

univnet



Univerzitná a priemyselná výskumno-edukačná platforma recyklujúcej spoločnosti

Konferencia ODPADOVÉ FÓRUM 2026

www.univnet.sk



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



TECHNICKÁ UNIVERZITA
V KOŠICIACH



Fakulta materiálov,
metalurgie a recyklácie



Strojnícka
fakulta



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE



Energetické zhodnocovanie textílií automobilových interiérov pomocou pyrolýzy

Ing. Marek PATSCH, PhD.

Ing. Peter PILÁT, PhD.

prof. Ing. Jozef JANDAČKA, PhD.



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

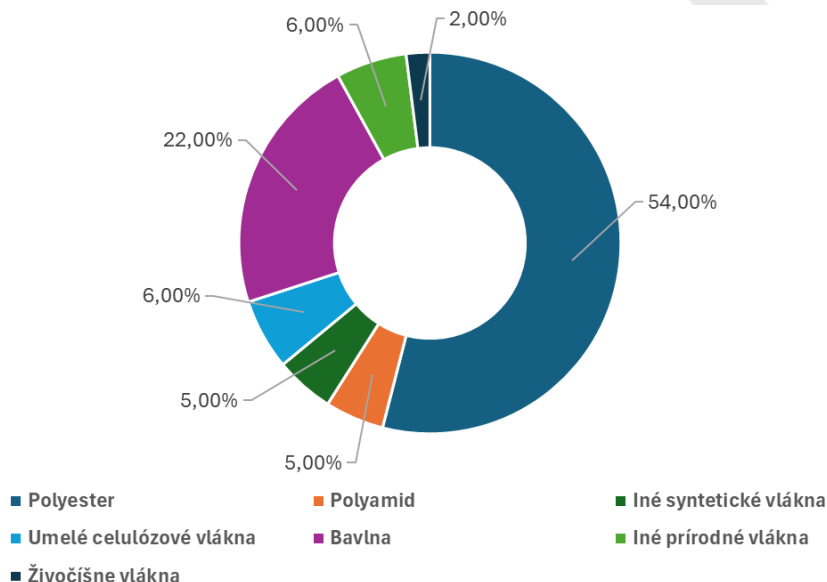
**Strojnícka
fakulta**

Prečo?

- **Výroba nových automobilov** produkuje veľké množstvo textilného odpadu zo syntetických a prírodných textílií vo forme nepodarkov, odrezkov a pod.
- **Zneškodňovanie vyradených automobilov** po dobe životnosti je takisto veľkým zdrojom textilného odpadu podobného zloženia, len s tým rozdielom, že textil je častokrát znečistený, degradovaný slnečným žiarením a teplom, prípadne so zvýšeným obsahom vlhkosti (záleží od uskladnenia a spracovania autovrakov).
- **Komunálny odpad** je taktiež veľkým zdrojom textilného odpadu, od roku 2025 majú členské štáty EÚ povinnosť zaviesť separovaný zber textilu, takže porastie objem tokov, ktoré nebude možné zmysluplne materiálovo zhodnotiť (najmä zmesi, poškodené a silne znečistené kusy).

Technický textil v automobiloch

- Energetické zhodnocovanie textilného odpadu býva problematické hlavne pre variabilitu zloženia (vlákna + farbivá + apretúry + potlače + prímеси) a pre halogény a kovy, ktoré vplývajú na produkciu HCl/HF, koróziu a na väzbu kovov na jemné frakcie popola.



Technický textil v automobiloch

- V automobiloch sa textílie vyskytujú v zásade v 3 formách:
 - tkaniny,
 - pleteniny
 - a najmä netkané textílie (filce, ihlovo vpichované rohože, akustické vrstvy).
- Materiálovo dominujú **polyester** (PET), **polyamidy** (nylon 6/6,6) a **polypropylén** (PP), lokálne aj rayon, aramid, sklené vlákna a prírodné vlákna v rohožiach.
- Z pohľadu aplikácie v automobile:
 - **Bezpečnostné textílie:**
 - **Airbagy:** husté tkaniny najčastejšie z nylonu 6,6, prípadne aj nylon 6 alebo polyester, často poťahované pre nízku priepustnosť plynov.
 - **Bezpečnostné pásy:** tkané popruhy zo špeciálnych vysokopevných polyesterových (PET) priadzí.

Technický textil v automobiloch

- **Interiér** – komfortné a dekoračné vrstvy:
 - **Potahy sedadiel a čalúnenie:** tkaniny alebo pleteniny (často polyesterové alebo zmesové), veľmi často s povrchovými úpravami a zátermi (napr. PVC/PU systémy kvôli oderu, čisteniu, horľavosti).
 - **Stropnica, A/B/C stípičky:** typicky polyesterové rohože v lamináte s polyuretánovou penou a ďalšími vrstvami (adhesive “low-melt” vlákna, fólie).
 - **Akustické a tepelné izolácie** v kabíne a kufri: prevažne netkané textílie (polyester, PP) a podľa aplikácie aj zmesi so skleneným vláknom.
- **Podlaha, kufor, podbehy** – veľké objemy netkaných textílií: koberce, podlahové krytiny, kufrové výplne, podbehové filce: často ihlovo vpichované netkané textílie z PP/PET (a v niektorých systémoch aj nylonové vlákna), zvyčajne viacvrstvové (vlákna + pojivo/latex/pena + backing).
- **Textílie mimo interiéru** – výstuže a technické tkaniny: kordy v pneumatikách (tire cords): výstužné textílie z polyesteru (PET), nylonu, rayonu a aramidu (plus väzby/adhézne systémy na spojenie s gumou).
- **Prírodné vlákna v autách** (najmä ako rohože/kompozitné nosiče, nie “odevné” textílie): v niektorých dieloch interiéru (akustické výplne, nosné rohože pre panely) sa používajú kenaf/juta/ľan/bavlna ako zložka netkaných rohoží alebo hybridných vrstiev s PP/PET.

