produkty (Idowu et al., 2019). I v případě zplyňování existuje rozsáhlá literatura, která rozebírá jeho nebezpečí, vlivy na životní prostředí a rizika (Rollinson, 2018). U těchto technologií je dobře zdokumentováno, že se tvoří kouř, CO a jiné nebezpečné látky. Konkrétně při použití plastů jako suroviny se tvoří anebo unikají ftaláty, BPA, polybromované difenylétery, toxické bromované sloučeniny a PAU. Mnohé z těchto látek jsou mutagenní, karcinogenní a narušují dýchací a nervovou soustavu (Verma et al., 2016).

Kromě toho, že jsou v plastech přítomné toxické látky, vytváří se toxické plyny, jako je kyanovodík (HCN) a CO, a během termolýzy za omezeného přístupu kyslíku dochází rovněž k syntéze nových toxických molekul s delším řetězcem. Proto jsou výsledné produkty ve srovnání se surovinou více toxické. Cesty syntézy těchto látek jsou dobře známé a v uplynulých 100 letech byly důkladně zkoumány (viz Kiel et al., 2004; Vreugdenhil, Zwart, 2009). Vznikají látky, které se souhrnně nazývají terciární nebo vysokoteplotní dehty, a patří mezi ně dusíkaté PAU (N-PAU), oxoderiváty PAU (O-PAU) a N/S/O-heterocyklické PAU. Mnohé z těchto látek jsou silnými mutageny a karcinogeny (Idowu et al., 2019). Pokud jde o plasty, Font et al. (2003) zjistili, že emisní faktory mutagenních PAU vznikajících při pyrolýze polyetyleny se výrazně zvyšovaly při teplotách nad 700 °C. To souvisí se vzájemnými vztahy mezi teplotou, depolymerací a množstvím nově syntetizovaných nežádoucích látek, jak je rozebíráme v předchozí kapitole. Produkci těchto syntetizovaných toxických látek potvrzují i další studie zabývající se pyrolýzou plastů (Garrido et al., 2016; Lopez et al., 2017; Seo, Shin, 2002; Wong et al., 2015).

Je rovněž známo, jak se do recyklátu dostávají toxické látky při solvolýze. Mnohá rozpouštědla jsou sama o sobě vysoce toxická, hořlavá nebo škodlivá pro životní prostředí, jako n-hexan, cyklohexan a chloroform, a tyto látky se zachytávají v recyklátu (Sherwood, 2020). Do rozpouštědla běžně přecházejí také toxické látky z polymerů (jako ftaláty), což způsobuje další náklady kvůli povolením, která jsou u těchto zakázaných látek vyžadována (Sherwood, 2020).

## Toxicita výsledného plynu, oleje a uhlíkového zbytku

Vzhledem k systémové kontaminaci výstupů a trvalé snaze průmyslových podniků i přesto je prodávat jako komerční zboží může být často obtížné jasně rozlišit, co jsou výsledné a co vedlejší produkty. Toxické látky mohou být přítomné ve výstupech z technologií ve všech třech skupenstvích: v produktech plynných, kapalných i pevných.

Těžké kovy přítomné v plastech se během depolymerace neničí, ale musí přejít do jednoho z výstupů nebo zůstat v materiálech použitých při čištění (obrázek 5). To má vliv na potenciální možnosti použití všech produktů z technologií chemické recyklace, například při následném spalování při vysokých teplotách se těžké kovy budou uvolňovat jako částice nebo páry do ovzduší nebo se budou koncentrovat v pevných zbytcích. I když v případě organických toxických látek je možné, že dojde k jejich depolymeraci a tedy zničení, mohou procesem rovněž procházet beze změny. Co je ještě horší, je vysoká pravděpodobnost, že se během procesu přemění na ještě toxičtější molekuly. Hodnocení cest toxických látek v životním prostředí (a s tím souvisejících nákladů) musí zahrnovat i použité materiály z praček plynů a lapačů ze zařízení pro čištění plynů a odpadních vod. Níže uvádíme několik příkladů:

Studie, která se zabývala pyrolýzou směsných plastů, zjistila, že výsledný olej obsahoval antimon, brom, zinek, vápník, chlor a síru a plyn obsahoval chlor a brom, přičemž největší podíl netěkavých látek byl v uhlíkovém zbytku (Miskolczi et al., 2013). Stejná skupina výzkumníků zjistila, že produkty obsahovaly značná množství nově syntetizovaných „těžkých“ aromatických polymerů, které pocházely i z látek, jako je polystyren, o němž se často tvrdí, že z něj při podmínkách pyrolýzy vznikají monomery (Miskolczi et al., 2004).

Seo a Shin (2002) analyzovali produkty pyrolýzy směsných plastů a zjistili, že destilovaný výsledný olej obsahoval významně vyšší množství aromatických látek než motorové palivo. Tyto látky tvořily 60 – 82 % z celkového množství uhlovodíků. Dále zjistili, že pyrolýzní olej obsahoval jen málo rozvětvených uhlovodíků, které jsou žádoucí při použití ve spalovacích motorech. Autoři popsali, jak vysoký podíl aromatických látek tvořily polynukleární PAU, které jsou buď přímo toxické, nebo jsou prekurzory ještě toxičtějších látek.

Cao et al. (2019) zkoumali tvorbu PAU a distribuci chloru v oleji, plynu a uhlíkovém zbytku jako produktech pyrolýzy PVC a zjistili, že obsah PAU v pyrolýzním oleji byl „překvapivě vysoký“ a činil 95,3 % a v oleji i uhlíkovém zbytku zůstal chlor v mnohem vyšších koncentracích než se předpokládalo.

