



Spolufinancováno
Evropskou unií

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



ESURET

EVALUACE NETRADIČNÍCH ODPADNÍCH SUROVIN POKROČILÝMI RECYKLAČNÍMI TECHNOLOGIEMI

OP JAK DMS pro ITI

**Přístup projektu ESURET k chemické recyklaci obtížně
recyklovatelných odpadů**

P. Kuráň, P. Krystyník, M. Bačiak, J. Snow, L. Oravová, A. Vernerová, M. Předotová, D. Kovač, M. Filip

Mikulov - Digitální a zelená transformace plastikářského průmyslu

14. 4. 2026

INDORAMA
VENTURES

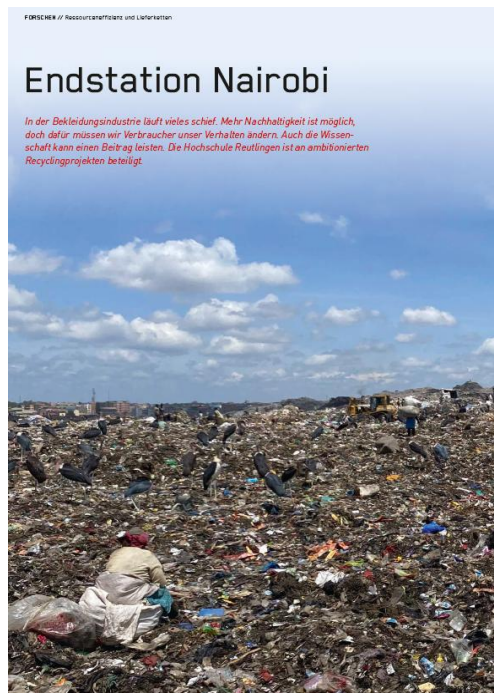
UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM

simple engineering s.r.o.

Představení projektu ESURET

Proč projekt Esuret ?

textil



pneumatiky



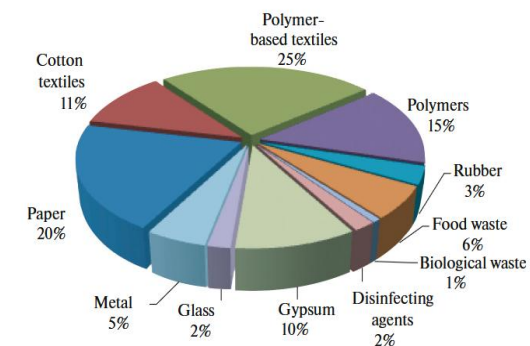
biomasa



nemocniční odpad



Složení nemocničního odpadu

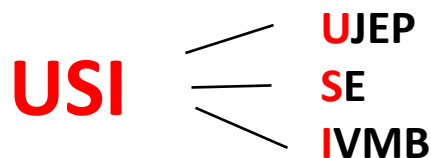


Představení projektu ESURET

OP JAK DMS pro ITI

Cíle projektu:

- **Vytvoření konsorcia USI** - posílení spolupráce UJEP s výzkumným partnerem z podnikové sféry (IVMB) a navázání nové stabilní spolupráce s partnerem z aplikační sféry společností (SE)



- Na bázi konsorcia **USI rozšiřovat** dosavadní know-how v oblasti **vyvíjení pokročilých metod chemické recyklace pro evaluaci netradičních nebo obtížně recyklovatelných** regionálních odpadních surovin a odpadních substrátů v ÚCHA, podle principů oběhového hospodářství s **důrazem na izolaci cenných chemikálií a prvků.**
- Prostřednictvím partnerů z aplikační sféry bude zabezpečen transfer získaných znalostí do praxe.



Představení projektu ESURET

Synergické efekty projektu:

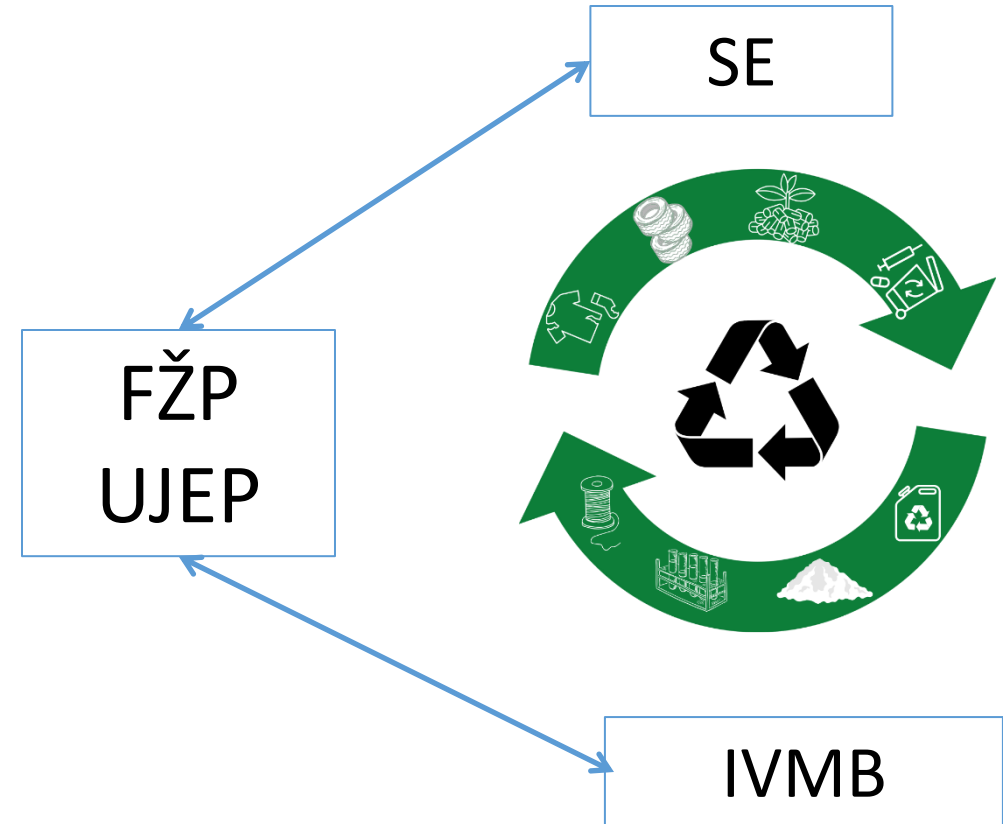
- **ESURET - propojení UJEP a dvou podniků na severu Čech:**

IVMB

Zapojení – spolupráce při:
vývoji a zvětšování měřítka metody **chemické recyklace** odpadních **viskóзовých vláken**,
vývoji a ověřování postupu pro **zpracování upravené biomasy na půdní aditivum**
(pro zpětnou sekvestraci uhlíku do půdy).

SE

inženýrské a projekční činnosti v rámci
laboratorních a pilotních jednotek
(včetně dílčích konstrukcí a dílčích provozních úprav).