Energetické zhodnocovanie textilu

- Mnohé textílie (najmä syntetické vlákna) majú výhrevnosť rádovo desiatky MJ.kg^{-1} (niektoré okolo 20 MJ.kg^{-1} pri nízkych emisiách Cl (pod $0,9 \mu\text{g}_{\text{Hg}}.\text{MJ}^{-1}$) a Hg (pod 0,2 %))
- Možnosti energetického zhodnocovania:
 - **Spaľovanie a spoluspaľovanie** (ZEVO – Waste to Energy, teplárne, cementárne), výroba TAP – tuhého alternatívneho paliva:
 - **RDF** (Refuse Derived Fuel) – najmä komunálne odpady, menej intenzívny proces spracovania, nižšia výhrevnosť (cca $8\text{-}12 \text{ MJ.kg}^{-1}$), vyššia vlhkosť (20-30 %)
 - **SRF** (Solid Recovered Fuel) – najmä priemyselné odpady, prísna separácia, sušenie a čistenie, odstránenie nehorľavých látok (sklo, kovy), vyššia a stabilná výhrevnosť (cca $12\text{-}20 \text{ MJ.kg}^{-1}$), nízka vlhkosť (častokrát pod 15 %)
 - **Splyňovanie** – experimentálne štúdie
 - **Pyrolýza** – typicky sa riešia problematiky výťažnosti pyrolýzneho oleja, plynu a tuhého zvyšku, vplyv zmesi vlákien a aditív na rozdelenie výťažnosti pyrolýznych produktov.

Zloženie textilného odpadu a jeho vlastnosti

- Pri výskume energetického zhodnocovania odpadových textílií je nutné vykonať prvotnú **palivovú charakterizáciu** po jednotlivých frakciách, ktoré tvoria odpad.
- Okrem bežných **chemických rozborov** (prchavá a neprchavá horľavina, balast, obsah hlavných prvkov dôležitých pre energetiku – C, H₂, S, N₂, O₂) a **energetických rozborov** (výhrevnosť a spalné teplo, vlhkosť) je nutné zamerať sa aj na obsah ďalších chemických prvkov, ako napríklad chlór, ortuť, bróm a iné vybrané kovy.
- Najväčším rizikom pri energetickom zhodnocovaní textílií je jeho chemické zloženie, ani nie tak hlavnej zložky (napríklad polyester, bavlna a pod.) ale najmä prítomnosť prímiesí (farbivá obsahujú celý rad kovov, v textile sa využívajú spomaľovače horenia a chemické stabilizátory).
 - **Kovy** v textíliách sa neničia spaľovaním; časť sa môže preniesť do plynnej fázy a následne kondenzovať alebo adsorbovať na jemné častice
 - Textílie s **brómovanými** alebo **chlórovanými** spomaľovačmi horenia zvyšujú pri nevhodných podmienkach riziko tvorby brómovaných a zmiešaných dioxínov alebo furánov

Zloženie textilného odpadu a jeho vlastnosti

Charakteristika vstupných materiálov pre energetické zhodnocovanie textilného odpadu

	Vlhkosť [%]	Popolnatosť [%]	Prchavé látky [%]	C [%]	H [%]	S [%]	Cl [%]	Výhrevnosť [MJ.kg ⁻¹]
Polyester	1,2	0,4	89,06	63,0	5,06	0,04	0,044	21,905
Bavlna	3,9	1,3	82,07	42,5	7,61	0,03	0,03	14,809

Obsah vybraných chemických prvkov v textilnom odpade

	Hg	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Ti	V	Zn
	[μg.kg ⁻¹]	[mg.kg ⁻¹]											
Polyester	17	< 1,0	< 0,06	0,621	1,45	7,60	1,26	1,58	2,99	156	< 1,0	< 0,50	12,2
Bavlna	4,0	< 1,0	< 0,06	< 0,10	0,94	4,42	4,01	1,22	3,00	< 1,5	< 1,0	< 0,50	9,54

Pyrolýza textilného odpadu

- **Pyrolýza na palivové frakcie** (pyrolýzny olej a plyn) – „robustný“ režim, vhodný pre priemyselné spracovanie veľkého množstva rôznorodých textilných odpadov, ale kvalita výstupného pyrolýzneho oleja kolíše. Typické podmienky: pracovná teplota 400–600 °C, inertná atmosféra reaktora (najčastejšie N₂), čas zdržania v pracovnom priestore podľa typu pyrolýzneho reaktora (využívajú sa reaktory závitkové, rotačné pece alebo fluidné lôžka).
- **Pyrolýza ako spôsob chemického zhodnocovania** – vysoká selektivita, čisté prúdy odpadu bez prímiesí
 - PET → kyselina benzoová alebo aromáty
 - Polyamid 6 → monoméry (ε-kaprolaktám)
 - Katalytická pyrolýza (HZSM-5, Ga/ZSM-5, Ga/Ni/ZSM-5, Ga/Co/ZSM-5 a Ga/Cu/ZSM-5)
- **Pyrolýza zameraná na tuhý zvyšok** – „uhlie“ alebo „biouhlie“ a jeho následná aktivácia – tento prístup je vhodný najmä pre celulózové textílie. Pre textílie typu bavlna alebo viskóza je orientácia pyrolýzy týmto smerom častokrát výhodnejšia než zameranie sa na pyrolýzny olej, ktorý je silne oxidovaný.

