

SOUHRNNÁ ZPRÁVA ANALÝZA VYBRANÉHO PRŮMYSLOVÉHO ODVĚTVÍ (SOULAD S BAT A TECHNOLOGIE NAD RÁMEC BAT) RECYKLACE PLASTŮ - PŘEHLED S DŮRAZEM NA MECHANICKOU A CHEMICKOU RECYKLACI

*1.E.1.5 Souhrnná zpráva Analýza vybraného průmyslového odvětví
(soulad s BAT a technologie nad rámec BAT)*

*Zpráva vypracovaná v rámci řešení pracovního balíčku
WP1E projektu TAČR SS02030008 Centrum environmentálního
výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální
bezpečnost (CEVOOH)
Červenec 2024*

Ing. Radek Škarohlíd, Ph.D.; Fakulta technologie ochrany prostředí,
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**.

Obsah

Úvod	2
Recyklace plastů	2
Separace a čištění	2
Mechanická recyklace	3
Chemická a termochemická recyklace	4
Srovnání mechanické a chemické recyklace	6
Shrnutí/Závěr	6
Literatura	7

Úvod

S celosvětově rostoucí produkcí plastů, cca 460 Mt v roce 2019 (OECD, 2022a) a projektovanou produkcí 1231 Mt v roce 2060 (OECD, 2022b)), se stále více projevují nedostatky v systémech nakládání s plastovými odpady (PO) (v roce 2019 se celkově jednalo o 353 Mt PO), kdy pouze 9 % PO je poté recyklováno, 19 % spalováno, 50 % skládkováno a 22 % uniklo do ŽP (OECD, 2022a). Tento současný stav vede k ekonomickým ztrátám a závažným environmentálním dopadům od značných emisí skleníkových plynů, přes negativní vlivy na zdraví ekosystémů, po ohrožení zdraví obyvatelstva (Gunawardhana et al., 2023; Xayachak et al., 2023).

K napravení neutěšeného stavu může potenciálně vést intenzivnější zavádění principů oběhového hospodářství, které usilují o optimalizaci využívání zdrojů podporou oběhového charakteru výrobků, součástí a materiálů prostřednictvím zlepšení procesů údržby, opětovného použití a recyklace. V souladu s tímto cílem např. bylo Evropskou komisí nařízeno, aby do roku 2030 byla míra recyklace plastových obalových odpadů v EU 55 %. Stejně tak USA, Japonsko a Čína aktivně podporují oběhové hospodářství s cílem dosáhnout vyšší míry recyklace (European Commission, 2018; Zhang and Nakatani, 2024).

Recyklace plastů

Konvenční metody nakládání s odpady, jako je skládkování či spalování, představují významná environmentální rizika (Kibria et al., 2023; Solis and Silveira, 2020), recyklace proto nabízí udržitelnější alternativu tím, že přeměňuje plastový odpad na znovu použitelné materiály, čímž snižuje poptávku po primárních zdrojích a zmírňuje environmentální dopady výroby plastů (Naderi Kalali et al., 2023; Nayanathara Thathsarani Pilapitiya and Ratnayake, 2024). Metody recyklace plastů lze obecně rozdělit do tří kategorií: (i) fyzikální/mechanická, (ii) chemická a (iii) termochemická recyklace (Kibria et al., 2023; Markandeya et al., 2023).

Separace a čištění

Třídění/separace je základním krokem ve zpracovatelském cyklu a probíhá především pomocí tzv. manuálního (vizuální identifikace na základě tvaru, barvy a ochranné známky plastu), automatizovaného suchého a mokrého třídění. Automatizované suché třídění lze dále rozdělit na infračervené třídění (využívá blízkého infračervené záření), rentgenové třídění (identifikuje spektrální otisk při průchodu plastů na dopravníku a třídí je na základě chemického složení), elektrostatické třídění (volně padají elektrickým polem a třídí se na základě triboelektrického náboje), mechanické třídění (třídí se na základě specifické hmotnosti) a robotické třídění s využitím kamerových systémů a AI. Automatizované mokré třídění lze dále rozdělit na plovákové (separace na základě hustoty), hydrocyklónové (separace suspendovaných materiálů na základě rozdílů v tíze s vodnými roztoky), selektivní rozpouštění (rozpouštění smíšených plastů pomocí rozpouštědel a následné vysrážení,

filtrace a konečné odpaření) a hydroglykolýzu (molekuly polymeru se přemění zpět na surové monomery a znovu se použijí při výrobě nového polymeru) (Kibria et al., 2023; Lange, 2021).