Evangelopoulos et al. (2015) zkoumali pyrolýzu plastů z desek s plošnými spoji a zjistili, že při nízké teplotě ( $\leq 700$  °C) se přednostně tvoří bromované sloučeniny a BPA, zatímco vyšší teplota ( $\geq 700$  °C) upřednostňuje PAU a benzofurany. Podobné trendy pozorovali Iñiguez et al. (2018), kteří zjistili, že při pyrolýze plastového odpadu vznikalo větší množství PAU, chlorbenzenů a chlorfenolů než při jeho spalování.

Přítomnost anorganických a organických sloučenin bromu v produktech chemické recyklace zkoumali Ma et al. (2019). Zjistili, že při jednostupňové pyrolýze při teplotách 350 - 600 °C se 25 až 61 % bromu dostávalo do pyrolýzního oleje a 34 až 55 % do pyrolýzního vosku. V pevných zbytcích zůstávalo maximálně 15,9 % bromu. Uvádějí, že přítomnost bromu v produktech pyrolýzy má „významné negativní vlivy na jejich další využití jako paliva nebo chemikálií“.

Výzkumy se dlouhodobě zabývají vývojem technologií, které by snižovaly vytváření nebo emise polyhalogenovaných aromatických uhlovodíků, včetně dioxinů a furanů. Běžnou mylnou představou je, že podmínky pyrolýzy vylučují tvorbu dioxinů nebo ji inhibují. Tomu, co je základem vysoké produkce dioxinů během termolýzy plastů za omezeného přístupu kyslíku, je možné lépe porozumět na základě experimentů se zbytky z drčení starých automobilů (ASR). Maric et al. (2020) ve své studii jasně prokázali, že vyšší obsah plastů v surovině vedl k vyšší produkci dioxinů, stejně jako nižší teploty v reaktoru (673 °C ve srovnání s 831 °C) a v důsledku toho k vyšší toxicitě (TEQ) produktů. To je v souladu se staršími studiemi, které prokázaly, že nižší množství kyslíku je příznivé pro produkci jak PCDD/F, tak PBDD/F a že k jejich přítomnosti v různých frakcích produktu přispívají rovněž relativně nízké teploty, které jsou pro pyrolýzu potřeba. Konkrétně Rey et al. (2016) zkoumali termolýzu ASR při různých teplotách a množstvích kyslíku a zjistili, že maximální TEQ v případě PBDD/F je při množství kyslíku v rozmezí, při jakém se provádí pyrolýza, a při teplotě 600 °C (nikoli 800 °C). Maximální TEQ zjištěný u PCDD/F měl podobný charakter, se širším rozmezím podmínek, a k maximálním emisím PAU docházelo, když nebyl vůbec přítomen kyslík. Anzano et al. (2017) se zabývali pyrolýzou ASR a kvůli vysokému TEQ dioxinů a PAU uvádějí, že „na základě těchto výsledků je možné vyloučit použití pevného zbytku jako paliva“.

Chen et al. (2014) vypracovali souhrnnou práci, která hodnotila, jak se během pyrolýzy plastů tvoří dioxiny. Dochází k přenosu jejich stopových množství ze suroviny do výstupů, k jejich tvorbě z chlorovaných prekurzorů v plynné fázi při vysoké teplotě a k jejich nové syntéze z pevných částic, anorganického chloru a katalytických kovů na výstupu z reaktoru (Mohr et al., 1997). Na základě údajů z nyní již nefunkčního zařízení v Burgau a z pokusů v laboratorním měřítku při použití syntetického plastového odpadu jako suroviny Mohr et al. (1997) rovněž zjistili, že 80 % výsledných PCDD/F bylo přítomných v pyrolýzním oleji a jeho toxicita tak byla čtyřikrát vyšší než toxicita suroviny. Vyvodili z toho závěr, že „pyrolýzní olej by se tudíž neměl používat jako zdroj energie“. Také Weber a Sakurai (2001) zjistili, že při všech pokusech s pyrolýzou rozdrčeného plastového odpadu se vytvářely PCDD/F. Tyto studie zjistily, že v produktech pyrolýzy je značně vyšší množství PCDD/F ve srovnání se spalováním (což je v souladu s jinými citovanými studiemi) a jelikož více než 90 % celkového TEQ bylo přítomných v pyrolýzním oleji a plynu, doporučují, že by se neměl kondenzovat pro další použití.

Studie, která zkoumala pyrolýzu směsných plastů a různých směsí plastů, zjistila, že výsledný uhlíkový zbytek byl kontaminován těžkými kovy (kadmíem, olovem, zinkem, mědí, rtutí a arsenem) a byl nebezpečný a ekotoxický (Bernado et al., 2010). Při pokusech vyčistit produkt se používala extrakce rozpouštědlem, kovy ale zůstaly v uhlíkovém zbytku a eluát (výsledný kapalný odpad) vykazoval „značnou toxicitu“ v důsledku přítomnosti organických látek, které se do něj dostaly. Podle autorů jejich výsledky „poukazují na to, že je při hodnocení rizik pevných zbytků potřeba brát v úvahu ekotoxikologické chemické parametry, včetně anorganických a organických sloučenin“.

Odstranění těchto toxických látek z produktů chemické recyklace může být extrémně obtížné a nákladné a tvoří se jím další toky toxického odpadu. Na tuto otázku se zaměřilo u technologií chemické recyklace ve srovnání s jinými způsoby nakládání s použitými plasty jen málo prací. Mølgaard (1995) zjistil, že pyrolýza má ze všech posuzovaných možností nejvyšší dopady, pokud jde o globální oteplování a tvorbu fotochemického ozonu, a druhý největší dopad po skládkování, pokud jde o množství tuhého odpadu.

