

Chemická recyklace pro textilní odpady

(zpracování, regenerace a opětovné materiálové využití)



R.Pjatkan, SCHP ČR Plasty, TVIP 2025, Hustopeče u Brna, 14.10.2025.

Svaz chemického průmyslu ČR

SCHP ČR:

profesní sdružení podniků a institucí se vztahem k chemickému odvětví.

Založen roku 1992, zastoupení cca 152 průmyslových podniků zaměstnávajících přibližně 30 tisíc pracovníků

Hlavní zaměření :

- SCHP ČR zastupuje chemický průmysl při prosazování a podpoře jeho zájmů v ČR a EU
- Aktivně vystupuje jménem svých členů zejména v oblasti legislativy, ekonomických rozhodnutí, konkurenceschopnosti a inovací.
- Podporuje vzdělávání s cílem připravit kvalitní zaměstnance pro chemický průmysl a jejich vhodné uplatnění a vede sociální dialog k zajištění sociálního smíru v odvětví.
- Své členy vede ke společenské odpovědnosti a udržitelnému rozvoji České republiky, popularizuje chemii, zvyšuje prestiž chemického sektoru v národním hospodářství a zlepšuje image chemie využíváním "dobré praxe" a uplatňováním zásad "Responsible Care".

Více informací na www.schp.cz

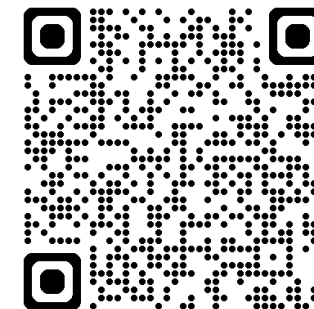
Česká technologická platforma PLASTY

ČTPP :

sdružení právnických osob s cílem podporovat rozvoj plastikářského a souvisejícího zpracovatelského průmyslu v České republice.

Hlavní zaměření aktuálního projektu Plasty V:

- Digitální a zelená transformace.
- Cirkulární ekonomika, chemická recyklace.
- Strategie plastů, SUP, PPWR.
- Marine littering , mikroplasty, ...



Aktuální výstup - Akční plán digitální a zelené transformace plastikářského průmyslu.

Více informací na www.tp-plasty.cz



**Spolufinancováno
Evropskou unií**



Plasty V projekt CZ.01.01.01/07/23_010/0001245 České technologické platformy PLASTY za podpory programu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a je spolufinancován Evropskou unií.

Obsah:

- Úvod do problému textilních odpadů
- Dostupné metody chemické recyklace
- Praktické příklady uplatnění jednotlivých typů technologií
- Souhrnné srovnání technologií chemické recyklace textilních odpadů
- Trendy , výzvy a budoucnost



Problematika textilních odpadů:

Narůstající objem odpadu:

- 92 milionů tun textilního odpadu ročně – ekvivalent 15 Cheopsových pyramid.
- Složení: 60 % syntetika (polyester, nylon), 30 % bavlna, 10 % směsi a přírodní vlákna.
- Trend: Růst o 4-5 % ročně díky fast fashion a spotřební kultuře

Malý objem recyklace:

- Pouze 1 % se recykluje do nových textilií (fiber-to-fiber)
- 12 % downcycling (nižší kvalita – hadry, izolační materiály)
- 87 % končí na skládkách nebo v spalovnách
- Problém mechanické recyklace - zkracování vláken, ztráta kvality po 2-3 cyklech
- Nároky na třídění a přípravu pro recyklaci



Problematika textilních odpadů:

Enviromentální dopady

- Textilní průmysl = 10 % globálních emisí (více než letectví a námořní doprava dohromady)
- 79 miliard m³ vody ročně pro výrobu nových textilií
- Syntetická vlákna uvolňují 0,5 milionu tun mikroplastů do oceánů ročně
- 200 000 tun barev a fixačních činidel ročně znečišťuje vodní toky

Potřeba zvyšování udržitelnosti v textilním průmyslu

- Omezení mechanické recyklace = není vhodná pro směsi, barvy, nečistoty
- Výhoda chemické polymerace = depolymerizace na monomery → 100 % kvalita původní
- Cíl EU: 30 % recyklovaných textilií do 2030 (Digital Product Passport)
- Náklady na odpady: \$500 miliard ročně globálně (zpracování, skládky, ztráta surovin)
- Ztracená hodnota: \$160 miliard v nerecyklovaných surovinách



Chemická recyklace = řešení ?