Představení projektu ESURET

Rozpočet projektu Esuret (Kč)

Celkové výdaje	48 425 943,59
Investice	11 650 372,10
Neinvestice	36 775 571,49
• UJEP	33 813 495,29
• INDORAMA	10 300 461,44
• SIMPLE	3 967 986,86

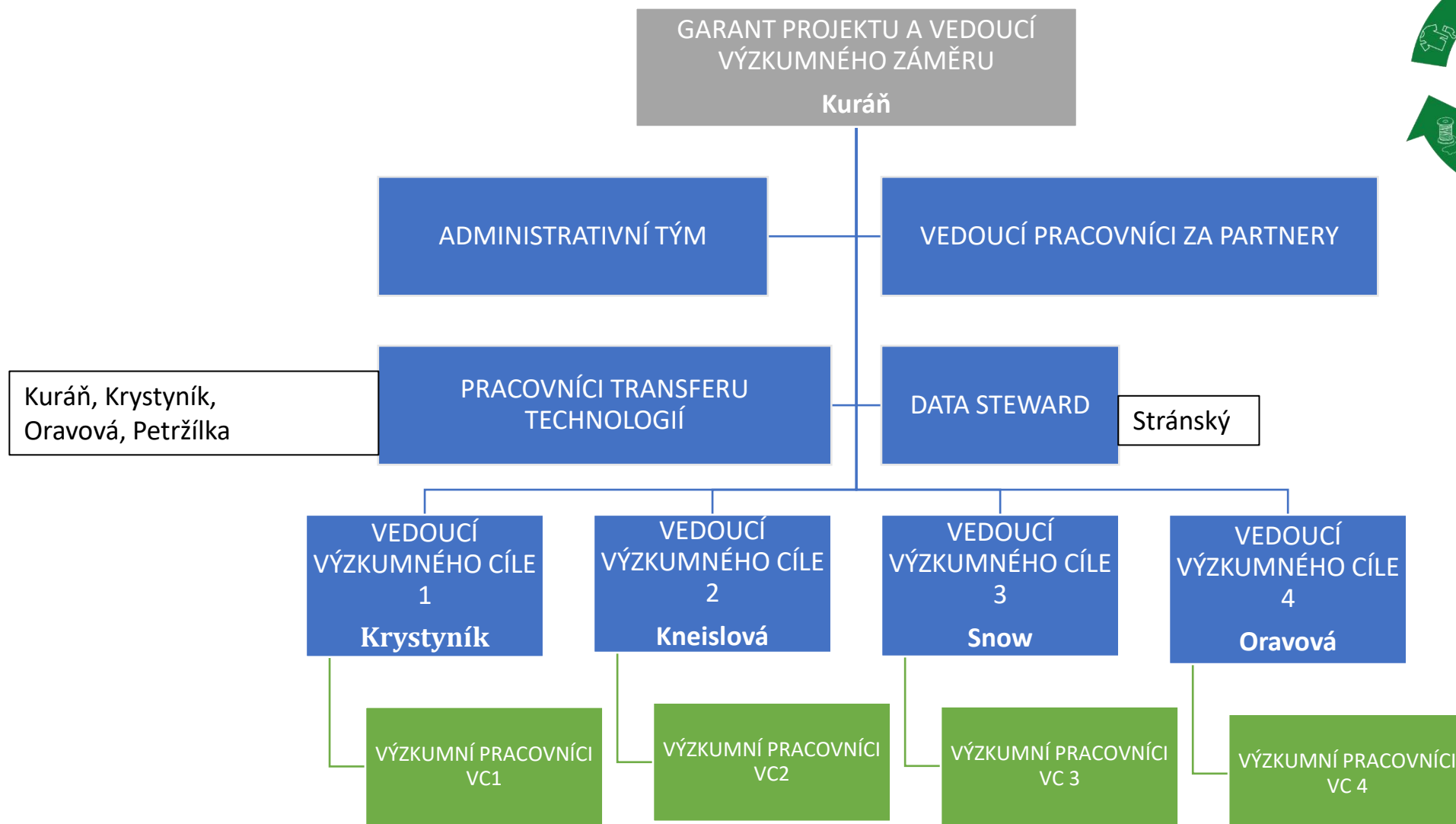


Představení projektu ESURET

UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM

Fakulta životního prostředí

Organizační schéma realizačního týmu:



Představení projektu ESURET

Klíčové aktivity projektu:

Doba realizace projektu: 1. 9. 2024 – 31. 12. 2028

- ❑ **KA02:** Vytvoření, realizace, či prohloubení spolupráce mezi výzkumnými organizacemi
(1. 9. 2024 – 31. 12. 2028)
- ❑ **KA03: Realizace orientovaného výzkumu ve spolupráci se subjekty aplikační sféry**
(1. 9. 2024 – 31. 12. 2028)
- ❑ **KA04:** Příprava společně zpracovaných projektových žádostí se subjekty z aplikační sféry
(1. 1. 2026 – 31. 12. 2028)
- ❑ **KA05:** Modernizace infrastruktury a pořízení nezbytného vybavení
(1. 9. 2024 – 30. 11. 2025)



Představení projektu ESURET

Klíčové aktivity projektu:

- **KA02:** Vytvoření, realizace, či prohloubení spolupráce mezi výzkumnými organizacemi (1. 9. 2024 – 31. 12. 2028)

- ✓ Navázání a spolupráce UJEP s partnery projektu
Partnerská smlouva UJEP-SE-IVMB ;

Navazování a udržování spolupráce s jinými subjekty – VO a podniky;
Podpora transferu technologií

- ✓ **Workshop č. 1:** 1Q 2026 (20.3.2026)

- Workshop č. 2: 4Q 2027
- Workshop č. 3: 4Q 2028



Představení projektu ESURET

- **KA03: Realizace orientovaného výzkumu ve spolupráci se subjekty aplikační sféry (1. 9. 2024 – 31. 12. 2028)**

**Výzkumný záměr:
Vývoj metod chemické recyklace
pro netradiční odpadní materiály**



Výzkumný cíl č. 1

Recyklace směsných syntetických a viskóзовých odpadních vláken

Výzkumný cíl č. 2

Nový přístup k recyklaci pneumatik

Výzkumný cíl č. 3

Zhodnocení zemědělsky neupotřebitelné odpadní biomasy

Výzkumný cíl č. 4

Evaluace nemocničního odpadu

Představení projektu ESURET

- **KA04:** Příprava společně zpracovaných projektových žádostí se subjekty z aplikační sféry (1. 1. 2026 – 31. 12. 2028)
- **KA05: Modernizace infrastruktury a pořízení nezbytného vybavení (1. 9. 2024 – 31. 12. 2026)**
 - **Mikroreaktor** pro rozpuštěcí/solvolýzní experimenty
 - **Střížný mlýnek + Kryogenní mlýn**
 - **Preparativní chromatografie** pro separaci cenných produktů, instalace, zprovoznění
 - **System pro separaci a monitoring malých molekul**, instalace, zprovoznění
 - **System laserové difrakce**, instalace, zprovoznění
 - **Laboratorní pyrolyzní jednotka**



Představení projektu ESURET

Harmonogram monitorovacích období

- 1. MO – 1. 9. 2024 – 31. 1. 2026**
- 2. MO – 1. 2. 2026 – 31. 7. 2026**
- 3. MO – 1. 8. 2026 – 31. 1. 2027**
- 4. MO – 1. 2. 2027 – 31. 7. 2027**
- 5. MO – 1. 8. 2027 – 31. 1. 2028**
- 6. MO – 1. 2. 2028 – 31. 7. 2028**
- 7. MO – 1. 8. 2028 – 31. 12. 2028**



Představení projektu ESURET

Indikátory za projekt

Výsledky a výstupy	Cílová hodnota realizace projektu
Indikátor 214 031 (Ostatní nepublikační výsledky (vybrané druhy))	10
Indikátor 214 001 (Podané patentové přihlášky)	1
Indikátor 214 021 (Publikace z podpořených projektů)	5
Indikátor 214 022 (Odborné publikace – letters, reviews, statě ve sborníku)	6
Indikátor 214 026 (Počet publikací publikovaných v prvním kvartilu nejvlivnějších časopisů v oboru)	3
Indikátor 214 023 (Odborné publikace (vybrané typy dokumentů) se zahraničním spoluautorstvím vytvořené podpořenými subjekty)	2
Indikátor 214 024 (Odborné publikace (vybrané typy dokumentů) ve spoluautorství výzkumných organizací a podniků)	2
Indikátor 210 181 (Počet příspěvků na odborných akcích)	10