### 3. 3. Spotřeba energie a produkce oxidu uhličitého

Pro depolymeraci plastů jsou potřeba velké vstupy energie, takže u žádné z technologií chemické recyklace není možné dosáhnout celkové pozitivní energetické bilance, i pokud se kterýkoliv z jejích produktů spalují za účelem získání energie (Baytekin et al., 2013). Propagační tvrzení o udržitelnosti tedy není s tímto zásadním faktem v souladu. Důvodem pro tato rozporná tvrzení může být částečně to, že dodavatelé technologií často opomíjejí velké množství další energie, které je nutné pro předzpracování (třídění, čištění a drčení plastů) a následné zpracování a čištění produktů - tyto stupně nejsou téměř nikdy brány v úvahu při hodnocení energetické náročnosti a nákladů (Vehlow, 2016). To je ale jen část pravdy.

Dolní výhřevnost plastů je teoreticky relativně vysoká a na základě tohoto povrchního pohledu se některé skupiny výzkumníků domnívají, že systém, kterým se z plastů získává palivo, může být udržitelný (Joshi, Seay, 2019)<sup>2</sup>. Je bohužel zjevné, že někteří autoři podhodnocují vysoké energetické náklady pyrolýzy a ignorují druhý termodynamický zákon, čímž propagují myšlenku, která není fyzikálně možná<sup>3</sup> (viz diskuse, kterou uvádějí Rollinson, Oladejo, 2019). Je zajímavé, že některé studie rovněž kombinují složité metodiky s hodnotami z literatury a teoretickými extrapolacemi a přitom se vyhýbají jednoduššímu empirickému testu, který by věc potvrdil nebo vyvrátil, tedy tomu, aby věc skutečně prokázaly. Při širší literární rešerši nebyl nalezen ani jeden důkaz o existenci zařízení pro chemickou recyklaci, které by produkovalo dost energie pro vlastní potřebu.

Tyto chybné představy lze do určité míry přičíst nepochopení skutečných energetických nákladů pyrolýzy (Reed, Gaur, 1997). Často se dokonce ani nepřiznává, že pro pyrolýzu je nutný neustálý přívod tepla, i když je to zcela zásadní. V případě dávkových postupů se spotřeba tepla zvyšuje kvůli nutnosti udržovat teplotní stabilitu během plnění a vyprazdňování reaktoru, což má vliv na rozsah „krakování a vypařování“ během těchto období provozu. Projevuje se to na kvalitě depolymerovaných produktů, která je zřejmá z toho, zda je olej černý nebo čirý, a to zase ovlivňuje rozsah následného zpracování, které je nutné pro vytvoření využitelného recyklátu. Při něm jsou samozřejmě nutné další vstupy energie.

Co je ještě horší, lidé se často mylně domnívají, že zařízení pro pyrolýzu plastů by mohlo být energeticky soběstačné a současně produkovat surovinu pro nové plasty. To snadno vyvrátí jednoduchá logická úvaha: 1. Pokud by se všechny výstupy pyrolýzního zařízení spalovaly, aby se postup co nejvíce přiblížil energetické soběstačnosti, nijak by to nepřispívalo k oběhovému hospodářství, jelikož by se nenahrazoval plast nově vyrobený z fosilních paliv. 2. Pokud by se pyrolýzní olej a/nebo plyn měl používat pro výrobu plastů, v odpadních produktech by zůstávalo velmi málo energie pro zahřívání pyrolýzního reaktoru, takže by musel využívat externí zdroj energie, který by proces poháněl.

<sup>2</sup> Po osobní korespondenci s editorem potvrdil autor původního článku, že v rukopisu, jak byl zveřejněn, byly chyby. Opravený článek má být zveřejněn ve vydání časopisu z března / dubna 2020.

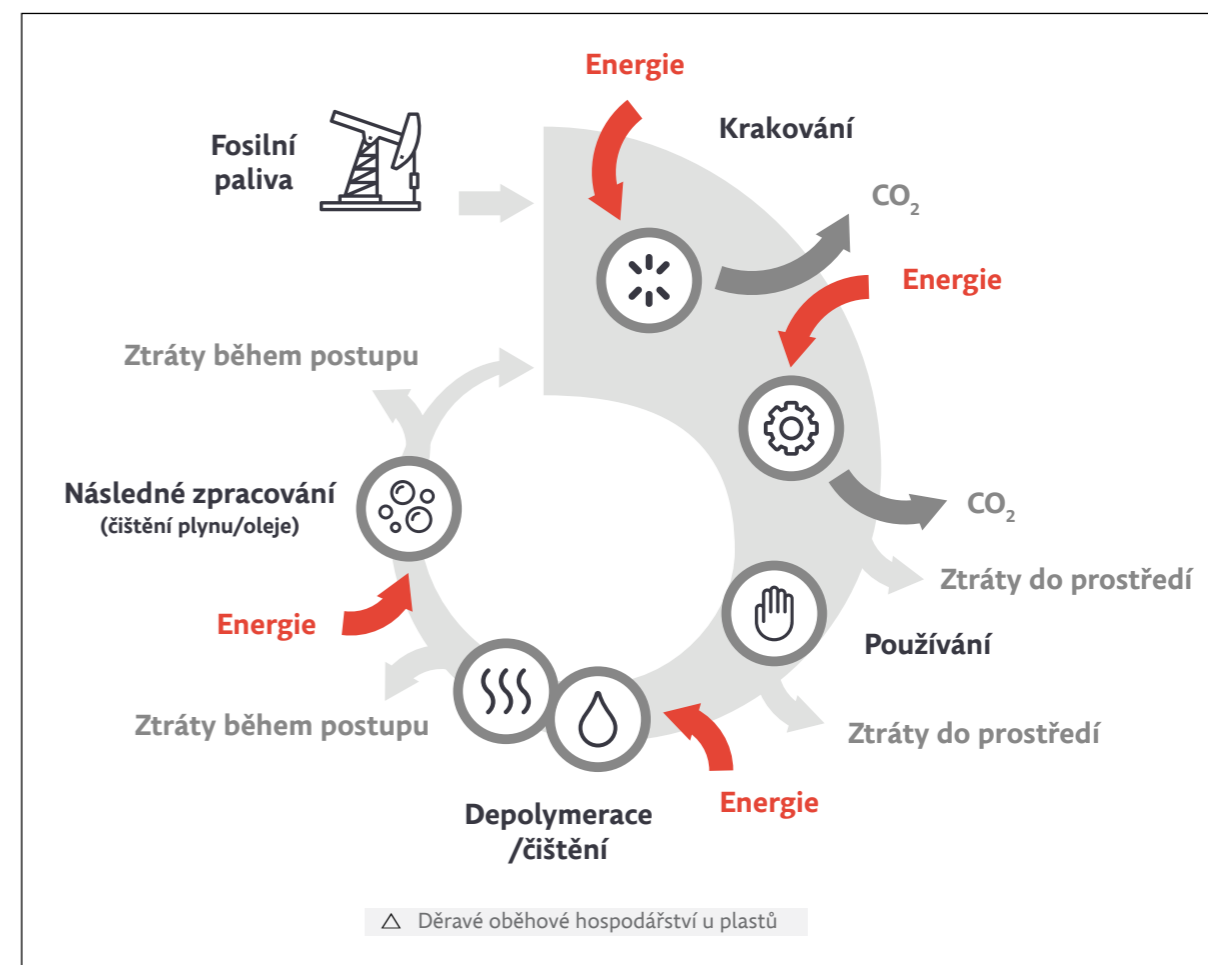
<sup>3</sup> Druhý termodynamický zákon platí pro všechny děje na světě. Je možné jej formulovat tak, že kdykoli dochází k přenosu energie, vždycky se jí určité množství ztrácí do okolí systému (měří se jako „entropie“).