Výhody:

Kvalita: Umožňuje „fiber-to-fiber“ recyklaci bez ztráty vlastností (narozdíl od mechanické recyklace).

Flexibilita: Zpracování smíšených odpadů (např. polyester + bavlna) a odstraňování nečistot (barvy, aditiva).

Udržitelnost: Snížení emisí CO₂ o 50-70 % oproti výrobě z fosilních surovin.

EU regulace: Soulad s cíli pro 30 % recyklovaných textilií do 2030.



Omezení:

Předúprava surovin: vyšší nároky na třídění a separaci vstupních materiálů

Energetická náročnost: Vyšší spotřeba energie u termochemických metod (např. pyrolýza 500-800 °C).

Náklady: Vysoké kapitálové investice do technologií

Vývoj: Enzymatické metody jsou stále většinou ve fázi poloprovozního ověřování

Omezení surovin: Směsi s vysokým obsahem přírodních vláken mají specifické nároky na zpracování

Depolymerace a rozpouštění:

Rozklad textilních polymerů na molekulární úroveň (monomery nebo oligomery) pomocí chemických reakcí, popř. regenerace polymerní matrice po odstranění příměsí a barviv.

- Depolymerizace (např. hydrolyza, glykolýza, methanolýza) pro syntetická vlákna (PET, nylon).
- Rozpouštění (solventy jako N-methylmorpholin-N-oxid) pro separaci směsí.
- Enzymatická recyklace (biokatalyzátory, např. PETáza) pro ekologické zpracování.

Při recyklaci textilu často kombinace depolymerace a zvýšené teploty „Hydrotermální procesy“ někdy označované jako „hybridní technologie“

Výsledek:

- Monomery nebo čisté polymery vhodné pro výrobu nových vláken s kvalitou srovnatelnou s původními materiály.
- Výtěžnost 80-95 % v závislosti na metodě.



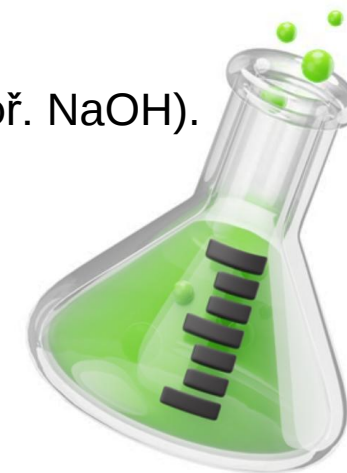
Depolymerace:

Chemický rozklad polymerů (např. PET, nylon) na monomery nebo oligomery, které lze znovu polymerizovat do nových vláken. Polyester (PET): Regenerované BHET/DMT se používá pro výrobu nových vláken, Nylon: Depolymerizace na kaprolaktam, použití v technických textiliích.

- Cílem je regenerace syntetických vláken (např. polyester, nylon) s kvalitou srovnatelnou s původními materiály.
- Metody umožňují uzavřený cyklus (fiber-to-fiber) bez ztráty mechanických vlastností.
- Snížení potřeby primárních surovin (ropa) o 60-80 %, úspora emisí CO₂ (~1,5 t CO₂/t recyklovaného PET).

1. Hydrolyza:

- rozklad PET vodou za vysoké teploty (200-250 °C) a tlaku (1-4 MPa), často s katalyzátorem (např. NaOH).
- **Výsledek:** Produkce kyseliny tereftalové (TPA) a ethylenglykolu (EG).
- **Výtěžnost:** ~90 % TPA, vhodné pro výrobu nového PET.
- **Výhody:** Jednoduchý proces, nízké ekologické dopady (pouze voda jako činidlo).
- Nevýhody: Energetická náročnost, pomalejší reakce.