Vytříděné plasty nemusí být stále vhodné k přímému přepracování. Mohou vyžadovat čištění, aby se odstranily nečistoty a další kontaminanty, např. z balených potravin nebo ze směsného spotřebitelského odpadu. Takové čištění je obecně nezbytné pro mechanickou recyklaci, ale může být důležité i pro chemickou recyklaci. Plastový odpad se obvykle čistí horkou nebo studenou vodou za pomoci žiravin nebo detergentů (Ragaert et al., 2017). Čištění je často začleněno do třídícího řetězce a může být značně nákladné, protože vyžaduje speciální mycí zařízení, ale také krok sušení a čištění odpadních vod. Ve snaze vyhnout se nákladům a nárokům na vodu se zkoumají také různé přístupy suchého čištění jako například čištění stlačeným vzduchem za asistence mechanického působení, jako je rotorový disk, škrabání nebo fluidní pískové lože. Je uváděno, že tyto techniky suchého čištění se vyrovnají účinnosti mokrého mytí (Roosen et al., 2021)

Mechanická recyklace

Mechanická recyklace zahrnuje obecně fyzikální zpracování plastového odpadu na druhotné suroviny bez změny chemické struktury polymerů. Mechanická recyklace je široce praktikována díky relativně nízkým nákladům a energetickým nárokům ve srovnání s chemickou recyklací (Ragaert et al., 2017). Potýká se však s několika problémy, jako je degradace vlastností polymerů po několika recyklačních cyklech, kontaminace toků plastového odpadu a omezení při zpracování směsných nebo kompozitních plastů (Jiang, Zhang & Li, 2022).

Primární mechanická recyklace se využívá pro nakládání s plastovým odpadem v rámci samotné průmyslové výroby. Spočívá ve vnášení odpadních kusů, zbytků/přebytků atd. zpět do extruzního cyklu. Díky technologickému pokroku je odpad vznikající při transformačních procesech minimální, což umožňuje opětovné zavedení více než 90 % zbytků/přebytků do samotné výroby plastů. Tento typ recyklace je proveditelný pouze u relativně čistého odpadu v rámci výroby vzhledem k požadované vysoké míře homogenity (Al-Salem et al., 2010, 2009; Muñoz Meneses et al., 2022).

Sekundární mechanická recyklace se poté týká opětovného zpracování plastového odpadu (hlavně po spotřebě) pomocí fyzikálních metod za účelem výroby pelet/granulí. Kroky, které tento přístup zahrnuje před výrobou konečného produktu, jsou sběr, separace a čištění, viz předchozí kapitola, sušení, drcení, pigmentace/barvení, spojování a míchání s panenskými polymery stejné skupiny spolu s kompatibilizátory a aditivy, které zmírňují nedostatky recyklovaného materiálu s následnou peletizací/extruzí. Tyto pelety se následně používají při výrobě nových, ale často relativně méně kvalitních plastových výrobků (Okan et al., 2019). Jedná se všeobecně o převládající metodu recyklace se zaměřením na tři dominantní obalové polymery PE, PP a PET. Velmi účinná a zatím úspěšná mechanická recyklace je vázána na několik cyklů s využitím minoritní frakce nejčistšího a nejkvalitnějšího odpadního toku. Například PET se obvykle recykluje jednou, z lahve na textil. PP údajně technicky zvládne až čtyři recyklace, ale prakticky se recykluje jednou, např. na textil a vybavení dětských hřišť (Lange, 2021). Je tedy zřejmé, že mechanická recyklace dnes spočívá především v downcyklaci. Z tohoto důvodu je zapotřebí doplňkových možností recyklace, zejména chemické recyklace.