Práce zahrnující energetickou bilanci termolýzních systémů chemické recyklace jsou vzácné a podobná hodnocení týkající se solvolýzy lze najít ještě hůře. Sherwood (2020) uvádí, že „spotřeba energie je příliš vysoká na to, aby chemická recyklace mohla konkurovat mechanické recyklaci (...) [a] náklady na zahájení provozu a údržbu jsou určitě vyšší“.

Pokud jde o spotřebu energie po depolymeraci, v nedávné době dvě studie popsaly, kolik dalšího zpracování je potřeba následně po postupu, který by se mohl považovat za „primární“ depolymeraci. Za použití komponent, které jsou v průmyslu standardem, by se při zlepšování kvality oleje ztratilo více než 53 % uhlíku přítomného v surovině a při zlepšování kvality plynu 48 % (Mamani-Soliz et al., 2020; Seidl et al., 2020). Tato nízká účinnost se přidává k energetickým vstupům do pyrolýzy (ty nejsou do výpočtů zahrnuty) a může tedy vyvrátit představu o udržitelnosti postupů P2F (obrázek 6). A to jsme ještě nevzali v úvahu, že když se produkty depolymerace spalují (jako v případě P2F), uvolňuje se stejné množství  $\text{CO}_2$ , jako kdyby se plast spaloval přímo. To znamená, že uhlík pocházející z fosilních paliv prostě jen strávil malou část své existence ve formě plastového výrobku.

Když se z recyklátu vyrábí nový plast v rámci postupu P2P, je spotřeba další energie nutné pro repolymeraci rovněž značná, v hodnoceních technologií ale opět pravidelně chybí. Baytekin et al. (2013) uvádějí, že pro získání energie nezbytné pro výrobu plastů je potřeba stejné množství fosilního paliva, jaké se ho použije pro výrobu primární suroviny. V nedávno zveřejněném článku se uvádí, že výroba plastové pryskyřice, jako prvního stádia procesu, je odpovědná za 61 % všech emisí skleníkových plynů. Dalších 30 % souvisí s výrobou výrobku a emise po skončení doby životnosti jsou nejnižší (Zheng, Suh, 2019).

Obrázek 6:



Chemická recyklace se propaguje jako způsob, jak „uzavřít smyčku“ a umožnit úplné opětovné využití plastového odpadu. Ve skutečnosti se však tento systém vyznačuje velkými vstupy energie, velkými ztrátami během postupu a vysokými emisemi skleníkových plynů. Do oběhu se jako nový plast vrací jen velmi malá část původního materiálu.

## 4. Perspektiva systémů

Sherwood (2020) nedávno vypracoval následující dlouhý (a vyčerpávající) seznam faktorů, které leží v cestě konceptu chemické recyklace: strategie a investice v oblasti sběru a třídění odpadu, design výrobků, rozhodování spotřebitelů, modely podnikání, odpor ze strany zavedených petrochemických trhů, potenciální zvýšení složitosti trhu s plastovým odpadem, vyšší náklady na recyklované polymery a z hlediska stavu technologie „[ne]schopnost rozdělovat kombinace materiálů (...). Je při tom potřeba udělat ještě hodně pro zlepšení míry zpětného využití u výrobků, které lze snadněji recyklovat.“ Je zajímavé, že autor považuje „odpor ze strany zavedených petrochemických trhů“ za faktor, který negativně ovlivňuje uplatnění chemické recyklace. Průmyslové podniky, včetně mnoha z petrochemického oboru, tuto technologii ve skutečnosti silně propagují. Vedlo to k určité kritice zdánlivě altruistických sdružení, jako je Alliance to End Plastic Waste, která slíbila, že během pěti let věnuje 1,5 miliardy USD na zmírňování problému s plastovým odpadem, mezi její členy ale patří významné ropné, plynárenské a petrochemické korporace (Laville, 2019). Tomuto skepticizmu nepomáhá skutečnost, že ropné a plynárenské podniky současně předpovídají, že petrochemikálie mají být v průběhu příštích dvaceti let nejrychleji rostoucím trhem (BP, 2018). Když tedy průmyslové podniky plánují výrazně zvýšit využití ropy pro výrobu plastů, otázka zní: Může finanční podpora výzkumu chemické recyklace odpovídat velikosti problému, který tytéž podniky vytvářejí?