Depolymerace:

2. Glykolýza:

- reakce PET s ethylenglykolem (EG) za přítomnosti katalyzátoru (např. acetát zinečnatý) při 180-240 °C.

Výsledek: Bis(2-hydroxyethyl) tereftalát (BHET), přímo použitelný pro novou polymerizaci.

Výtěžnost: ~95 %, nejvyšší mezi depolymerizačními metodami.

Výhody: Vysoká čistota BHET, široce používané v průmyslu (např. Reju).

Nevýhody: Vyšší náklady na katalyzátory a čištění.

3. Methanolýza:

- rozklad PET methanolem při 180-280 °C s katalyzátorem (např. acetát hořečnatý).

Výsledek: Dimethyl tereftalát (DMT) a ethylenglykol.

Výtěžnost: ~85-90 %, méně efektivní než glykolýza.

Výhody: Vhodné pro znečištěné odpady, DMT je stabilní pro skladování.

Nevýhody: Toxičtější činidlo (methanol), vyšší náklady na separaci.



Depolymerace - příklady:

IBM Research (VolCat proces)/Reju:

technologie IBM VolCat – glykolýza) pro PET odpady, produkující BHET pro nová vlákna; Regeneration Hub Zero (Frankfurt) zpracovává 10 000 tun/rok textilního PET, produkující „Reju Polyester“ s 50 % nižší uhlíkovou stopou než virgin polyester. Vlákná použita v tričkách a kalhotách Uniqlo a H&M (kolekce Conscious 2025).

Loop Industries (depolymerizace): Značka Twist™ pro polyesterové vlákna; partnerství s Inditex (Zara) na udržitelných džínsech a bundách

CARBIOS (enzymatická depolymerizace): Spolupráce s TOMRA Textiles; recyklované PET pro H&M a Decathlon (2025: 20 000 tun/rok pro sportovní textilie)

Circ (depolymerizace směsí PET /Nylon): Spolupráce s Levi's na recyklovaných džínsech

Evrru (NuCycl technologie): Regenerace směsí pro Nike (2025: tenisky z recyklovaného polyesteru a nylonu).

Syre (Katalytická depolymerizace): Depolymerizace PET a nylonu na monomery (kaprolaktam, BHET) s katalyzátory. Pilotní zařízení (USA, 2025) zpracovává 8 000 tun/rok, produkující vlákna pro Adidas (recyklované ponožky, tenisky) a Patagonia (technické bundy).



Rozpouštění

Nízká energetická náročnost, vysoká čistota výstupu (až 95 %), vhodné pro barvené/smíšené odpady.

Efektivní pro směsi (polyester + bavlna), odstraňuje barvy a nečistoty bez tepelného poškození.

Princip:

Solventy (např. N-methylmorpholin-N-oxid – NMMO pro celulózu; DBU/DMSO/CO₂ systémy pro bavlnu) selektivně rozpouštějí vlákna a následně se opět vysráží pro separaci.

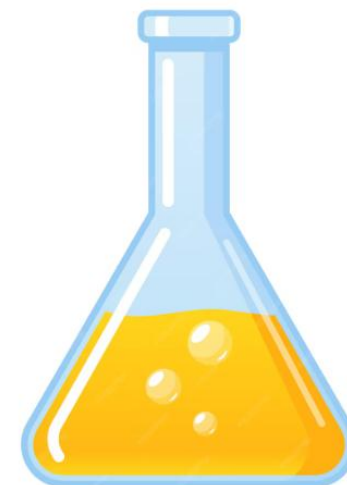
Výtěžnost:

95 %, s možností recyklace solventů (až 99 %).

Nevýhody:

Potřeba bezpečného zacházení s solventy, vyšší počáteční náklady na vybavení.

Zajímavost: „Přepínatelná rozpouštědla“ mění stav (rozpouštění → separace) podle CO₂ tlaku.