Význačným problémem mechanické recyklace je zhoršení vlastností polymerů (např. pevnost v tahu a pružnost) důsledkem tepelného a mechanického namáhání během procesu recyklace, především postkonzumních plastů (Markandeya et al., 2023). Recykláty také mohou obsahovat přísady, jako jsou plnidla, antioxidanty, změkčovadla, pigmenty, zpomalovače hoření atd., které byly vybrány a dávkovány pro konkrétní aplikace. Recyklované materiály proto budou obsahovat průměrované množství těchto přísad. Recyklované polymerní řetězce mohou být také částečně degradovány, např. oxidací nebo UV zářením při využívání a v některých aplikacích, jako jsou potravinové obaly nelze používat materiály, které by mohly být kontaminovány stopami toxických látek (Francis, 2016; Lange, 2021). Ke zlepšení vlastností recyklovaných plastů lze použít již zmíněná aditiva a kompatibilizátory, díky nimž jsou poté vhodnější pro různorodé aplikace (Damayanti et al., 2022). Sledované vlastnosti recyklovaných plastů jsou však často horší než vlastnosti primárních materiálů, což omezuje celkový potenciál jejich využití (Nayanathara Thathsarani Pilapitiya and Ratnayake, 2024). K řešení těchto problémů a zvýšení užitečných vlastností mechanicky recyklovaných plastů je zapotřebí dalšího výzkumu a vývoje (Thiounn and Smith, 2020).

Dalším důležitým aspektem je dopad mechanické recyklace na životní prostředí. I když mechanická recyklace má obecně nižší uhlíkovou stopu než např. chemická recyklace, spotřeba energie a emise spojené s fázemi třídění, čištění a přepracování mohou být stále významné (Alhazmi et al., 2021; Judl et al., 2024; Ragaert et al., 2017). Strategie pro snížení těchto dopadů zahrnují zlepšení energetické účinnosti recyklačních procesů a využívání obnovitelných zdrojů energie (Jiang et al., 2022). Zvýšení míry recyklace a používání recyklovaných materiálů v nových výrobcích může navíc přispět ke snížení environmentálních dopadů výroby a spotřeby plastů (Solis and Silveira, 2020).

Chemická a termochemická recyklace

Chemická/termochemická recyklace nabízí alternativní přístupy spočívající v rozkladu plastového odpadu na monomery či oligomery nebo jiné cenné chemické látky prostřednictvím termochemických a katalytických procesů, jako jsou např. pyrolýza, zplyňování, zkapaňování a depolymerizace (Biessey et al., 2023; Li et al., 2022). Spektrum metod chemické recyklace dokáže v principu zpracovat širší škálu typů plastů, včetně smíšených a kontaminovaných plastů, které jsou pro mechanickou recyklaci nevhodné (Shahsavari et al., 2022; Solis and Silveira, 2020). Chemická recyklace má obecně potenciál produkovat vysoce kvalitní recyklované materiály rovnocenné primárním surovinám, čímž řeší problém degradace užitečných vlastností polymerů, který se projevuje při mechanické recyklaci (Huang et al., 2022; Tsuchimoto and Kajikawa, 2022).

Pyrolýza, proces tepelného rozkladu za nepřístupu kyslíku v rozmezí teplot 350–700 °C, je jednou z nejstudovanějších metod termochemické recyklace PO. Pyrolytickým zpracováním PO vznikají produkty, které se po kondenzaci shromažďují jako pyrolýzní oleje, vosky, plyny a pevné zbytky (char), přičemž jejich zastoupení závisí na kvalitě a typu vstupní suroviny, reakčních podmínkách a typu reaktoru (Davidson et al., 2021). Pyrolýza je klasifikována dle rychlosti ohřevu (pomalá, rychlá nebo ultrarychlá) či obecně na typu prostředí, v kterém probíhá (katalytická pyrolýza, parní pyrolýza, vakuová pyrolýza, mikrovlnná pyrolýza, plazmová pyrolýza, oxidativní pyrolýza atd.) (Andoos et al., 2023). Pyrolýzní olej lze např. dále rafinovat na cenné chemické látky a paliva, což z něj činí slibnou technologii přeměny plastového odpadu na užitečné produkty (Shahsavari et al., 2022). Proces však