Na základě předpovědí a odhadů praktické využitelnosti chemické recyklace, jak jsou uvedeny v této studii, není trvalé propagování chemické recyklace cestou k udržitelnosti, ale s vysokou pravděpodobností spíše k umožnění další těžby fosilních paliv po dobu alespoň deseti let. Je to velmi nebezpečný směr, protože podle existujících odhadů se musí v příštím desetiletí výrazně snížit spalování fosilních paliv, abychom se vyhnuli nebezpečí takové antropogenní změny klimatu, která ohrozí samotnou naši existenci (IPCC, 2018). Z tohoto časového hlediska je vysoce sporným optimismem i jenom uvažovat o konceptu chemické recyklace jako o dočasném provizorním opatření proti plastovému znečištění, než najdeme nějaký lepší způsob. Alternativní možnost už samozřejmě existuje, a to využívat postupy, které jsou výše v hierarchii nakládání s odpady: strategie snižování množství odpadu a opětovného využití věcí a materiálů. Státy mohou tyto strategie jednoduše stimulovat tím, že přijmou zákony, které povedou k regulaci plastů na jedno použití a zbytečných plastů.

## 5. Závěry

Tato studie dokládá, že chemická recyklace není odpovědí na problém s plastovým odpadem. I když takové řešení může vypadat jako ideální, zdá se, že správná technická praxe a zdravý rozum ustoupily slepému optimismu v honbě za neuskutečnitelným snem. V některých případech slyšíme smělá tvrzení o technologiích, o kterých se během uplynulých sto let opakovaně zjistilo, že jsou pro daný účel nevhodné. V jiných případech i průmyslové podniky připouštějí, že využitelnost novějších technologií v odpovídajícím měřítku je teprve potřeba prokázat a k jejich možnému využití je ještě dlouhá cesta. Kromě těchto nedostatků technologií samotných existuje navíc řada možných negativních vlivů na životní prostředí i lidi, které zatím nebyly dostatečně zhodnoceny. Často také slyšíme tvrzení o „udržitelnosti“, bez toho, abychom dostali dostatečné informace o vysoké spotřebě energie a i přesto, že technologie má negativní energetickou bilanci. Co ale chemická recyklace nabízí, je falešná představa, že společnost může přejít k udržitelnosti, aniž by využívala postupy, které jsou výše v hierarchii nakládání s odpady. Nebezpečně to odvádí pozornost od skutečnosti, že státy musí zakázat plasty na jedno použití a zbytečné plasty, a současně to směřuje společnost do budoucnosti, ve které se bude navyknutým způsobem spotřebovávat čím dál více ropy a zemního plynu.

### Závěrem naší studie jsou čtyři zjištění:

- \* Chemická recyklace (jak termolýza, tak chemická recyklace na bázi rozpouštědel) v současnosti není efektivním způsobem nakládání s plastovým odpadem a je nepravděpodobné, že by se jí stala během příštích deseti let. Vzhledem k nutnosti výrazně snížit globální spotřebu fosilních paliv se zdá, že chemická recyklace ve skutečnosti nebezpečně odvádí pozornost společnosti od toho, že je nezbytné přejít k udržitelné budoucnosti.
- \* Existuje řada cest, jak může chemická recyklace negativně ovlivňovat životní prostředí, a tyto cesty nebyly ani zdaleka dostatečně posouzeny. Zamezení těmto negativním vlivům bude pro provozovatele technologií představovat vysoké náklady a provozní omezení. Z toho důvodu by měli investoři, osoby, které přijímají rozhodnutí a které vytvářejí legislativu a normy, přistupovat k chemické recyklaci s extrémní opatrností.
- \* Chemická recyklace je náročná na energii a je nutná řada energetických vstupů v rámci technologie samotné i při souvisejícím zpracování. Z toho důvodu o ní není vhodné uvažovat jako o udržitelné technologii. Žádná z technologií chemické recyklace nemůže v současné době nabídnout celkově pozitivní energetickou bilanci a nic nenasvědčuje tomu, že by se to mohlo v dohledné budoucnosti změnit.
- \* O fungování chemické recyklace bylo zveřejněno velmi nedostatečné množství informací, což, společně s nedostatkem nezávislých zpráv o této technologii, zřejmě vedlo k jejímu vykreslování v podobě, která výrazně překonává její skutečné možnosti. Standardem se musí stát mnohem větší transparentnost, pokud jde o fungování v provozu, energetickou bilanci a hodnocení vlivů na životní prostředí.

# Slovníček pojmů, zkratky a literatura

## Slovníček pojmů

**Aminolýza:** Postup depolymerace, při kterém se jako rozpouštědlo používají aminy.

**Amonolýza:** Postup depolymerace, při kterém se jako rozpouštědlo používá amoniak.

**Antirozpouštědlo:** Látka, která se přidává ke směsi po čištění / depolymeraci na bázi rozpouštědel, aby se z rozpouštědla vysrážela cílová sloučenina.

**Depolymerace (depolymerizace):** První stupeň chemické recyklace, kterým se plastové polymery za použití kombinace tepla, tlaku a/nebo rozpouštědel rozštěpí v nějakém typu reakční nádoby na oligomery a monomery.

**Glykolýza:** Postup depolymerace na bázi rozpouštědel, který využívá glykoly.

**Hydrogenace:** Postup chemické reakce, kdy se na surovinu působí vodíkem.

**Hydrolyza:** Postup depolymerace na bázi rozpouštědel, který využívá vodu při vysoké teplotě a tlaku, často s chemickými přísadami, díky kterým je rozpouštědlo kyselé nebo alkalické.

**Metanolýza:** Postup depolymerace na bázi rozpouštědel, který využívá metanol.

**Monomer:** Základní jednotková molekula, která je stavebním prvkem plastů. Mezi jejich příklady patří: etylen, propylen, styren, fenol, formaldehyd, etylenglykol, vinylchlorid.