Rozpouštění - příklady:

Worn Again Technologies (solvent-based separace):

Pilotní továrna v UK; solventní separace (DBU/DMSO/CO₂) regenerující polyester a celulózu. Spolupráce s H&M na separaci polyesteru a bavlny ze směsí (zpracováno 5 000 tun, 99 % čistota; aplikace v recyklovaných tričkách a džínsech), Snížení spotřeby vody o 70 %, emise CO₂ o 60 %. Proces je uzavřený (closed-loop), s 99 % recyklací rozpouštědel, a umožňuje fiber-to-fiber recyklaci bez ztráty kvality.

Renewcell :

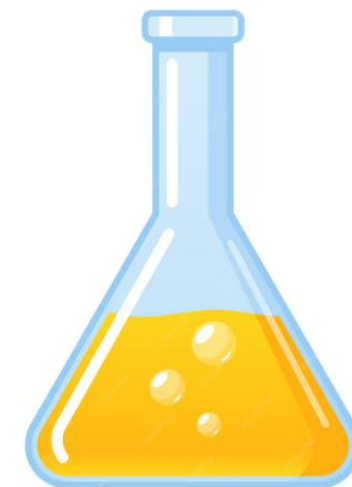
Regenerace celulózy z bavlněných odpadů do Circulose™ vláken; továrna v Sundsvall (Švédsko), produkující Circulose™ pro Stella McCartney (šaty) a Levi's (udržitelné džíny). 95 % výtěžnost celulózy. (20 000 tun/rok, použito v udržitelných džínsech a šatech).

Ambercycle:

Chemické rozpouštění pro polyesterové směsi; spolupráce s Adidas na sportovním oblečení (Cycora® , první komerční linie tenisek z 100 % recyklovaného polyesteru)

Yiqi Yangova technologie – Fiber-to-fiber:

Proces založený na selektivním rozpouštění a odbarvení, který zachovává chemickou strukturu vláken. Výtěžnost 90–95 %, rozpouštění syntetických (PET) vs. přírodních (celulóza) vláken; následná precipitace a extrakce pro čisté frakce. Výstup: Nová vlákna (např. PET z PET, celulóza pro viskózu) přímo použitelná v předení, s uzavřeným cyklem (recyklace chemikálií 98 %).



Enzymatická recyklace

Nízká energetická náročnost , vysoká čistota výstupu (80-90 %), vhodné pro barvené/smíšené odpady.

Biologicky odbouratelná činidla, minimální emise, vhodné i pro barevné textilie .

Princip:

Enzymy (např. celulázy pro bavlnu, PETáza/LCC pro polyester) hydrolyzují vazby v polymerech za mírných podmínek, umožňujíc separaci a regeneraci.

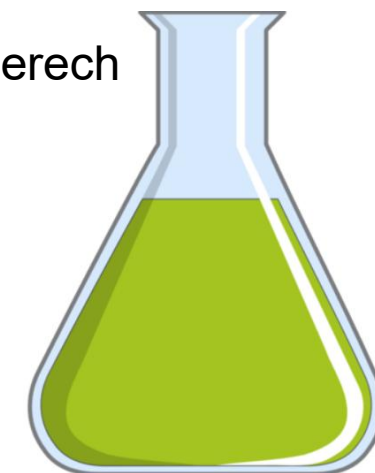
Výtěžnost:

80-90 %, s nižšími teplotami (šetří 70 % energie oproti chemickým metodám).

Nevýhody:

Pomalejší reakce (vyžaduje předúpravu pro krystalinitu), stále ve fázi poloprovozu.

Zajímavost: ověřování na separaci i pro směsné tkaniny vlna/PET/elastan



Enzymatická recyklace – příklady:

CARBIOS (enzymatická separace):

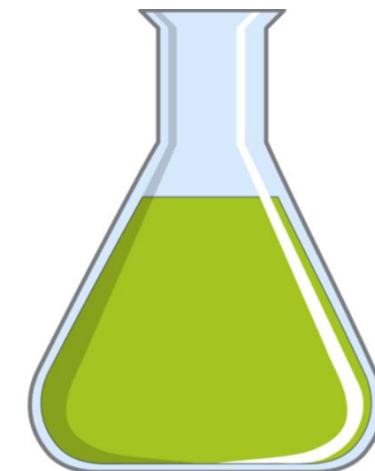
továrna v Clermont-Ferrand; PETáza enzymy pro rozklad PET na TPA a EG při 60 °C, s 80 % úsporou energie oproti termochemickým metodám, spolupráce s Decathlon a H&M na recyklaci PET z textilních odpadů (20 000 tun/rok, regenerované vlákna pro sportovní oblečení; snížení emisí o 80 %).