Představení projektu ESURET

Výstupy projektu ESURET (celkem 19)

4× výzkumná zpráva

1× souhrnná výzkumná zpráva

1× patentová přihláška

6× odborné publikace (Q < Q1)

- review články,

- statě ve sborníku

3× odborné publikace (Q1)

2× ověřená technologie

2× funkční vzorek



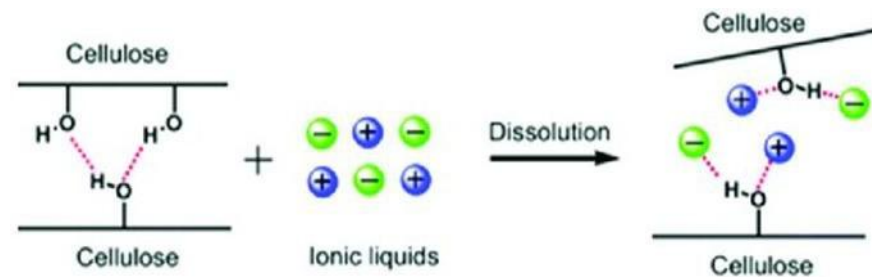
Představení projektu ESURET

- **Prezentace jednotlivých výzkumných cílů**



VC1 - Recyklace směsných syntetických a viskózních odpadních vláken s využitím iontových kapalin

- Proč právě iontové kapaliny (ILs)?
- „Zelená“ alternativa: disponují zanedbatelnou tenzí par a vysokou termální stabilitou, což umožňuje bezpečnější manipulaci oproti tradičním těkavým rozpouštědlům.
- **Destrukce vodíkových vazeb:** jako jediná dokážou efektivně narušit hustou síť vodíkových můstků v krystalické celulóze.
- **Recyklovatelnost:** procesní design počítá s uzavřeným materiálovým cyklem pomocí vakuové regenerace, což je klíčové pro ekonomickou udržitelnost.



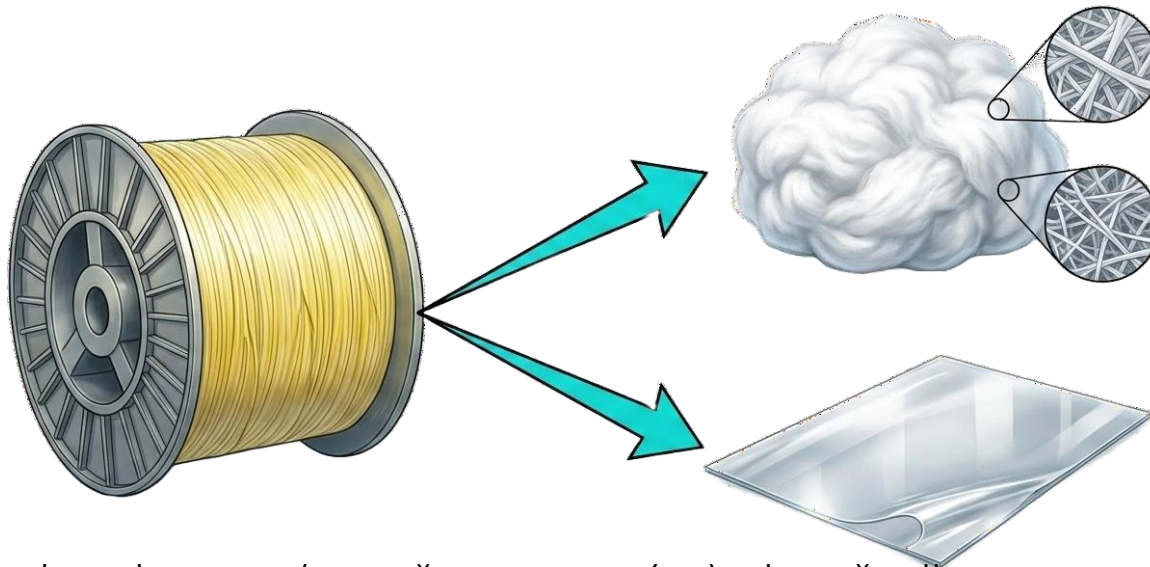
Obr : Mechanismus rozpouštění celulózy v iontové kapalině

zdroj: E. Villalta Boza, M. Moliner, and M. Lis Arias, "Recovery of Cellulose from Polyester/Cotton Fabrics Making Use of Ionic Liquids," *Polym. Sci. Peer Rev. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–9, 2022, doi: 10.31031/psprj.2022.04.000590.

EmimAc: 1-ethyl-3-methylimidazolium acetát
AmimCl: 1-allyl-3-methylimidazolium chlorid
EmimCl: 1-ethyl-3-methylimidazolium chlorid

VC1 - Modelový materiál: průmyslová kordová viskóza

- Zvolena jako „worst-case“ scénář kvůli extrémně dlouhým řetězcům a vysoké krystalinitě.
- Předpoklad: pokud proces funguje na kordovou viskózu, je aplikovatelný na jakékoliv vlákno na bázi celulózy.



Obr. : Ilustrace (vytvořeno pomocí AI), vlevo špulka kordové viskózy, vpravo nahoře fleece, vpravo dole film



Procesní parametry:

- **Teplota: 80–90 °C** (nutná pro efektivní narušení krystalických domén).
- **Čas: cca 3 hodiny** do úplného rozpuštění (vizuální kontrola "medu"). Většinou rozpuštění trvá kratší dobu.
- **Vzorek: kordová viskóza + vybraná IL v poměru 1:30** (poměr 1:15 funguje taktéž, ale vznikající směs je pak velmi hutná)

VC1 - Prvotní testy – čisté IL



Obr :
Reakce
EmimAc
a viskózy
Vzniklý
gel



Obr :
Reakce
EmimCl
a viskózy
Vzniklý
gel



Obr :
Reakce
AmimCl a
viskózy
Vzniklý
gel



VC1 - Slepá ulička – čisté IL

- Počáteční pokusy: Přímé srážení viskózního roztoku („medu“) v nadbytku vody jako antisolventu.
- Pozorované jevy: Vznik neuspořádaných gelových struktur s extrémně vysokou retencí iontové kapaliny.
- Klíčové problémy:
 - Gel v sobě drží IL silnými interakcemi, což znemožňuje její úplnou regeneraci.
 - Amorfnní gely jsou obtížně filtrovatelné a téměř neanalyzovatelné z hlediska strukturních změn.



VC1 - Regenerovaná forma IL: celulózová „vata“

- Počáteční pokusy: Přímé srážení viskózního roztoku v čisté IL („medu“) v nadbytku vody jako antisolventu, optimalizace pro maximální výtěžnost (poměr IL:voda 2:1)
- Použití regenerované IL pro rozpouštění kordové viskozy – IL znečištěná vodou
Charakteristika: do druhého dne nevznikl hygrogel ale bílá, jemně vláknitá struktura s vysokým specifickým povrchem, která se dala odfiltrovat.
- Materiálová bilance (zátěžový test):
 - Vstup: 5,0 g technické kordové viskozy | 100 ml IL.
 - Výstup: 4,8 g regenerované vaty | 98 ml regenerované IL.



Obr : Připravená vata, vlevo promyta vodou, vpravo ethanolem



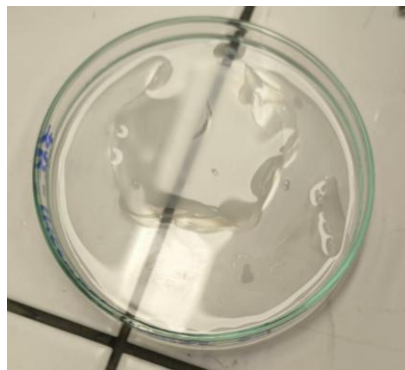
Vata vznikla rozpouštěním kordové viskozy v regenerované IL se značným podílem vody (špinavé IL) při 80 C do formy medu a z medu do druhého dne nevznikl hygrogel ale vata, která se dala odfiltrovat.