**Oligomer:** Malá skupina monomerů, menší než polymer.

**Polymer:** Velká uhlovodíková molekula sestávající z mnoha částí. Často se označuje jako „makromolekula“. Plasty jsou polymery tvořené menšími jednotkami, které se nazývají „monomery“.

**Polyolefin:** Typ polymeru vytvořený z olefinových (alkenových) monomerů. (Alken je uhlovodíková molekula s dvojnou vazbou mezi uhlíky.)

**Pyrolýza:** Postup chemické recyklace, při kterém se na plast působí teplem, ale za omezeného přístupu kyslíku, takže se plast tepelně rozkládá, ale nehoří. Jako produkt se může vytvářet složitá směs molekul ve třech formách – olej, plyn a uhlíkový zbytek. Kvalita produktů, depolymerace a nová syntéza závisí na mnoha vzájemně provázaných fyzikálních, chemických a tepelných faktorech.

**Repolymerace:** Druhý stupeň chemické recyklace, při kterém se z produktů opětovně vyrábí nový plast.

**Solvolyza:** Forma chemické recyklace, při které se využívá řada rozpouštědel přizpůsobených surovině, často ve více stupních a za dalších podmínek, jako je katalýza, vysoká teplota a vysoký tlak. Dělí se na následující kategorie:

1. Čištění – při něm se polymer zbaví kontaminantů / izoluje se z kompozitního materiálu a poté se oddělí pomocí dalšího zpracování a za použití antirozpouštědel;
2. Depolymerace – v tomto případě se polymer rozkládá na monomery a oligomery.

**Spodní výhřevnost (LHV):** Měřítka hustoty energie suroviny / paliva (v tomto případě plastu), obvykle vyjadřovaná v MJ.kg<sup>-1</sup>. Představuje maximální množství energie, které se uvolní z jednotkového množství plastu, když se zcela spálí. Nezahrnuje zpětné získávání energie z výparného tepla vody, která se vytváří.

**Termolýza:** Rozklad („uvolnění nebo změna“) působením tepla. Používá se pro první „depolymerační“ stupeň chemické recyklace. Mezi technologie termolýzy patří pyrolýza a zplyňování.

**Transesterifikace:** Chemická reakce, kterou se přeměňuje určitý typ uhlovodíkové molekuly, nazývaný ester, na jiný typ esteru. K tomuto procesu může docházet v přítomnosti alkoholu a katalyzátoru.

**Zplyňování (gasifikace):** Proces chemické recyklace založený na pyrolýze, při kterém je omezen přístup kyslíku, takže se plast tepelně rozkládá, ale nehoří. Zplyňování bylo optimalizováno před více než sto lety jako způsob výroby plynu z uhlí, dřevěného uhlí a dřevité biomasy. Zjistilo se, že je vysoce citlivé a nesnáší jiné typy suroviny. To vedlo k řadě komerčních neúspěchů, když se jako surovina použil plastový nebo jiný směsný odpad.

## Zkratky

**ASR** – zbytky z drcení starých automobilů

**BPA** – bisfenol-A

**EPC** – kopolymer etylenu a propylenu

**HDPE** – vysokohustotní polyetylen

**LDPE** – nízkohustotní polyetylen

**PA** – polyamid

**PAU** – polycyklické aromatické uhlovodíky

**PBDD/F** – polybromované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany

**PCDD/F** – polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany (zkráceně dioxiny)

**PLA** – kyselina polymlečná

**PP** – polypropylen

**PS** – polystyren

**PET** – polyethylentereftalát

**PU** – polyuretan

**PVC** – polyvinylchlorid

**TEQ** – toxický ekvivalent

**VOC** – těkavé organické sloučeniny

## Literatura

Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, Gh., Rabie, A. M., ElMetwally, A. E. 2016. Egyptian Journal of Petroleum, 25, pp. 53-64.

American Chemistry Council. 2019. U. S. Chemical Investment linked to Shale Gas: \$204 Billion and Counting (online). Accessed 7th January 2020. Available from: [https://www.americanchemistry.com/Shale\\_Gas\\_Fact\\_Sheet.aspx](https://www.americanchemistry.com/Shale_Gas_Fact_Sheet.aspx)

Anzano, M., Collina, E., Piccinelli, E., Lasagni, M. 2017. Lab-scale pyrolysis of the Automotive Shredder Residue light fraction and characterisation of tar and solid products. Waste Management, 64, pp. 263-271.