Riziká spojené s pyrolýznym spracovaním textilu

- **Triedenie odpadu a „neviditeľné“ aditíva** – najväčšia procesná neistota sú v textile obsiahnuté spomaľovače horenia, farbivá a povrchové úpravy → vznik dioxínov, furánov a ich prekursorov (napríklad termický rozklad automobilových kobercov vedie k vzniku CO, kyanovodíka, acetylénu, metán, amoniaku,... čo sú život ohrozujúce látky)
- **Zmesi textilného odpadu**, napríklad bavlna/polyester sa nesprávajú ako lineárny súčet, čo v podstate znamená, že na reálnych textiloch, odevoch a zmesiach sa pozoruje, že zloženie produktov a priebeh rozkladu je rozdielny oproti čistým vláknam.
- **Technické riziká pre pyrolýzu textilu:**
 - **Variabilita zloženia textilného odpadu** (vlákno + farbivá + apretúry + elastan + potlače) má vplyv na nestabilné zloženie pyrolýzneho oleja.
 - **Halogény** (Cl, Br,...) a niektoré pridané aditíva spôsobujú koróziu a toxické vedľajšie produkty pyrolýzy.
 - **N-vlákna** (napr. akryl/PAN, polyamidy) spôsobujú vznik HCN, NH₃, ktoré sú toxické a kladú požiadavky na dodatočné čistenie pyrolýzneho plynu. Vznik HCN je pri pyrolýze nitrilových a podobných materiálov bežne pozorovaný.

Návrh postupu pyrolýzneho spracovania textilu

1. Klasifikácia vstupnej suroviny podľa typu vlákna (bavlna, viskóza, polyester, PA6, PAN, akryl a ich zmesi), je potrebné zamerať sa aj na obsah prvkov ako chlór, bróm, dusík, síra, kovy a pod.
2. TGA alebo DTG analýza spolu s isokonverznými kinetikami pre rýchly náhľad na teplotné okná optimálne pre pyrolýzu.
3. Py-GC alebo MS metóda na mapovanie výstupných produktov (hlavne pri spracovaní polyesteru a PA6, kde je možné zacieliť proces pyrolýzneho spracovania na konkrétne hodnotné chemikálie.
4. Pri konečnom pyrolýznom plyne by mali byť sledované koncentrácie minimálne týchto jeho zložiek: CO, CO₂, H₂, CH₄/C₂+, a pri N-textíliách povinne HCN/NH₃.
5. Ak z predchádzajúcich analýz vyšla potreba riešiť vznikajúce halogény alebo FR je nutné od začiatku procesu myslieť na čistenie a neutralizáciu plynu (neutralizácia kyslých plynov + sorpcia organohalogénov).

Návrh postupu pyrolýzneho spracovania textilu

- Ak je riešený len **textilný odpad z automobilového priemyslu**, kľúčové je najskôr rozlíšiť, z akého miesta v reťazci priemyselnej výroby odpad pochádza, pretože to určuje, či pyrolýza môže byť chemicky cieleňá na konkrétny chemický produkt (monoméry, chemikálie,...), alebo skôr robustná – zameraná na spracovanie rôznorodého odpadu pri zameraní sa na produkciu pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku s dôrazom na ďalšie spracovanie – čistenie a neutralizáciu.
- Ak je pyrolýza zameraná na **odpad vznikajúci pri výrobe** (výseky, odrezky,...) → poznáme jeho materiálové zloženie, odpad je podstatne homogénnejší. Vtedy dáva zmysel frakcionovať odpad podľa konkrétneho polyméru a pre každý zvoliť inú pyrolýznu alebo termochemickú stratégiu. Niektoré odpady z výroby sú už vo svojej podstate zmesi (automobilové koberce,...)
- Ak je pyrolýza zameraná na spracovanie **odpadu z vyradených automobilov**, častokrát sa jedná o heterogénnu zmes s nejasným chemickým zložením a zastúpením jednotlivých zložiek, označovaná tiež ako **ASR – automotive shredder residue**. ASR tvorí typicky 15–25 % hmotnosti vozidla po odstránení kvapalín, demontáži a separácii kovov; je to zmes plastov, gummy, pienu, textílií a anorganiky.