VC1 - Regenerovaná forma IL: celulózové „filmy“

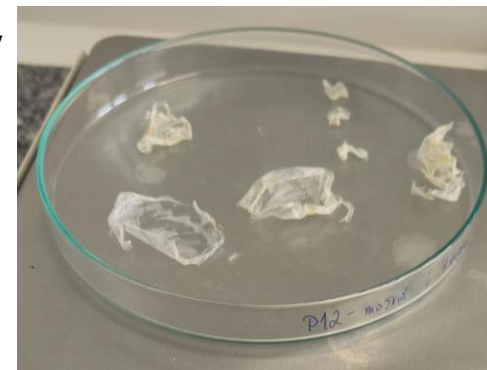
- Transformace do kompaktních struktur (poměr IL:voda 9:1, případně jen IL)
- Vznik „filmů“ - rozpouštěním kordové viskózy v regenerované IL se značným podílem vody (IL:voda 9:1) při 80 C do formy „medu“, z „medu“ nanese tenká vrstva na Petriho misku.
- Princip: využití koncentrovanějšího systému k vytvoření souvislé polymerní vrstvy.
- Morfologie: transparentní, lesklé filmy (celofánového typu) s dobrou mechanickou integritou v mokřém stavu.
- Aktuální výzvy:
 - Vliv srážení: přechod z „vata“ morfologie na „film“ vyžaduje precizní kontrolu rychlosti srážení.
 - Manipulace: Filmy - citlivé na rovnoměrné vymývání solventu - došlo k jejich zkroucení nebo popraskání.



Obr : Vlhký
celulózový film
„hydrogel“



Obr : Vysušený
celulózový film,
křehký,
připomínající
celofán



Regenerace IL a vliv aniontu

- Efektivita čištění na vakuové rotační odparce
- Acetátová cesta (EmimAc): nejlepší procesní vlastnosti, snadná regenerace, kapalná forma při pokojové teplotě usnadňuje manipulaci.
- Chloridová cesta (EmimCl): Vyšší náročnost procesu kvůli fázovému přechodu (v čistém stavu a pokojové teplotě jde o pevnou látku).
- Ověření funkčnosti: byla provedena srovnávací zkouška rozpouštěcí schopnosti „čerstvé“ vs. „regenerované“ IL.
 - Výsledek: Regenerovaná IL (ethylacetátová) vykazuje identickou aktivitu.
 - Zkouška bude provedena i s AmimCl a EmimCl.



Výhled a analytické cíle

- Zkvalitnění přípravy filmů: implementace aplikačních pravítek (např. Baker applicator) pro standardizaci tloušťky.
- Strukturní analýza:
 - Měření průměrné molekulové hmotnosti a stupně polymerizace (DP) k ověření, zda IL neničí celulózný řetězec.
 - SEM: Studium mikro-morfologie vláknité vaty.
- Optimalizace srážení: testování jiných antisolventů (ethanol, isopropanol) pro ještě snadnější regeneraci.



VC2 - Nový přístup k recyklaci pneumatik

Každý rok se v ČR vyprodukuje cca **80 tisíc** tun odpadních pneumatik.

K organizovanému sběru a recyklaci se dostane asi **54 000 t**.

Zbývající část pneumatik (řádově tisíce tun) se do systému vůbec nedostane - zůstává v garážích, na černých skládkách.

Jejich spalování v běžných podmínkách uvolňuje toxické látky do ovzduší.

Efektivnějším řešením využití se jeví pyrolýza pneumatik - využitelné produkty - uhlík (saze), cenné chemikálie (aromáty).



VC2 - Konstrukce pneumatik

Pneumatiky jsou výrobky z: **gumy, oceli, textilu a různých chemických přísad** (polymerů, plniv, změkčovadel a vulkanizačních činidel)

Běhoun

- přilnavost, odolnost proti opotřebení, odvádí vodu
- syntetické a přírodní kaučuky, saze, silika, síra

Kordová vrstva

- absorbuje mechanické zatížení, udržuje tvar
- textilní nebo ocelové kordy zalité v kaučuku

Bočnice

- chrání kostru, zajišťuje pružnost a odolnost
- kaučuk s vysokou elasticitou a odolností proti ozónu

Patka

- upevnění pneumatiky na ráfek
- ocelový drát potažený kaučukem



Vnitřní povrch

- udržuje tlak vzduchu v pneumatice
- butylkaučuk nebo halobutylkaučuk

VC2 - Chemické složení pneumatik

Přírodní kaučuk (NR)	20 – 30 %
Syntetický kaučuk (SBR, BR, IIR)	25 – 35 %
Saze (carbon black)	25 – 30 %
Síra a urychlovače	1 – 3 %
Oleje a změkčovadla	5 – 10 %
Textilní a ocelová výztuž	10 – 15 %



VC2 - Testy tepelného rozkladu pneumatik



VC2 - Procesní podmínky tepelného rozkladu

číslo testu	množství	teplota	výstupní materiálová bilance			poznámka	obsah těkavých látek
			kapalina	plyn	zbytek		
P-27012025-1	500 g	500 °C	29,00 %	29,00 %	42,00 %	vlhká	7,50 %
P-27012025-2	500 g	500 °C	28,00 %	31,00 %	41,00 %	mírně vlhká	8,00 %
P-03022025-1	500 g	540 °C	32,00 %	30,00 %	38,00 %	téměř suchá	4,50 %
P-03022025-2	500 g	540 °C	33,00 %	30,00 %	37,00 %	téměř suchá	5,00 %
P-11032025-1	500 g	580 °C	30,00 %	30,00 %	39,00 %	suchá	2,50 %
P-03032025-2	500 g	580 °C	31,00 %	33,00 %	38,00 %	suchá	2,50 %
P-24032025-1	500 g	620 °C	30,00 %	34,00 %	36,00 %	suchá	1,50 %
P-24032025-2	500 g	620 °C	30,00 %	35,00 %	35,00 %	suchá	1,00 %
P-22042025-1	500 g	650 °C	30,00 %	36,00 %	34,00 %	suchá	0,50 %
P-22042025-2	500 g	650 °C	31,00 %	36,00 %	33,00 %	suchá	0,50 %



VC2 - Pyrolýzní kapalina

	P-20062025-1	P-09072025-1	P-30072025-1	P-22052025-1	P-05082025-2
Hustota	886 kg/m ³	911 kg/m ³	892 kg/m ³	873 kg/m ³	902 kg/m ³
Viskozita	3,6 cSt	4,1 cSt	3,9 cSt	3,7 cSt	4,0 cSt
Výhřevnost	39 MJ/kg	42 MJ/kg	40 MJ/kg	40 MJ/kg	41 MJ/kg
Bod vzplanutí	37 °C	40 °C	39 °C	38 °C	41 °C
Obsah popela	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %
Obsah síry	0,90 %	0,89 %	0,88 %	0,91 %	0,89 %



	motorová nafta
Hustota	800 - 840 kg/m ³
Viskozita	2,0 - 4,5
Výhřevnost	42,5 - 44 MJ/kg
Bod vzplanutí	nad 55 °C
Obsah popela	0,01 % hmot.
Obsah síry	0,001 % hmot.