- Arturi, K. R., Sokoli, H. U., Søgaaard, E. G., Vogel, F., Bjelic. 2018. Recovery of value-added chemicals by solvolysis of unsaturated polyester resin. *Journal of Cleaner Production*, 170, pp. 131-136.
- Baytekin, B., Baytekin, H. T., Grzybowski, B. A. 2013. Retrieving and converting energy from polymers: deployable technologies and emerging concepts. *Energy and Environmental Science*, 6, pp. 3467- 3482.
- Bernardo, M., Lapa, N., Gonçalves, M., Bardosa, R., Mendes, B., Pinto, F., Gulyurtlu, L. 2010. Toxicity of char residues produced in the co-pyrolysis of different wastes. *Waste Management*, 30, pp. 628-635.
- BP. 2019. Energy Outlook 2018 edition (online). Accessed 8th January 2019. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energyoutlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>
- Butler, E., Devlin, G., McDonnell, K. 2011. Waste polyolefins to liquid fuels via pyrolysis: review of commercial state-of-the-art and recent laboratory research. *Waste Biomass and Valorisation*, 2, pp. 227-255.
- Cao, B., Sun, Y., Guo, J., Wang, S., Yuan, J., Esakkimuthu, S., Uzoejinwa, B. B., Yuan, C., Abomohra, A. E., Qian, L., Liu, L., He, Z., Wang, Q. 2019. Synergistic effects of co-pyrolysis of macroalgae and polyvinyl chloride on bio-oil/biochar properties and transferring regularity of chlorine, *Fuel*, 246, pp. 319-329.
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., He, P. 2014. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34, 2466-2486.
- Closed Loop Partners. 2019. Accelerating Circular Supply Chains for Plastics (online). Accessed 7th January 2020. Available from: [https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2020/01/CLP\\_Circular\\_Supply\\_Chains\\_for\\_Plastics.pdf](https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2020/01/CLP_Circular_Supply_Chains_for_Plastics.pdf)
- Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leyssens, J., Muncke, J., Ritschkoff A-C., Van Doorselaer, K., Velis, C., Wagner, M. 2019. A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions, (M. De Smet & M. Linder, Eds.). European Commission, Brussels, Belgium.
- Doherty, J. 2019. Chemical recycling of plastics '10 years away' (online). Accessed 7th January 2019. Available from: <https://www.letsrecycle.com/news/latest-news/chemical-recycling-ofplastics-10-years-away/>
- Evangelopoulos, P., Kantarelis, E., Yang, W. 2015. Investigation of the thermal decomposition of printed circuit boards (PCBs) via thermogravimetric analysis (TGA) and analytical pyrolysis (Py-GC/MS), *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115, pp. 337-343.
- Fifield, F. W., Haines, P. J. 2000. *Environmental Analytical Chemistry* (2nd Ed.). Blackwell Science: Oxford, p. 261-262.
- Font, R., Aracil, I., Fullana, A., Martin-Gullón, I., Conesa, J. A. 2003. Semivolatile compounds in pyrolysis of polyethylene. *Journal of the Analytical and Applied Pyrolysis*, 68-69. pp. 599-611.
- GAIA, 2019. Questions and Answers: Chemical Recycling (online). Accessed 7th January 2020. Available from: <https://www.no-burn.org/chemical-recycling-factsheet/>
- Garrido, M. A., Font, R., Conesa, J. A. 2016. Pollutant emissions during the pyrolysis of flexible polyurethane foam. *Waste Management*, 52, pp. 138-146.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling, *Journal of Hazardous Materials*, 344, pp. 179-199.
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2115-2126. doi:10.1098/rstb.2008.0311
- Hydrocarbon Processing. 2019. Shell uses plastic waste to produce chemicals (online). Accessed 23rd December 2019. Available from: <https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2019/11/shell-uses-plastic-waste-to-produce-chemicals>
- Idowu, O., Semple, K. T., Ramadass, K., O'Connor, W., Hansbro, P., Thavamani, P. 2019. Beyond the obvious: Environmental health implications of polar polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environment International*, 123, pp. 543-557.
- Iñiguez, M. E., Conesa, J.A., Soler, A. 2018. Effect of marine ambient in the production of pollutants from the pyrolysis and combustion of a mixture of plastic materials. *Marine Pollution Bulletin*, 130, pp. 249-257.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (online). Accessed 8th January 2019. Available from: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SRI5\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SRI5_SPM_version_report_LR.pdf)
- Joshi, C. A., Seay, J. R. 2019. Total generation and combustion emissions of plastic derived fuels: a trash to tank approach. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. DOI: 10.1002/ep.13151

- Kalargaris, I., Tian, G., Gu, S. 2017. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 157, pp. 108-115.
- Kaupp, A., 1984. State of the art for small-scale gas producer-engine systems, First published by the German Appropriate Technology Exchange (GATE), Reissued by the Biomass Energy Foundation Press: Golden.
- Kiel, J.H.A., van Paasen, S.V.B., Neeft, J.P.A., Devi, L., Ptasiński, K.J., Janssen, F.J.J.G., Meijer, R., Berends, R.H., Temmink, H.M.G., Brem, G., Padban, N., Bramer, E.A. 2004. Primary measures to reduce tar formation in fluidised-bed biomass gasifiers. Final report SDE project P1999-012, ECN-C—04-014.
- Energy Research Centre of the Netherlands. Laville, S. 2019. Founders of plastic waste alliance ‚investing billions in new plants‘ (online). Accessed 14th February 2020. Available from: <https://www.theguardian.com/environment/2019/jan/21/founders-of-plastic-wastealliance-investing-billions-in-new-plants>
- Levidow, L., Raman, S. 2019. Metamorphosing waste as a resource: Scaling waste management by ecomodernist terms. *Geoforum*, 98, pp. 108-122.
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M. 2017. Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 346-368.
- Ma, C., Yan, Q., Yu, J., Chen, T., Wang, D., Liu, S., Bikane, K., Sun, L. 2019. The behavior of heteroatom compounds during the pyrolysis of waste computer casing plastic under various heating conditions, *Journal of Cleaner Production*, 219, pp. 461-470.
- Mamani-Soliz, P., Seidl, L. G., Keller, F., Lee, R. P., Meyer, B. 2020. Chemisches Recycling – Aktueller Stand und neue Entwicklungen. In Holm O., Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D., & Friedrich, B. (Eds.) *Recycling und Sekundärrohstoffe*, Band 13, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, pp. 268 – 284. *ntal Sciences*, 35, pp. 701-708.
- Maric, J., Vilches, T. B., Pissot, S., Vela, I.C., Gyllenhammer, M., Seemann, M. 2020. Emissions of dioxins and furans during steam gasification of Automotive Shredder Residue; experiences from Chalmers 2-4 MW indirect gasifier. *Waste Management*, 102, pp. 114-121.
- Matsumoto, K., Kurisu, S., Oyamoto, T. 1975. Development of process of fuel recovery by thermal decomposition of waste plastics. International Conference on Conversion of Refuse to Energy, 1st Proc, Montreux, Switzerland, 3rd to 5th November.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaza, A.S., Rehan, M., Nizami, A.S. 2016. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 102, pp. 822-838.
- Miskolczi, N., Bartha, B., Deák, G., Jóver, B. 2004. Thermal degradation of municipal solid waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 86, pp. 357-366.
- Miskolczi, N., Ateş, F., Borosodi, N. 2013. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char, and pyrolysis oil properties. *Bioresource Technology*, 144, 370-379.
- Mohr, K., Nonn, Ch., Jager, J. 1997. Behaviour of PCDD/F under pyrolysis conditions. *Chemosphere*, 34 (5-7), pp. 1053-1064.
- Mølgaard, C. 1995. Environmental impacts by disposal of plastic from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 15, pp. 51-63.
- Panda, A.K., Singh, R.K., Mishra, D.K. 2010. Thermolysis of waste plastic to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products - A world perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 223-248.
- Porteous, A. 1975. An assessment of energy recovery methods applicable to domestic refuse disposal. *Resources Policy*, 284-294.
- Quicker, P. 2019. Evaluation of recent developments regarding alternative thermal waste treatment with a focus on depolymerisation processes. In: Thomé-Kozmiensky and Thiel, S. (Eds): *Waste Management*, 9, Waste-to-Energy. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, pp. 361-370.
- Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, pp. 24-58.
- Reed, T., Das, A., 1988. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*, Solar Energy Research Institute: Colorado.
- Reed, T. B., Gaur, S. 1997. The high heat of fast pyrolysis for large particles. In: Bridgwater, A. V., Boocock, J. D. G. B. (Eds.), *Developments in Thermochemical Biomass Conversion Vol. 1*, Blackie Academic and Professional: London, pp. 97-103.
- Rey, L., Conesa, J. A., Aracil, I., Garrido, M. A., Ortuño, N. 2016. Pollutant formation in the pyrolysis and combustion of Automotive Shredder Residue. *Waste Management*, 56, pp. 376-383.
- Rodrigues, M. O., Abrantes, N., Gonçalves, F. J. M., Nogueira, H., Marques, J. C., Gonçalves, F. J. M. 2019. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72, 103239.