Typické zloženie a vlastnosti ASR – hlavné a vedľajšie prvky

% hm. suchý stav	[16]	[31]	[27]	[20]	[18]	[3] [28]	[20]	[5]	[20] [21]	[31]
C		50,8	56,6	17,5	60,2	32,8-45,1	44,5	30,0		39,7
H		6,5	7,9	2,1	6,6	4,1-6,1	5,3	3,7		4,6
N	0,9	3,0	2,7	0,5	1,7	0,6-3,1	4,5	1,7		0,92
O (diff)			21,4	17,4	7,8		6,9	7,0		11,8
S	0,6	0,3	0,2	0,25		0,2-1,0	0,2	0,3		0,25
Cl	1,8	3,7		0,05	2,5	0,1-3,4	0,5	1,4	0,5-2,0	
Al	2,0					0,74-10,5			0,7-3,0	
Ba	0,58	0,5								0,0012
Ca	4,0									
Cu	1,1	1,6				0,5-7,1	1,2		0,37-2,6	
Fe	14,1					0,9-15,7	25,7	13,0	3,3-18	
K	0,27									
Mg	0,87								0,05-0,8	
Mn	0,10								0,036-0,11	
Na	0,71									
P							0,7			
Pb	0,51	0,14				0,22-0,65	0,2		0,11-1,1	0,01
Si	7,70						2,1	9,5		
Ti							0,9			
Zn	0,90	1,2				0,8-6,1	1,9			

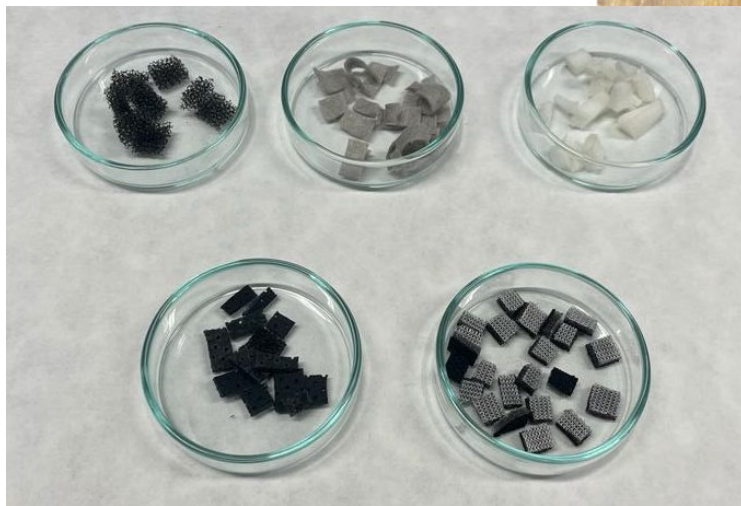
mg/kg	[15]	[26] [3]	[20]	[18] [19]	[30]	[29]	[3]
As				20-50	57-63	11	< 2
Ag						< 6	
Br							< 20-90
Cd	61	50-80		< 85	14-200	160	< 0,4-3
Co				< 33			< 1
Cr	1200	50-660	800	1000-1800	247-770	280	8-39
F			500				< 30
Hg	2,1			< 4,9	0,7-15	1,6	< 0,1
Ni	1200	130-930		400-1500			4-24
Sb				180-3200			< 3-43
Se						5,8	
Sn	67			130-400			123-220
V				< 150			< 1-1

Typické zloženie a vlastnosti ASR – ďalšie vlastnosti

	[26]	[17]	[21]	[4] [27]	[19] [20]	[31]	[30]	[16] [17]	[3]
Vlhkosť (% hm.)	1,3	0,8	2,2		2-5		27,3		0,25-3,6
Prchavé látky (% hm. s.)	74,4	61,3	54,2				52,4		
Popol (% hm. s.)	12,1	0,8	36,2		28-61		43,2		
PCBs (mg/kg)						1,7-320		5-14	< 50
PAHs (mg/kg)								10-36	
PCDD/F (µg/kg)								0,014	
Výhrevnosť (MJ/kg)			16,7					7-26	
Spalné teplo (MJ/kg)	28,3	28,7			9-20		18,2		25,3-26
Hustota (kg/m ³)			359	283-563			380		