vyžaduje vysoké energetické vstupy a kvalita produktů se může lišit v závislosti na typu PO a provozních podmínkách (Jiang et al., 2022). V současné době existuje či je v plánu zprovoznit řadu komerčně provozovaných pyrolýzních technologií na zpracování PO především v EU a US (Li et al., 2022).

Dalším procesem chemické recyklace je zplyňování, při kterém se plastový odpad přeměňuje na syntézní plyn, směs vodíku a oxidu uhelnatého, kterou lze využít k výrobě chemických látek a paliv (Li et al., 2022; Zhang et al., 2021). Tento proces zahrnuje reakci plastového odpadu s kyslíkem a párou při teplotách $>550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zplyňováním lze zpracovávat širokou škálu plastových odpadů, včetně těch, které jsou kontaminovány jinými materiály (Dong et al., 2018). Tato technologie je však investičně náročná a vyžaduje pokročilou infrastrukturu a komplexní provozní znalosti (Shahsavari et al., 2022). Navzdory nízké celkové kapacitě se počet celosvětově provozovaných zplyňovacích zařízení odhaduje na současných přibližně 100 provozuschopných zařízení (Li et al., 2022).

Pro chemickou recyklaci plastů je taktéž využíváno zkapalňování. Zkapalňování obvykle probíhá při teplotách mezi $200\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ přeměnou plastové suroviny na kapalný olej pod tlakem plynů a/nebo za použití rozpouštědel v kapalně fázi s možným přidavkem heterogenních nebo homogenních katalyzátorů k podpoření konverze a selektivity produktu (Čolnik et al., 2021). Zkapalňováním plastů lze získat kapalná paliva nebo monomery. Během zkapalňování se udržuje vysoký tlak dusíku nebo jiných plynů, což pomáhá udržovat produkty v kapalně fázi. Tlakový vodík např. zvyšuje štěpení polymerního řetězce, uzavírá konce řetězce vodíkem a vytváří kapaliny s vyšším poměrem H/C a produkty s nízkým bodem varu. Při zkapalňování rozpouštědly v nadkritických stavech těchto rozpouštědel se také využívá drasticky zvýšené rychlosti reakcí a zvýšené schopnosti rozpouštění polárních a nepolárních produktů. V případě hydrotermálního zkapalňování je používáno vody jakožto levného ekologického rozpouštědla (Li et al., 2022; Williams and Slaney, 2007).

Další slibnou metodou chemické recyklace je depolymerizace, při níž se polymery rozkládají na své monomery pomocí chemických činidel/rozpouštědel nebo katalyzátorů (Huang et al., 2022). Tímto procesem lze získat vysoce čisté monomery, které lze znovu polymerovat do nových plastů, čímž se účinně uzavírá recyklační smyčka (Ragaert et al., 2017). Do depolymerizačních metod spadá především hydrolýza, která zahrnuje rozklad polymerů vodou, často za přítomnosti kyselin, zásad, alkoholů nebo enzymů, za vzniku monomerů a oligomerů (Li et al., 2022; Thiounn and Smith, 2020). Tato metoda je zvláště užitečná pro recyklaci některých typů plastů, jako je např. polyethylentereftalát (PET). Navzdory svému potenciálu se hydrolýza potýká s mnohými problémy, jako je potřeba přesné kontroly reakčních podmínek a účinné katalýzy. Ke zvýšení účinnosti a škálovatelnosti hydrolýzy pro recyklaci plastů je však zapotřebí dalšího intenzivního výzkumu (Huang et al., 2022; Li et al., 2022; Solis and Silveira, 2020). Souhrnně lze konstatovat, že navzdory svému potenciálu čelí celkově depolymerizační metody mnohým výzvám, jako je potřeba vysoce čistých vstupních surovin a vývoj účinných katalyzátorů. K optimalizaci těchto procesů a jejich ekonomické techno-ekonomické životaschopnosti je však stále zapotřebí dalších inovací (Thiounn and Smith, 2020; Tsuchimoto and Kajikawa, 2022).