VC2 - Souhrn pyrolýzního zpracování pneumatik

Ekologická šetrnost

nevznikají škodlivé emise jako při spalování

Energetická soběstačnost

pyrolýzní plyn lze použít k výrobě elektrické energie

Zhodnocení odpadu

materiálová recyklace se vznikem nových produktů (saze, aromáty)

Redukce objemu odpadu

až 90 % hmotnosti pneumatik je recyklovatelných

Možnost decentralizace

zpracování pneumatik z lokálních zdrojů v menších provozech



VC3 - Zhodnocení zemědělsky neupotřebitelné odpadní biomasy

Vytipované materiály pro výzkum:

1. Kontaminovaná biomasa – biomasa kontaminovaná organickými nebo anorganickými látkami
2. Směsné a kompozitní biomateriály

1. Biomasa po fytořemediaci (Chorvatsko)



Miscanthus × giganteus

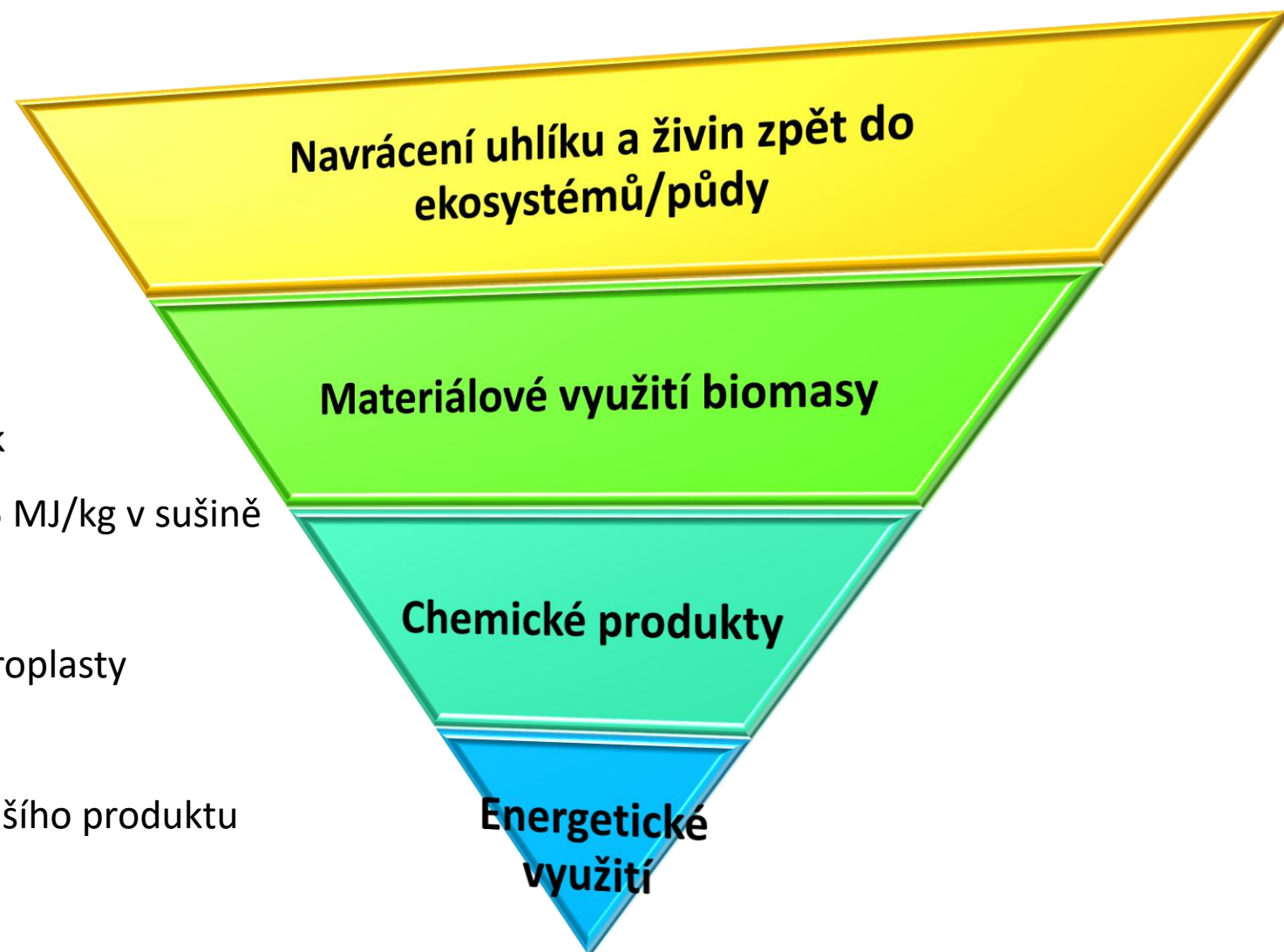
2. Dřevoplastové kompozity (WPC)



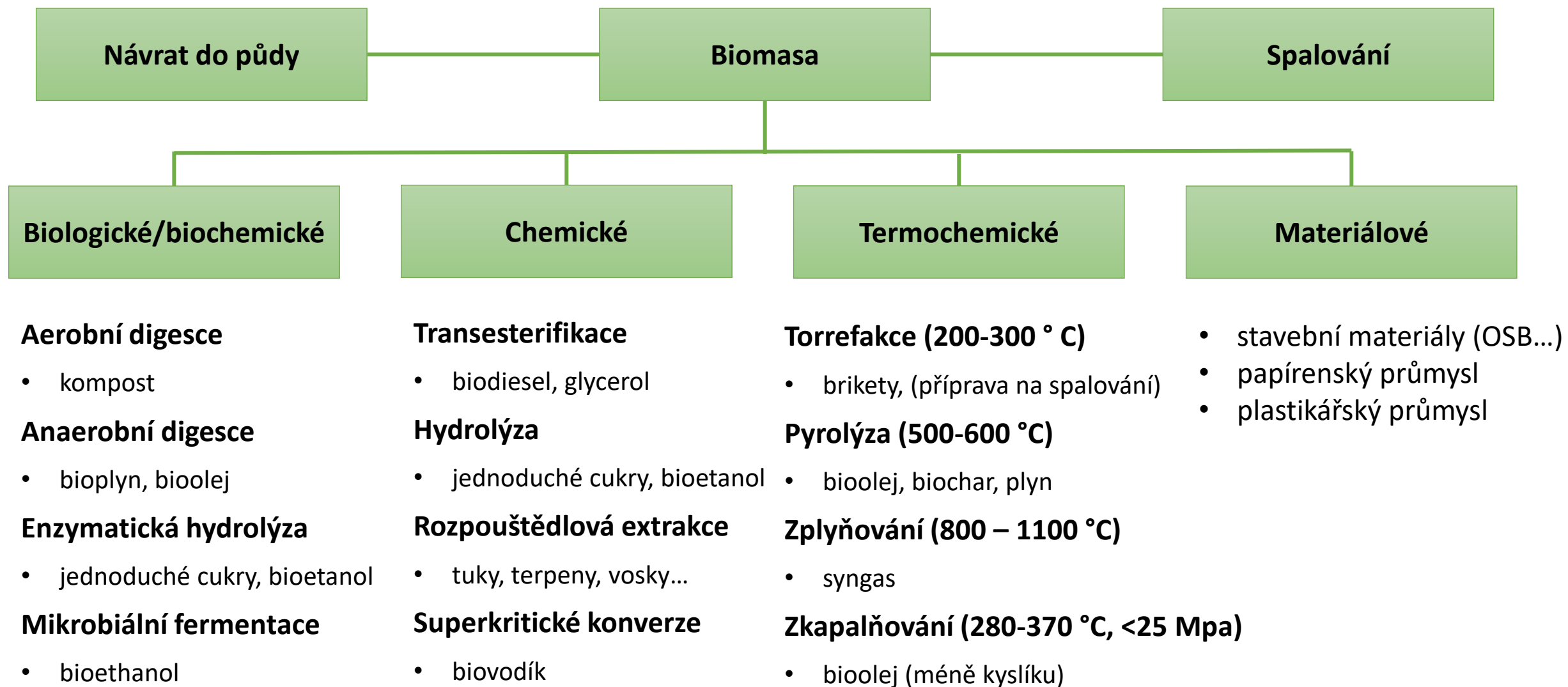
VC3 - Hierarchie kaskádového využití biomasy