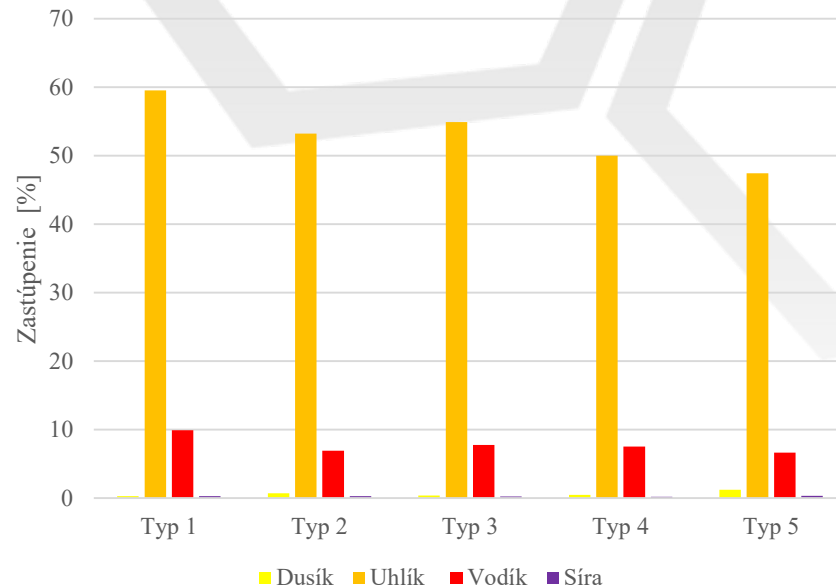
Pyrolýzne spracovanie - vstupná analýza

- Textilné potažhy
- peny
- plasty



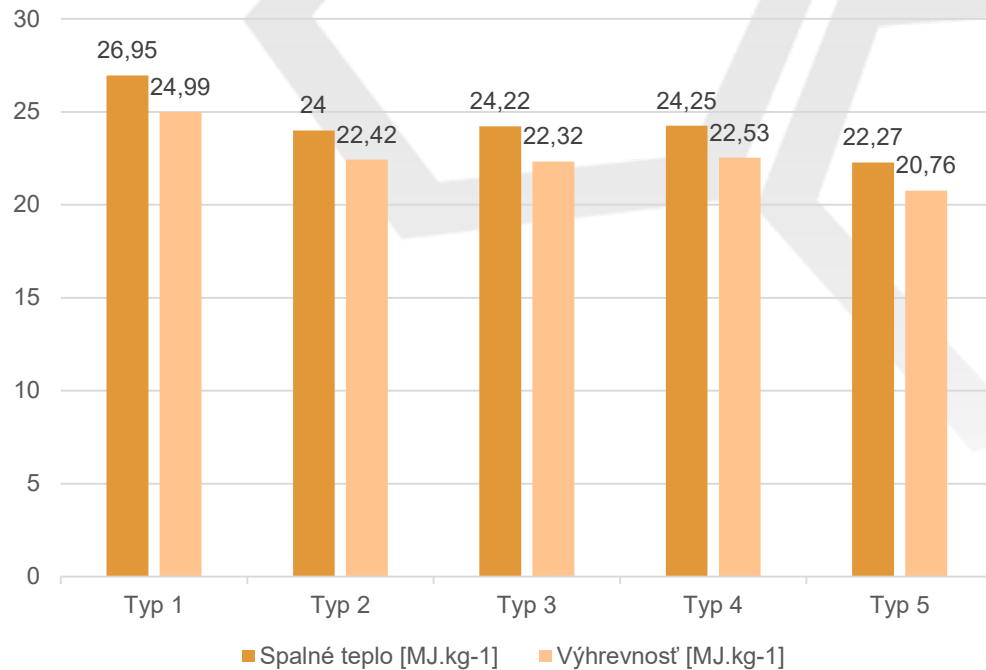
CHNS analýza

Vzorka	Dusík [%]	Uhlík [%]	Vodík [%]	Síra [%]
Typ 1	0,30	59,55	9,92	0,30
Typ 2	0,71	53,23	6,93	0,28
Typ 3	0,38	54,92	7,79	0,24
Typ 4	0,50	50,01	7,55	0,22
Typ 5	1,25	47,46	6,66	0,36