Srovnání mechanické a chemické recyklace

Mechanická i chemická recyklace hrají zásadní roli při řešení krize PO, přesto se výrazně liší svými postupy, výhodami a omezeními. Mechanická recyklace je obecně nákladově efektivnější a šetrnější k životnímu prostředí, ve srovnání s chemickou recyklací vykazuje nižší spotřebu energie a emise do ŽP (Bhandari et al., 2021; Tiwari et al., 2023; Zhang et al., 2021). Její omezení však tkví v potřebě relativně vysoké kvality vstupních materiálů a dále degradaci užitečných vlastností polymerů v průběhu recyklačního procesu (Uekert et al., 2023). Ovšem integrace pokročilých třídících technologií a vývoj nových aditiv mohou dále zlepšit kvalitu a použitelnost mechanicky recyklovaných plastů (Damayanti et al., 2022).

Naproti tomu chemická recyklace dokáže zpracovat širší škálu PO, včetně těch kontaminovaných nebo degradovaných, a může produkovat vysoce kvalitní výstupy srovnatelné s primárními plasty (Huang et al., 2022; Muñoz Meneses et al., 2022; Zhang et al., 2021). Např. výše zmíněné metody pyrolýzy a depolymerizace nabízejí výhodu výroby monomerů a dalších cenných chemických látek, které lze použít jako vstupní suroviny pro výrobu nových plastů (Shahsavari et al., 2022; Solis and Silveira, 2020) což dále přispívá k řešení problematiky downcyklace, kdy recyklované materiály mají ve srovnání s původními výrobky nižší kvalitu a hodnotu (Jiang et al., 2022). Ovšem vyšší náklady a energetická náročnost chemické recyklace spolu s jejími současnými technologickými problémy vyžadují další výzkum a vývoj s cílem zvýšit její techno-ekonomickou konkurenceschopnost a účinnost (Ragaert, Delva & Van Geem, 2017; Tsuchimoto & Kajikawa, 2022).

Navzdory popsaným rozdílům existuje potenciál pro integraci mechanických i chemických recyklačních procesů s cílem maximalizovat míru recyklace a kvalitu recyklovaných materiálů (Solis and Silveira, 2020). Např. plasty, které nelze zpracovat mechanickou recyklací z důvodu znečištění nebo degradace, lze nasměrovat do chemických recyklačních zařízení. Tento integrovaný přístup může pomoci řešit omezení jednotlivých metod a vytvořit účinnější a udržitelnější systém recyklace plastů (Tiwari et al., 2023).

Volbu mezi mechanickou a chemickou recyklací mohou navíc ovlivnit místní podmínky, jako je dostupnost infrastruktury, ekonomické faktory a regulační rámce (Markandeya et al., 2023). Tvůrci politik a zúčastněné strany v odvětví musí tyto faktory zohlednit při vytváření recyklačních strategií. Využitím silných stránek obou metod recyklace je možné vytvořit robustnější a přizpůsobivější systém nakládání s odpady, který dokáže účinně řešit rostoucí problém PO (Naderi Kalali et al., 2023).

Shrnutí/Závěr

Efektivní recyklace plastů má zásadní význam pro zmírnění dopadů plastového odpadu na životní prostředí a podporu udržitelného oběhového hospodářství. Mechanická recyklace je navzdory své nákladové efektivitě a nižším energetickým nárokům omezena kvalitou a typem plastů, které může zpracovávat. Chemická recyklace je sice schopna zpracovávat širší škálu plastů a produkovat vysoce kvalitní výstupy, ale v současné době je omezena vyššími náklady a energetickou náročností. Pro překonání těchto problémů a zvýšení celkové účinnosti a životaschopnosti systémů recyklace plastů

je zásadní další výzkum a inovace v obou recyklačních přístupech. Pokračující výzkum a inovace spolu s podpůrnými politikami a ekonomickými pobídkami mají zásadní význam pro rozvoj a zavádění pokročilých recyklačních technologií, které mají potenciál zajistit udržitelnou budoucnost nakládání s PO.