Faktory:

- snaha omezit emise CO₂ a zachovat/uložit uhlík
- zákaz skládkování materiálů s výhřevností > 6,5 MJ/kg v sušině
- dotace na vybrané technologie (př. bioplyn)
- kontaminace těžkými kovy, org. polutanty, mikroplasty
- energetická hustota a logistika
- další přidaná hodnota – př. zisk cenného vedlejšího produktu



VC3 - Možné osudy odpadní biomasy



VC3 - Dřevoplast (WPC): materiálové a tržní souvislosti

- koncept vyvinut v 70. letech v Itálii
- tržní hodnota 2024: ~9 mld. USD - projekce 2037: ~45 mld. USD
- ploty, zahradní vybavení, stavební prvky, automotive aplikace
- obsah dřevní hmoty může dosahovat až 80 %
- obvykle vyrobeny z virgin plastů, zejména PE, PP a PVC
- většina výrobců se vyhýbá použití odpadních plastů z důvodu proměnlivé kvality těchto odpadních toků, lze však zpracovávat zmetky z výroby (známé složení)



VC3 - Nakládání s WPC odpadem - současnost

- WPC jsou často vyobrazovány jako „zelené“ materiály – šetří použití plastů (fosilních zdrojů)
- LCA - recyklace je z pohledu dopadů na ŽP nejlepší řešení pro nakládání s WPC (Sommerhuber a kol.)
- mechanická recyklace - nelze nebo výrazné zhoršení vlastností (downcycling) – nutno použít větší množství aditiv
- neexistuje plošný systém zpětného odběru
- v současné době se WPC spaluje nebo skládkuje

„WPC je velmi slibný, *udržitelný a biologicky odbouratelný ekologický materiál.*“

(Ashori 2008)

dosud se nerecyklují

plastovou část tvoří HDPE, PP nebo PVC – biologicky prakticky nerozložitelné

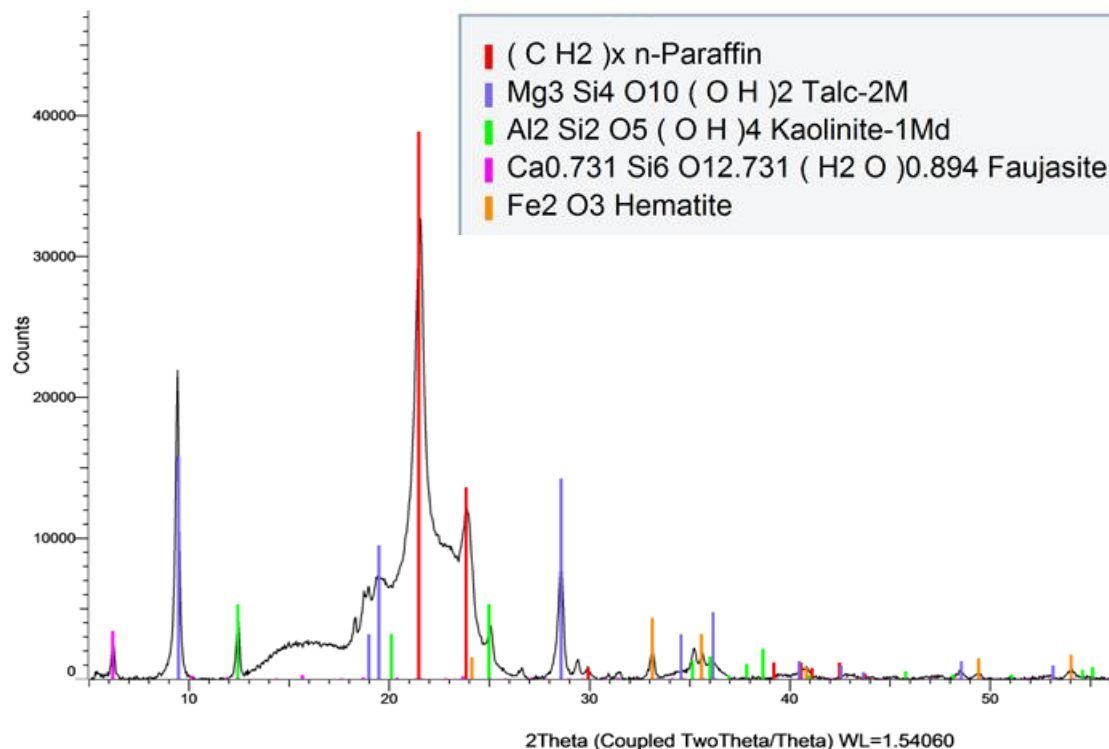
VC3 - Charakterizace použitého WPC



- materiál poskytla společnost Woodplastic a.s, která prodává svoje výrobky pod značkou Terafest
- nadrcené zmetky z výroby určené pro primární recyklaci
- zhruba 50 % dřevní hmoty, zbytek HDPE a aditiva

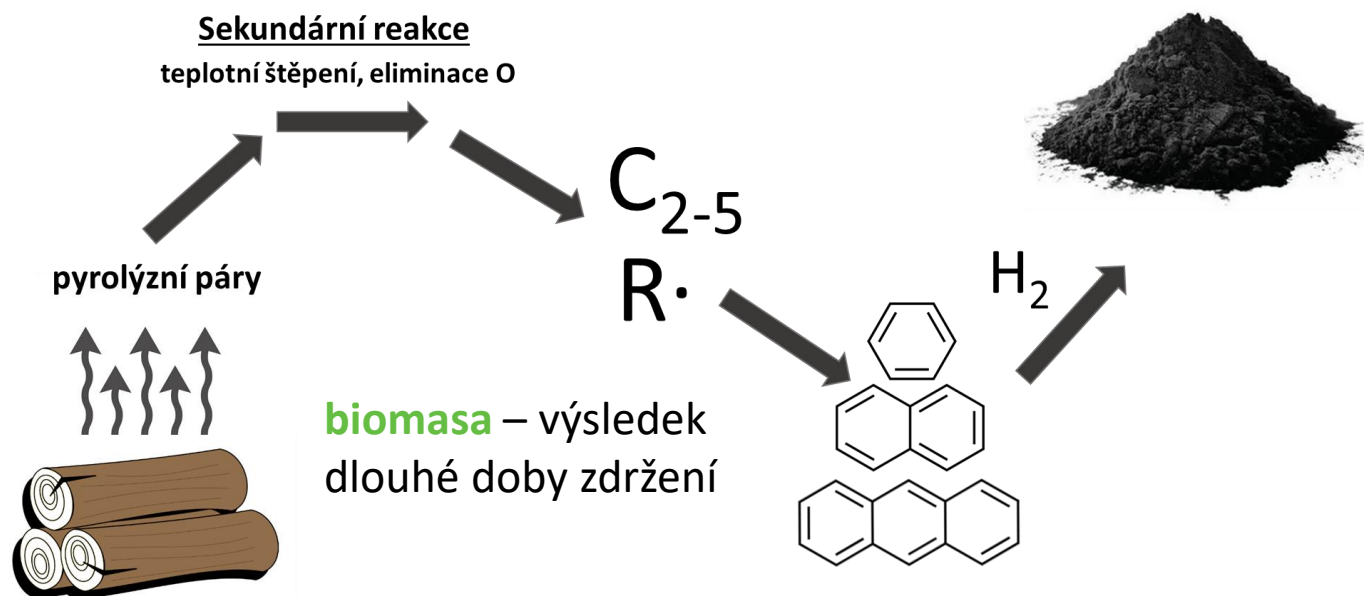
Složení pomocí XRF a XRD

Si	6,86 %
Fe	4,87 %
Mg	4,17 %
Ca	1,79 %
Zn	1,40 %
Al	0,570 %
K	0,199 %
Mn	431 PPM
S	228 PPM
Ti	226 PPM
Cu	137 PPM