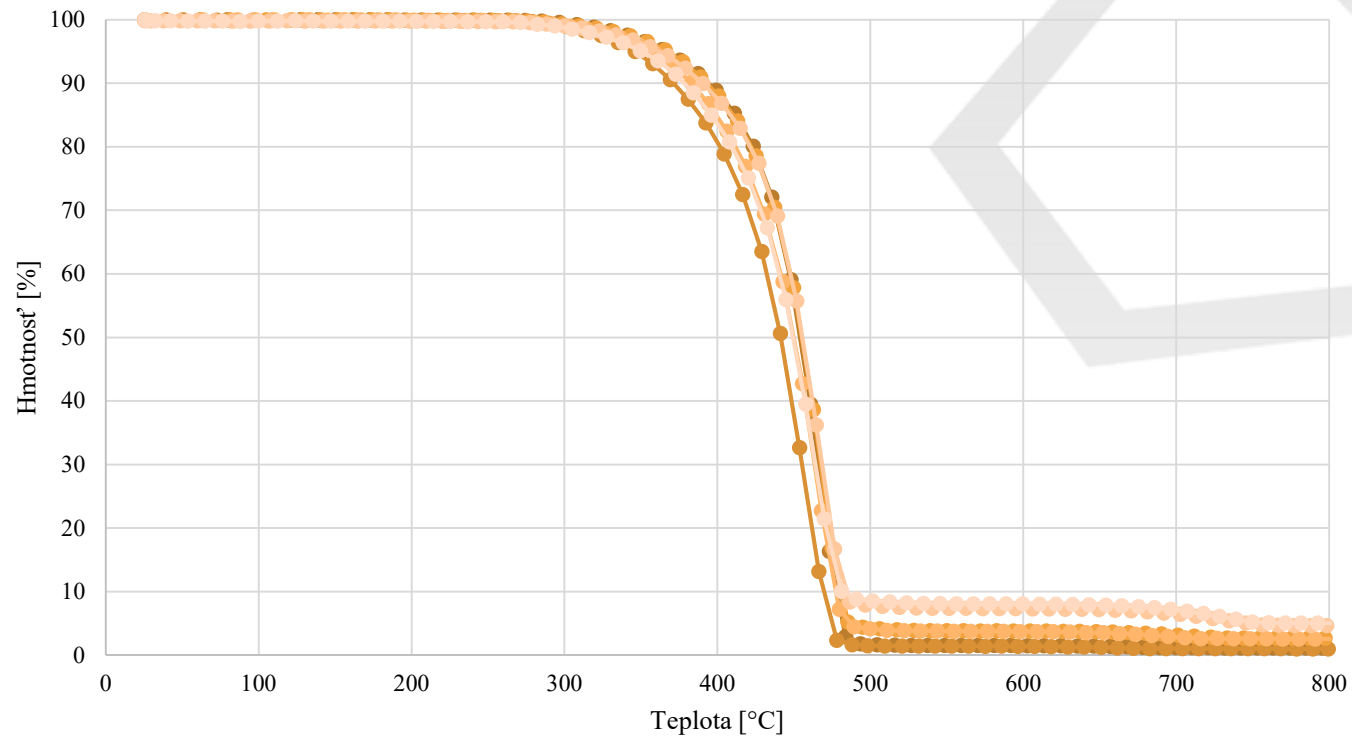


Výhrevnosť a spalné teplo vzoriek

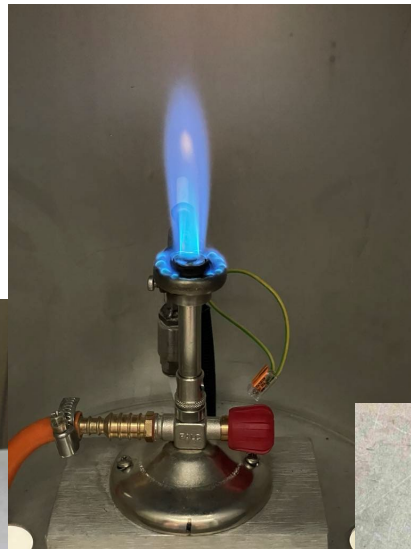
Vzorka	Spalné teplo [MJ.kg ⁻¹]	Výhrevnosť [MJ.kg ⁻¹]
Typ 1	26,95	24,99
Typ 2	24,00	22,42
Typ 3	24,22	22,32
Typ 4	24,25	22,53
Typ 5	22,27	20,76