Literatura

- Alhazmi, H., Almansour, F.H., Aldhafeeri, Z., 2021. Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies. Sustainability 13, 5340. <https://doi.org/10.3390/su13105340>
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J., 2010. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. Progress in Energy and Combustion Science 36, 103–129. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.09.001>
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J., 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management 29, 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Andooz, A., Egbalpour, M., Kowsari, E., Ramakrishna, S., Ansari Cheshmeh, Z., 2023. A comprehensive review on pyrolysis from the circular economy point of view and its environmental and social effects. Journal of Cleaner Production 388, 136021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136021>
- Bhandari, N.L., Bhattarai, S., Bhandari, G., Subedi, S., Dhakal, K.N., 2021. A Review on Current Practices of Plastics Waste Management and Future Prospects. Journal of Institute of Science and Technology 26, 107–118. <https://doi.org/10.3126/jist.v26i1.37837>
- Biessey, P., Vogel, J., Seitz, M., Quicker, P., 2023. Plastic Waste Utilization via Chemical Recycling: Approaches, Limitations, and the Challenges Ahead. Chemie Ingenieur Technik 95, 1199–1214. <https://doi.org/10.1002/cite.202300042>
- Čolnik, M., Kotnik, P., Knez, Ž., Škerget, M., 2021. Hydrothermal decomposition of polyethylene waste to hydrocarbons rich oil. The Journal of Supercritical Fluids 169, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105136>
- Damayanti, D., Saputri, D.R., Marpaung, D.S.S., Yusupandi, F., Sanjaya, A., Simbolon, Y.M., Asmarani, W., Ulfa, M., Wu, H.-S., 2022. Current Prospects for Plastic Waste Treatment. Polymers 14, 3133. <https://doi.org/10.3390/polym14153133>
- Davidson, M.G., Furlong, R.A., McManus, M.C., 2021. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. Journal of Cleaner Production 293, 126163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163>
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M., 2018. Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants. Science of The Total Environment 626, 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>

- European Commission, (EC), 2018. A European strategy for plastics in a circular economy.
- Francis, R., 2016. Recycling of polymers: methods, characterization and applications. John Wiley & Sons.
- Gunawardhana, G.M.S.S., Perera, U.L.H.P., Ratnayake, A.S., 2023. Sources and Fate of Plastics into Microplastics: Degradation and Remediation Methods, in: Maritime Accidents and Environmental Pollution - The X-Press Pearl Disaster. CRC Press.
- Huang, J., Veksha, A., Chan, W.P., Giannis, A., Lisak, G., 2022. Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews 154, 111866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111866>
- Jiang, J., Shi, K., Zhang, X., Yu, K., Zhang, H., He, J., Ju, Y., Liu, J., 2022. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering 10, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>
- Judl, J., Horn, S., Karppinen, T.K.M., 2024. Towards a Low-Carbon Plastic Waste Recycling in Finland: Evaluating the Impacts of Improvement Measures on GHG Emissions. Circ.Econ.Sust. 4, 755–776. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00306-w>
- Kibria, Md.G., Masuk, N.I., Safayet, R., Nguyen, H.Q., Mourshed, M., 2023. Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. Int J Environ Res 17, 20. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z>
- Lange, J.-P., 2021. Managing Plastic Waste—Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign. ACS Sustainable Chem. Eng. 9, 15722–15738. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05013>
- Li, H., Aguirre-Villegas, H.A., Allen, R.D., Bai, X., Benson, C.H., Beckham, G.T., Bradshaw, S.L., Brown, J.L., Brown, R.C., Castillo, M.A.S., Cecon, V.S., Curley, J.B., Curtzwiler, G.W., Dong, S., Gaddameedi, S., Garcia, J.E., Hermans, I., Kim, M.S., Ma, J., Mark, L.O., Mavrikakis, M., Olafasakin, O.O., Osswald, T.A., Papanikolaou, K.G., Radhakrishnan, H., Sánchez-Rivera, K.L., Tumu, K.N., Lehn, R.C.V., Vorst, K.L., Wright, M.M., Wu, J., Zavala, V.M., Zhou, P., Huber, G.W., 2022. Expanding Plastics Recycling Technologies: Chemical Aspects, Technology Status and Challenges. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2022-9wqz0>
- Markandeya, N., Joshi, A.N., Chavan, N.N., Kamble, S.P., 2023. Chapter 16 - Plastic recycling: Challenges, opportunities, and future aspects, in: Verma, S., Khan, R., Mili, M., Hashmi, S.A.R., Srivastava, A.K. (Eds.), Advanced Materials from Recycled Waste. Elsevier, pp. 317–356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85604-1.00014-7>
- Muñoz Meneses, R.A., Cabrera-Papamija, G., Machuca-Martínez, F., Rodríguez, L.A., Diosa, J.E., Mosquera-Vargas, E., 2022. Plastic recycling and their use as raw material for the synthesis of carbonaceous materials. Heliyon 8, e09028. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09028>
- Naderi Kalali, E., Lotfian, S., Entezar Shabestari, M., Khayatzaadeh, S., Zhao, C., Yazdani Nezhad, H., 2023. A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural

materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 40, 100763.

<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100763>

Nayanathara Thathsarani Pilapitiya, P.G.C., Ratnayake, A.S., 2024. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials* 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>

OECD, 2022a. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. OECD. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>

OECD, 2022b. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. OECD. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>

Okan, M., Aydin, H.M., Barsbay, M., 2019. Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 94, 8–21. <https://doi.org/10.1002/jctb.5778>

Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K., 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Roosen, M., De Somer, T., Demets, R., Ügdüler, S., Meesseman, V., Van Gorp, B., Ragaert, K., Van Geem, K.M., Walgraeve, C., Dumoulin, A., De Meester, S., 2021. Towards a better understanding of odor removal from post-consumer plastic film waste: A kinetic study on deodorization efficiencies with different washing media. *Waste Management* 120, 564–575. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.021>

Shahsavari, Shadab, Bagheri, G., Shokri, Z., Shahsavari, Shahin, 2022. Materials and Energy from Waste Plastics: A Catalytic Approach, in: *Energy from Waste*. CRC Press.

Solis, M., Silveira, S., 2020. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management* 105, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>

Thiounn, T., Smith, R.C., 2020. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science* 58, 1347–1364. <https://doi.org/10.1002/pol.20190261>

Tiwari, R., Azad, N., Dutta, D., Yadav, B.R., Kumar, S., 2023. A critical review and future perspective of plastic waste recycling. *Science of The Total Environment* 881, 163433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163433>

Tsuchimoto, I., Kajikawa, Y., 2022. Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *Sustainability* 14, 16340. <https://doi.org/10.3390/su142416340>

Uekert, T., Singh, A., DesVeaux, J.S., Ghosh, T., Bhatt, A., Yadav, G., Afzal, S., Walzberg, J., Knauer, K.M., Nicholson, S.R., Beckham, G.T., Carpenter, A.C., 2023. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 11, 965–978. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05497>

Williams, P.T., Slaney, E., 2007. Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling* 51, 754–769.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.002>

Xayachak, T., Haque, N., Lau, D., Parthasarathy, R., Pramanik, B.K., 2023. Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study. *Process Safety and Environmental Protection* 173, 592–603. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.061>

Zhang, C.-Y., Nakatani, J., 2024. Implications of chemical recycling of plastic waste for climate change impacts: A critical review. *Sustainable Production and Consumption* 48, 301–323.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.016>

Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., Ding, T., Chen, L., Chen, C., 2021. Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production* 282, 124523.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>