Egan et al. proces (enzymatická separace):

Laboratorní jednotka pro separaci cut fabrics do fiber fractions; aplikováno v průmyslových pilotech pro vlna /PET směsi (integrace do EU projektů, výtěžnost 85 % pro polyester).

Boschmeier et al. (enzymatická + chemická):

Rakouský výzkum; separace vlna / PET / elastan do čistého PET , aplikace v recyklaci technických textilií pro automotive sektor).



Termochemická recyklace (pyrolýza, gasifikace):

Zpracování komplexních směsí (např. PET/bavlna, polyester/elastan), které nelze efektivně recyklovat mechanicky nebo chemicky na suroviny (např. oleje, plyn, uhlík / struska).

Výhody: Vysoká flexibilita, zpracování znečištěných odpadů, produkce široké škály surovin (např. pro chemický průmysl).

Pyrolýza:

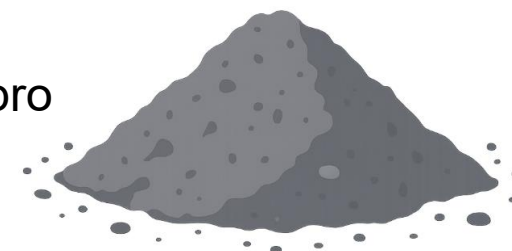
- Tepelný rozklad bez kyslíku → výroba olejů a uhlovodíků.
- Katalytické procesy (např. zeolity, nižší teploty)

Gasifikace:

- Přeměna na syntézní plyn (syngas, $\text{CO} + \text{H}_2$) pro chemickou syntézu.

Výsledek:

- Suroviny pro nové polymery nebo chemické produkty, méně vhodné pro přímou výrobu vláken.



Pyrolýza

Vysokoteplotní chemické procesy pro přeměnu smíšených textilních odpadů na suroviny (oleje, plyny, uhlíky) bez potřeby předběžné separace.

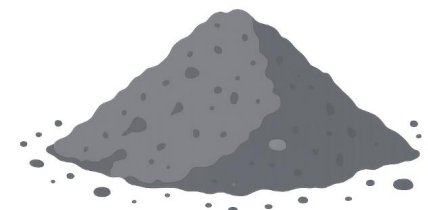
Nevýhody: Energetická náročnost, většina výstupů pro jiné sektory než textil.

- tepelný rozklad bez kyslíku (400-700 °C) za vzniku pyrolytického oleje, plynů a uhlíku (biochar) pro průmyslové aplikace (např. filtry).

Výtěžnost: 60-80 % oleje, 10-20 % plynů, 10-20 % uhlíkový zbytek.

Výhody: Vhodná pro směsi s vysokým obsahem syntetik (polyester, nylon); odolná vůči nečistotám.

Nevýhody: Vyšší emise CO₂ (0,8-1,2 t/t odpadu), výstupy pro textil pouze nepřímé.



Pyrolýza - příklady

Eastman Chemical:

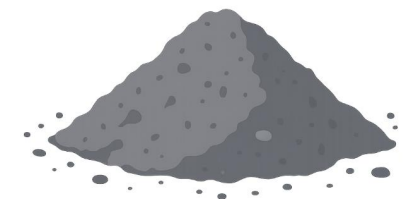
Katalytická pyrolýza PET na pyrolytické oleje, přeměna na nové polymery. Pilotní továrna v Tennessee zpracovává 15 000 tun/rok textilního odpadu. Partnerství s Patagonia pro recyklované bundy a Under Armour pro sportovní textilie.