- Rollinson, A. N. 2018. Fire, explosion and chemical toxicity hazards of gasification energy from waste. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, pp. 273-280.
- Rollinson, A. N., Oladejo, J. M. 2019. 'Patented blunderings', efficiency awareness, and self-sustainability claims in the pyrolysis energy from waste sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, pp. 233-242.
- Scheirs, J., Kaminsky, W. 2006. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels, J. Wiley & Sons: London.
- Seidl, L. G., Lee, R. P., Keller, R. P., Meyer, B. 2020. Beitrag des chemischen Recyclings zur Defossilierung von Rohstoffketten – Konzeptstudie für die nachhaltige Olefinerzeugung in Deutschland. In Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Gosten, A. (Hrsg.): *Energie aus Abfall*, Band 17, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, pp. 115-137.
- Seo, Y-H., Shin, D-H. 2002. Determination of paraffin and aromatic hydrocarbon type chemicals in liquid distillates produced from the pyrolysis process of waste plastics by isotopedilution mass spectrometry. *Fuel*, 81, pp. 2103-2112.
- Sherwood, J. 2020. Closedloop recycling of polymers using solvents. *Johnson Matthey Technology Review*, 64, pp. 4-15.
- Spierling, S., Knüpfner, E., Behnsen, H., Mudersbach, M., Krieg, H., Springer, S., Albrecht, S., Herrmann, C., Endres, H-J. 2018. Biobased plastics – A review of environmental, social and economic impact assessments. *Journal of Cleaner Production*, 185, pp. 476-491.
- Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., Gowda, A. N. S. 2016. Toxic pollutants from plastic waste - a review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp. 701-708.
- Vahk, J. 2019. Joint briefing: Recycled carbon fuels in the renewable energy directive (online). Accessed 10th December 2019. Available from: <https://zerowasteurope.eu/wpcontent/uploads/2019/04/NGO-joint-briefing-RCF.pdf>
- Vehlow, J. 2016. Overview of the Pyrolysis and Gasification Processes for Thermal Disposal of Waste In: Löschau, M. (ed), *Air Pollutant Emissions from Combustion Processes and their Control*, Vivis, TK Verlag. pp. 431-444.
- Vreugdenhil, B. J., Zwart, R. W. R., 2009. Tar formation in pyrolysis and gasification, ECN-E-08-087. Energy Research Centre of the Netherlands.
- Weber, R., Sakurai, T. 2001. Formation characteristics of PCDD and PCDF during pyrolysis processes. *Chemosphere*, 45, pp. 1111-1117.
- Mapa lokalit v České republice, ve kterých bylo nebo je plánováno zprovoznění technologií spadajících pod označení „chemická recyklace“ nebo technologií jim podobných
- Williams, P.T., Williams, E.A. 1999. Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, pp. 107-126.
- Wong, S. L., Ngadi, N., Abdullah, T. A. T., Inuwa, I. M. 2015. Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1167-1180.
- Xu, Q., Yin, X., Wang, M., Wang, H., Zhang, N., Shen, Y., Xu, S., Zhang, L., Gu, Z. 2010. Analysis of phthalate migration from plastic containers to packaged cooking oil and mineral water, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (21), pp. 11311-11317.
- Zero Waste Europe. 2018. Hidden emissions: A story from the Netherlands – Case study (online). Accessed 23rd March 2020. Available from: <https://zerowasteurope.eu/wpcontent/uploads/2018/11/NetherlandsCS-FNL.pdf>
- Zheng, J., Suh, S. 2019. Strategies to reduce the global footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9, pp. 374-378.

Mapa lokalit v České republice, ve kterých bylo nebo je plánováno zprovoznění technologií spadajících pod označení „chemická recyklace“ nebo technologií jim podobných



Autor: Sarah Ožanová