TGA analýza

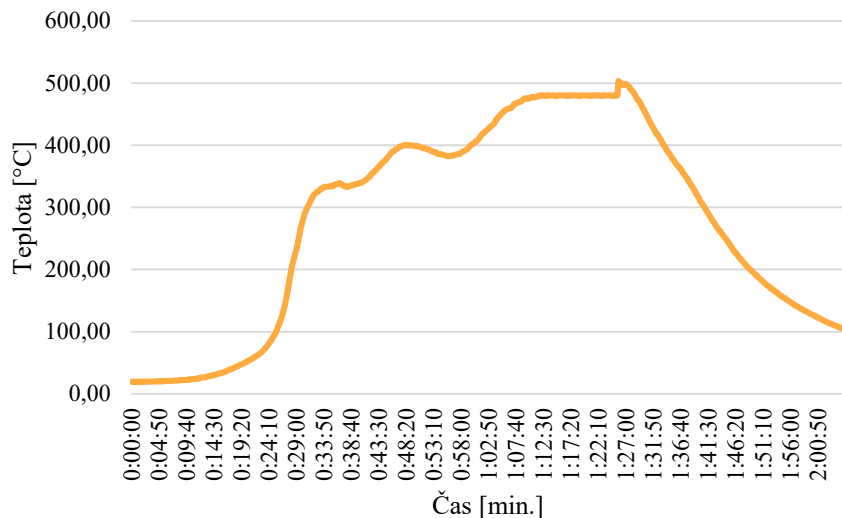


Pyrolýza automobilových pot'ahov



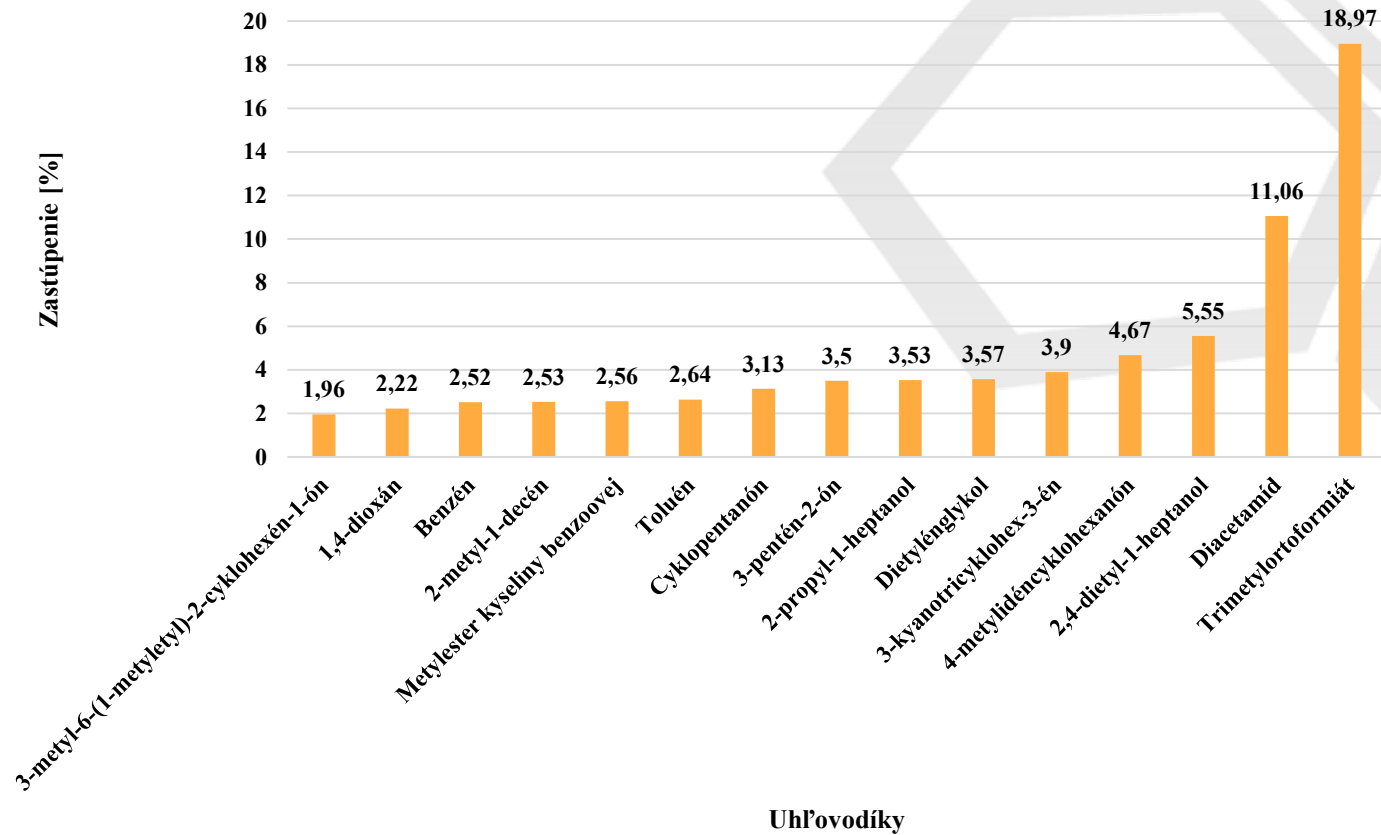
Pyrolýza automobilových pot'ahov

- Podľa analýzy TGA kriviek sme stanovili pyrolýznu teplotu na **485 °C** a čas zotrvania po dosiahnutí pyrolýznej teploty 15 min.
- Gravimetrickou metódou boli určené množstvá pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku, produkcia pyrolýzneho plynu bola dopočítaná do celkovej hmotnosti vsádzky

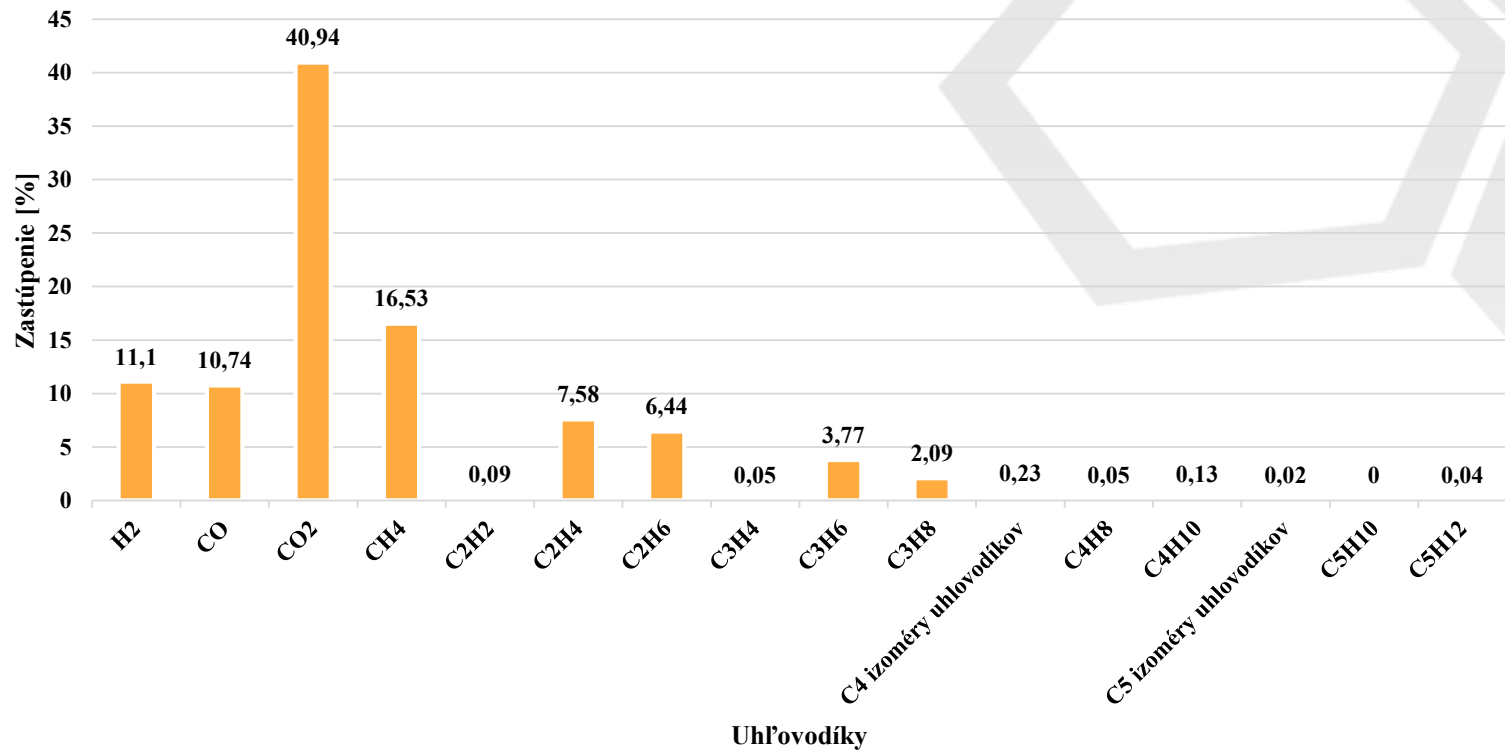


Meranie	1.	2.
Hmotnosť vsádzky	262,9 g	293,9 g
Tuhý zvyšok	48,8 g	54,5 g
Pyrolýzny olej	20,2 g	71,7 g
Pyrolýzny plyn	193,9 g	167,7 g
Čas merania	15 min	15 min