NexGen Fibers:

Pilotní zařízení v USA pro pyrolýzu smíšených textilních odpadů; partnerství s Under Armour (recyklované suroviny pro sportovní textilie, 10 000 tun/rok; olej použit pro nový polyester).

Recyclamine (Evonik):

Pyrolýza nylonových odpadů; aplikace v technických textiliích pro automotive průmysl (5 000 tun/rok, kaprolaktam pro nylon 6).



Termochemická recyklace

2. Gasifikace

Částečná oxidace při 700-800 °C s omezeným kyslíkem popř. rozklad pomocí plasmy (1100-1400°C) za vzniku syntézního plynu (syngas: $\text{CO} + \text{H}_2$).

Výsledek: Syngas pro chemickou syntézu (např. methanol, nové polymery); popel jako vedlejší produkt (v případě plasmy vitrifikátu – strusky).

Výtěžnost: 70-85 % syngas, 5-10 % popel/struska.

Výhody: Vysoká energetická efektivita (syngas lze spalovat pro energetické využití); možnost zpracování smíšených odpadů, v případě vitirifikátu další inertní produkt.

Nevýhody: Vyžaduje přísné čištění plynů, výstupy pro textil pouze nepřímé a jejich využití vyžaduje značné náklady do technologie.



Gasifikace – příklady:

Enerkem:

Kanada, gasifikace textilních odpadů na syngas; spolupráce s chemickým průmyslem pro výrobu methanolu (zpracováno 12 000 tun/rok; syngas pro nové chemické suroviny, nepřímá podpora textilního průmyslu).

LanzaTech:

Gasifikace smíšených odpadů (včetně textilií) na syngas, přeměna na ethanol; partnerství s Lululemon (pilotní projekt pro výrobu recyklovaných polyesterových vláken z ethanolu, 8 000 tun/rok).

Sierra Energy (FastOx gasifikace):

Zpracování smíšených odpadů včetně textilií; aplikace v průmyslových polymerech (2025: 7 000 tun/rok, syngas pro chemické suroviny používané v textilních povlacích).



Srovnání metod chemické recyklace textilu

Metoda	Výtěžnost (%)	Náklady (relativní)	Ekologický dopad (klíčové metrika)	Teplota (°C)	Tech. zralost (2025)	Příklady vláken
Hydrolyza	90-95	Střední (katalyzátory, voda)	Nízký (odpadní voda; -50 % CO ₂ vs. primární plast)	200-250	Průmyslová (piloty v EU)	PET, PET/bavlna směsi, Nylon
Glykolýza	93-95	Vysoké (katalyzátory, čištění)	Střední (recyklace solventů, -70 % energie s mikrovlnami)	180-240	Průmyslová (továrny jako Reju)	Polyester, PET/bavlna
Methanolýza	85-90	Vysoké (tlak, separace)	Střední (toxický methanol, ale -50 % CO ₂ -eq vs. konvenční)	180-280	Pilotní (superkritické fáze)	PET, PET/bavlna směsi, viskóza
Enzymatická	80-90	Nízké (biokatalyzátory)	Velmi nízký (mírné podmínky, biologicky odbouratelné; -80 % emisí)	30-70	Poloprovozní (piloty CARBIOS)	PET, bavlna, směsi

Srovnání metod chemické recyklace textilu

Metoda	Výtěžnost (%)	Náklady (relativní)	Ekologický dopad (klíčové metrika)	Teplota (°C)	Tech. zralost (2025)	Příklady vláken
Pyrolýza	60-80 (oleje)	Vysoké (energie)	Střední (emise plynů, ale redukce odpadu; katalytické varianty nižší)	400-700	Poloprovozní (Eastmann, NexGen)	Směsi, PET koberce
Gasifikace	70-85 (syngas)	Vysoké (čištění plynů)	Střední (vysoká teplota, ale energetická efektivita; -30 % GHG s katalyzátory)	700-800 (1100-1400 plasma)	Průmyslová (Enerkem, Lanzatech)	Smíšené odpady, nylon/PET

Trendy - chemická recyklace textilu

Obecné trendy :

- Podle aktuálních dat se očekává nárůst trhu chemické recyklace textilu o 12% 2032
- V EU se očekává zásadní nárůst díky cílům pro recyklace textilu (30 % recyklovaných textilií do 2030). EU fondy podporují scale-up (např. Horizon Europe).