VC3 - Chemická recyklace WPC - současný stav poznání

- **neexistuje literatura zabývající se recyklací WPC pomocí rozpuštění/srážení**
- plasty a biomasa vyžadují odlišné podmínky a ideálně také uspořádání pyrolýzy
- **biomasa** - krátká doba zdržení, **plasty** - delší doba zdržení

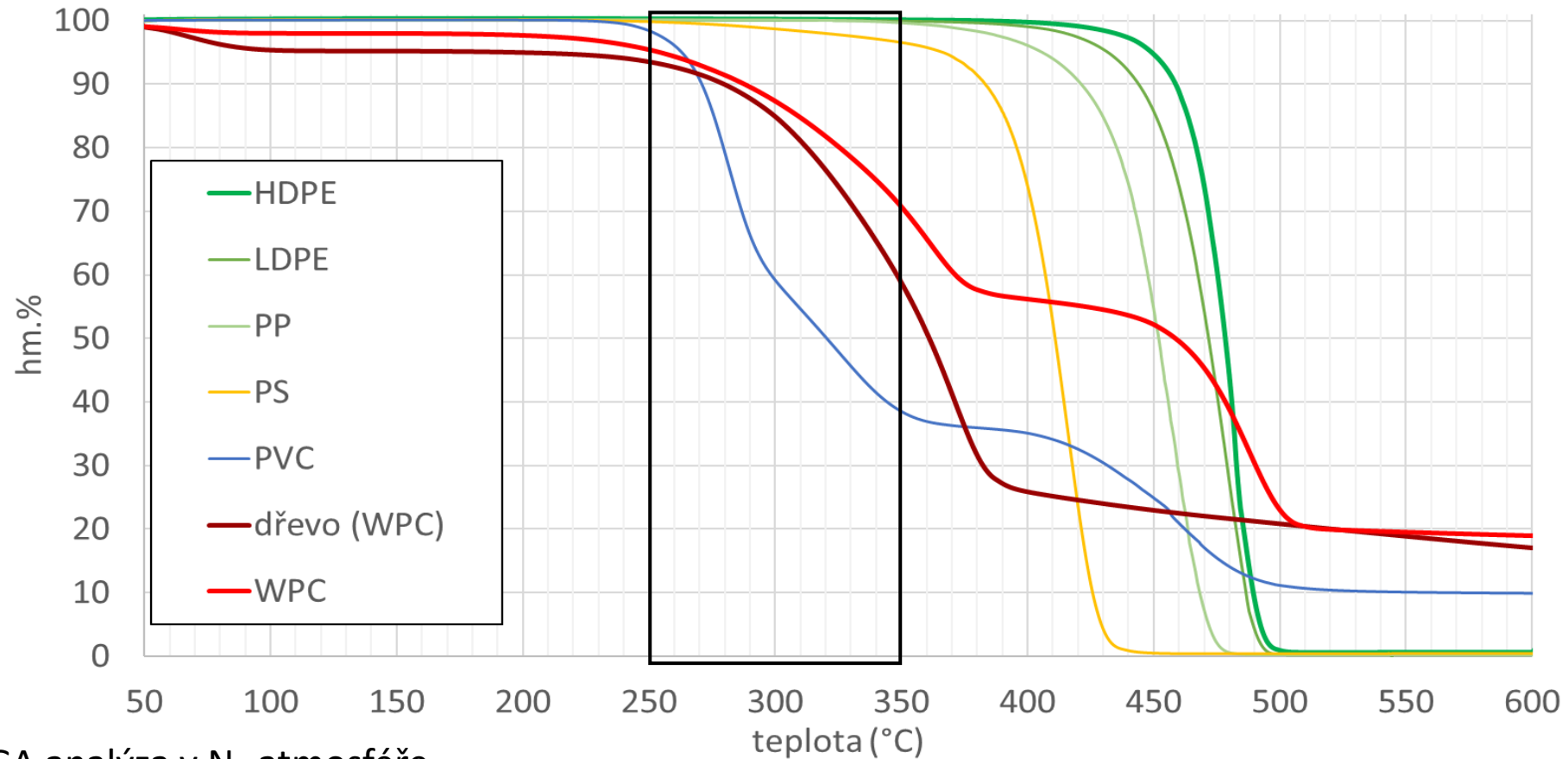


plasty - výsledek krátké doby držení

- v přítomnosti biomasy dochází ke tvorbě radikálů, které následně umocňují štěpení polymerního řetězce plastů
- vodík z plastů může stabilizovat radikály z biomasy a omezovat kondenzační reakce vedoucí ke vzniku tuhého zbytku, čímž dochází následně ke zvýšení výtěžku kapaliny

VC3 – Kroková pyrolýza

- kyslíkaté látky se koncentrují v produktech 1. kroku
- pyrolýza je nevhodná pro WPC s matricí PVC
- neexistuje studie krokové pyrolýzy WPC



TGA analýza v N₂ atmosféře

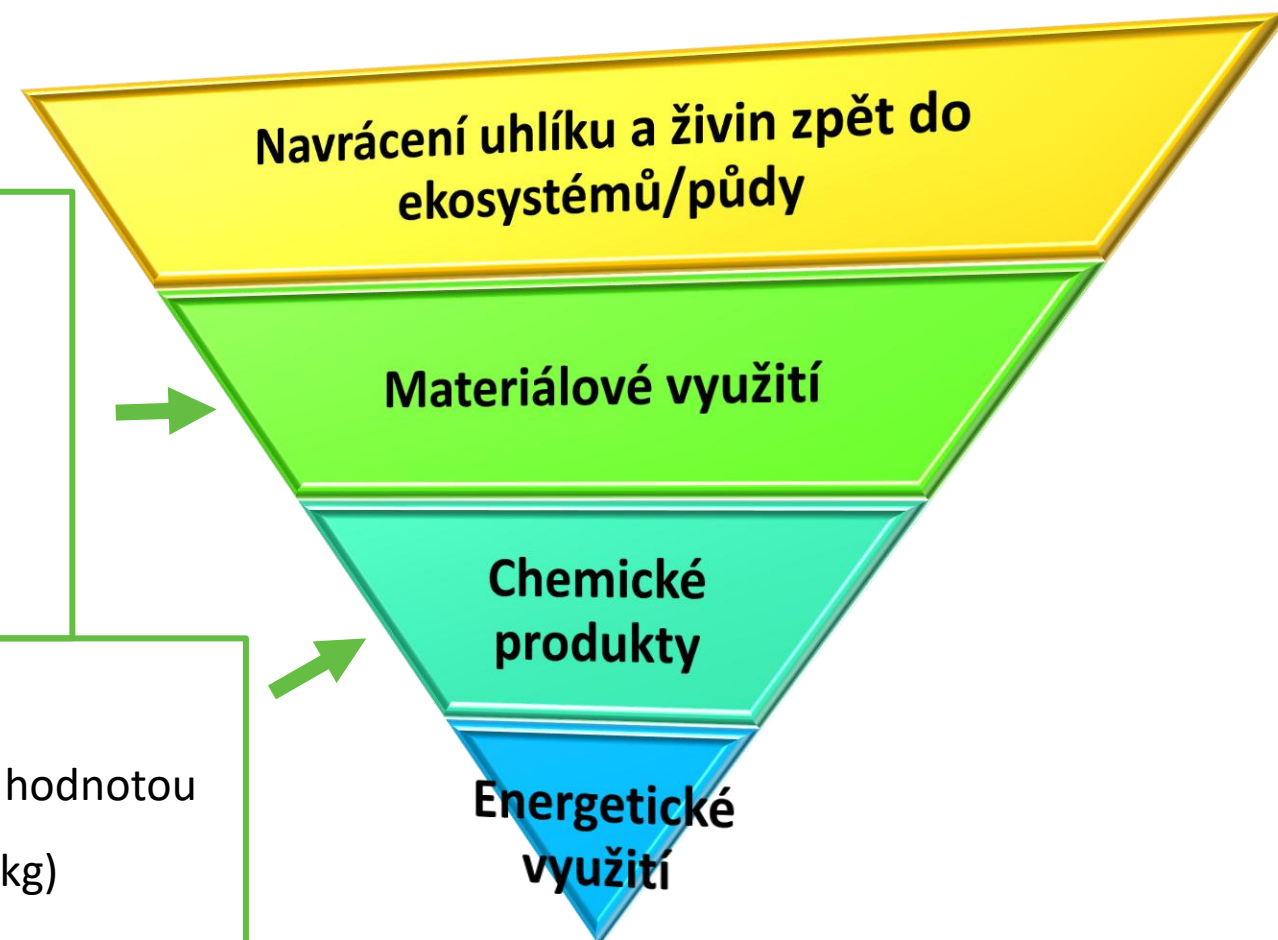
VC3 - Chemická recyklace WPC – plán výzkumu