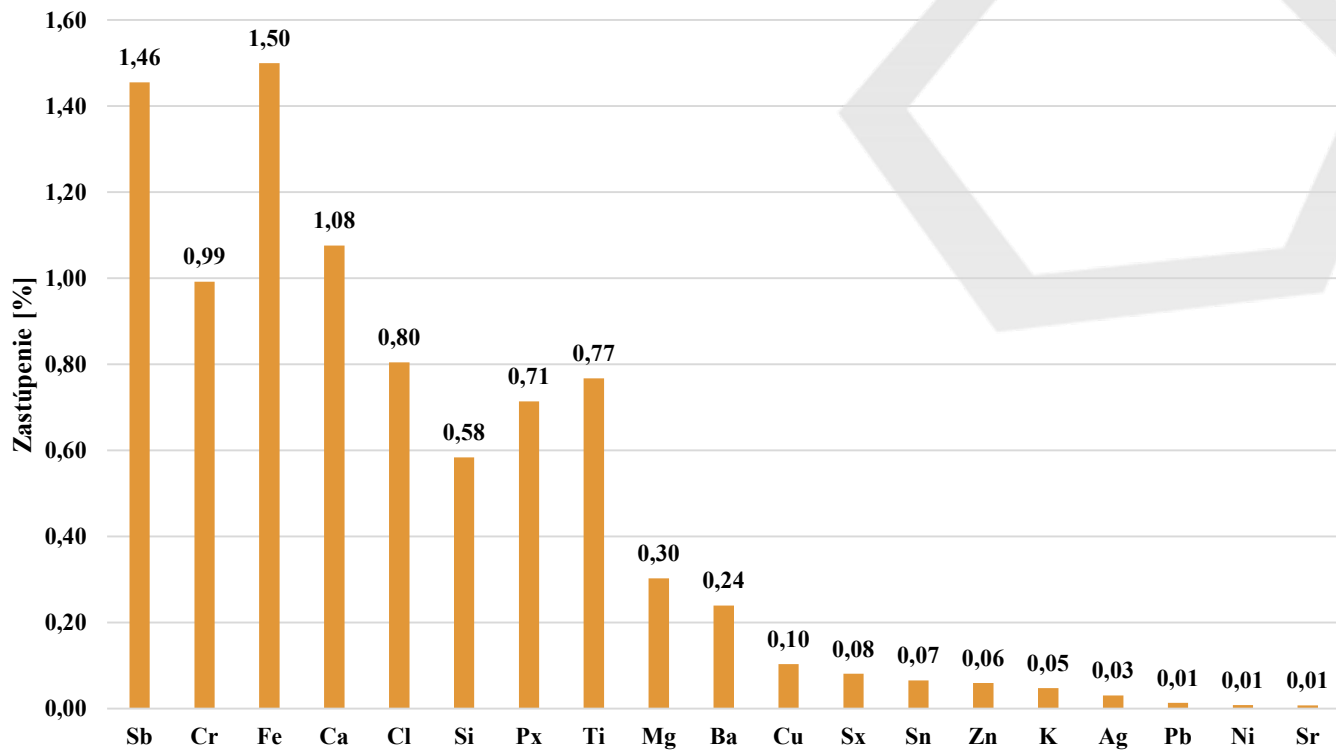
Pyrolýza automobilových pot'ahov – kvapalná fáza



Pyrolýza automobilových pot'ahov – plynná fáza



Pyrolýza automobilových pot'ahov – tuhý zvyšok



Záver

- Využívanie odpadových materiálov z automobilového priemyslu predstavuje dôležitú tému v kontexte zodpovedného nakladania s odpadmi.
- Bolo potvrdené, že skúmané materiály obsahujú **vysoký podiel uhlíka a vodíka**, čo poukazuje na ich **potenciál pre energetické využitie** – či už formou priameho spaľovania, alebo prostredníctvom pyrolýzy umožňujúcej produkciu kvapalných a plyných palív. **Vysoká výhrevnosť** odpadu do 25 MJ.kg⁻¹.
- Variabilné zloženie spracovávaného ASR odpadu → problematické nastavenie procesu pyrolýzneho spracovania.
- Nastavením **reakčných podmienok** (teplota, doba zdržania, rýchlosť ohrevu) je možné ovplyvniť výťažnosť jednotlivých frakcií a preferenčne zvýšiť podiel kvapalného produktu, plynnej fázy alebo tuhého zvyšku.
- Väčšina zo sledovaných nežiadúcich chemických prvkov ostávala v tuhom zvyšku.
- Pyrolýzne spracovanie nielen odpadových textílií má zmysel a výskum v danej oblasti bude pokračovať.

Ďakujem za pozornosť