Nové Technologie:

- Kombinace chemických a enzymatických metod (např. glykolýza + PETáza) pro zvýšení výtěžnosti (až 98 %) a snížení emisí CO₂ o 50-80 %.
- Využití AI k optimalizaci katalyzátorů a reakčních podmínek.
- Automatizované třídění odpadů, využití AI a NIR.
- Rozšíření na nové materiály (vývoj chemické recyklace pro nylon, elastan a biobased vlákna (např. PLA).
- Biotechnologie a zelené chemikálie (vývoj nových enzymů a zelených solventů (např. Cyrene) pro snížení toxických odpadů a energetické náročnosti.

Globální partnerství:

- Značky (např. Inditex, Nike) uzavírají dlouhodobé smlouvy s recyklátory pro zajištění dodávek regenerovaných vláken.



Výzvy - chemická recyklace textilu

Vysoké náklady na recyklaci:

- Počáteční investice do zařízení (např. 10–50 mil. EUR na továrnu) a předúprava odpadů (třídění, odstranění barev, aditiv) zvyšují cenu o 30–50 % oproti virgin materiálům.

Složitost smíšených odpadů:

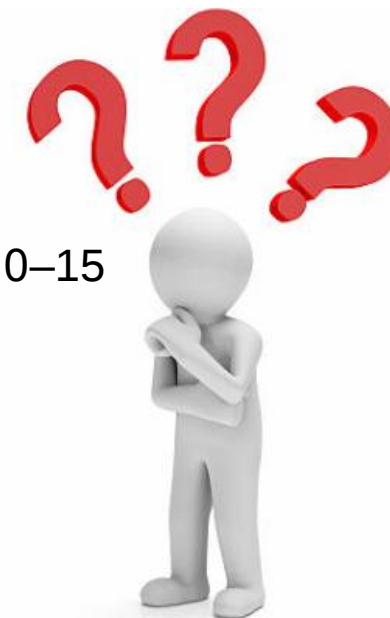
- Směsi (např. PET/elastan) vyžadují vícestupňové procesy, což snižuje výtěžnost (např. o 10–15 % u pyrolýzy).

Logistika sběru:

- Nároky na sběrný a třídící systém, dostupnost vstupních materiálů v dostatečné kvalitě.

Regulační a standardizační bariéry:

- Chybí globální standardy pro kvalitu recyklovaných vláken a certifikace
- EU Textile Strategy vyžaduje 30 % recyklovaných textilií do 2030, s povinným sběrem odpadů a EPR (Extended Producer Responsibility).



Budoucnost a chemická recyklace textilu ??

Bio-based fibers a PFAS-free chemie:

- Přejít k biodegradabilním polymerům a chemikáliím bez per- a polyfluoralkylových látek (PFAS), které znečišťují vodní zdroje. Inovace zahrnují bio-based polyester (z rostlinných surovin) a PFAS-free barvy/finishing pro textilie, snižující environmentální dopad o 70 %.

Closed-loop manufacturing a snížení spotřeby vody:

- Uzavřené systémy, kde textilní odpad se recykluje přímo v továrně, integrovány s waterless dyeing (např. CO₂-based nebo plasma technologie) pro snížení vodní spotřeby o 90 %. To umožňuje on-site recyklaci, minimalizující logistiku.

Masové nasazení enzymatických procesů:

- Enzymatické depolymerizace (např. PETáza, LCC) se škálují pro masovou výrobu, s reakcemi při nízkých teplotách (30-70 °C), snižující energii o 80 %. Hybridy s chemickými metodami zvyšují výtěžnost na 95 %.



Děkuji za pozornost.



Ing. R.Pjatkan
Svaz chemického průmyslu ČR, z.s.
e-mail: radek.pjatkan@schpcr.cz
www: <http://www.schp.cz>, <http://www.tp-plasty.cz>