1. Solvolýza/rozpouštění - oddělení dřevní a plastové složky

- použití procesu rozpouštění/srážení + filtrace za horka
- ověření možnosti odstranění aditiv
- získání dřevní moučky a plastů pro mechanickou recyklaci

2. pyrolýza

- optimalizace pro získání kapalných produktů s co nejvyšší hodnotou
- nová vsádková míchaná laboratorní aparatura (0,5 – 1 kg)
- kroková pyrolýza, katalyzátory, vícestupňové čištění
- ověření možnosti následných úprav kapalného produktu



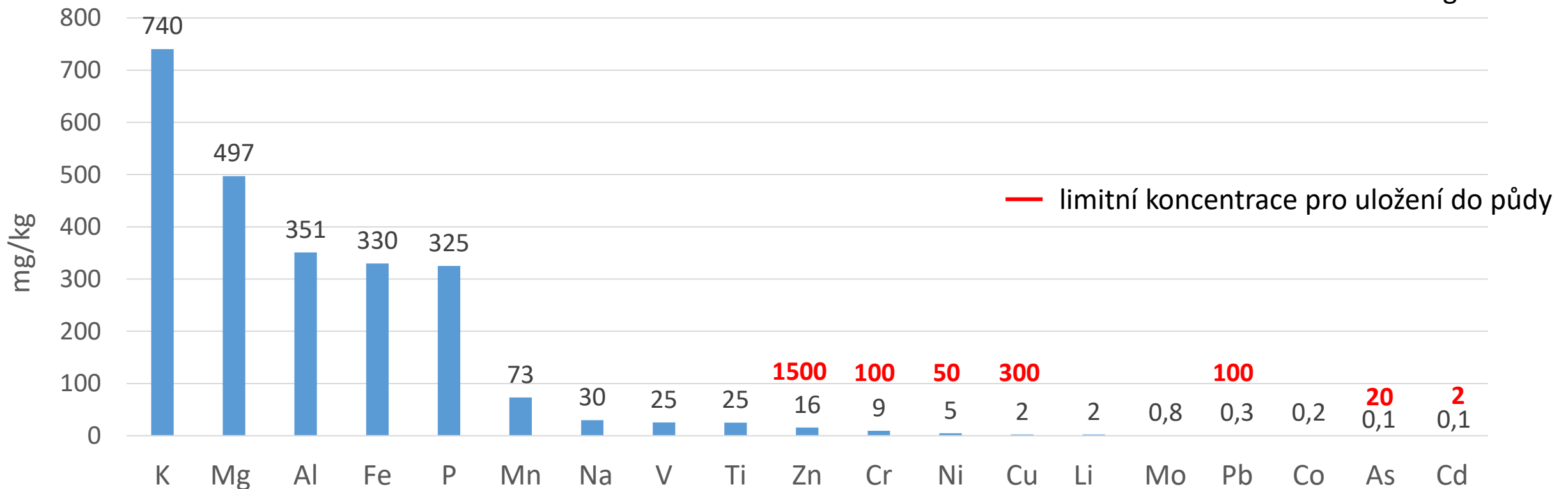
VC3 - Charakterizace biomasy po fytořemediací

- obsah prvků neopodstatňuje jejich odstranění
- biomasu lze vrátit do půdy bez dalších úprav



Miscanthus "Giganteus"

Prvkové složení pomocí ICP-MS



VC3 - Vliv katalyzátorů na pyrolýzu biomasy

- pyrolýzou biomasy vzniká směs kyslíkatých organických sloučenin → katalyzátory → CO, CO₂, H₂O a uhlovodíky
- Pro WPC byly vyzkoušeny: různé typy zeolitů – Hbeta, HY, HZSM, Al-MCM-41, vanadium-MCM-41, γ-Al₂O₃, přírodní zeolit, odpadní FCC katalyzátor, ZnO, CaO, Fe₂O₃, MgO, biochar, Fe-biochar nebo různě aktivované uhlí
- Hlavní účinek: **zvýšení tvorby aromatických uhlovodíků včetně nežádoucích PAH, nedostatečná deoxygenace, vyšší výtěžek tuhého zbytku a plynů**
- ❖ k deoxygenaci a aromatizaci dochází v přítomnosti **kyselých katalyzátorů** především skrze oligomerizaci, cyklizaci a dehydrogenaci, přičemž důležitou roli má především velikost pórů a kyselost katalyzátorů
- ❖ v případě **zásaditých katalyzátorů** dochází spíše jen k odlišné distribuci kyslíku - ketonizace, aldolová kondenzace a abstrakce vodíku - pokud je ale doba zdržení delší, může docházet k terciárním reakcím (dehydrogenace, aromatizace)

Na základě výsledků studií lze odhadovat, že při nejvyšší dosahované deoxygenaci, při které se obsah kyslíku sníží na hodnoty kolem 10 hm.%, bude zisk uhlíku v kapalině tvořit jen zhruba 20 % z uhlíku na vstupu

VC3 - Vliv katalyzátorů na pyrolýzu biomasy

- Biomasa → Pyrolýza → Kyslíkaté organické látky → Produkty: CO, CO₂, H₂O + uhlovodíky

KYSELÉ KATALYZÁTORY

(zeolity, Al-MCM-41, FCC, γ -Al₂O₃)

- oligomerizace
- cyklizace
- dehydrogenace

→ aromatické uhlovodíky

→ PAH

→ vyšší koks

ZÁSADITÉ KATALYZÁTORY

(CaO, MgO, ZnO, biochar)

- jen odlišné distribuci kyslíku - ketonizace
- aldolová kondenzace
- abstrakce H

(→ aromatizace při delší době)

Hlavní účinek: **zvýšení tvorby aromatických uhlovodíků včetně nežádoucích PAH, nedostatečná deoxygenace, vyšší výtěžek tuhého zbytku a plynů**

Na základě výsledků studií lze odhadovat, že při nejvyšší dosahované **deoxygenaci**, při které se obsah O₂ sníží na hodnoty kolem 10 hm.%, bude zisk **C** v kapalině tvořit jen zhruba 20 % z **C** na vstupu.

VC3 - Následná úprava kapaliny z biomasy

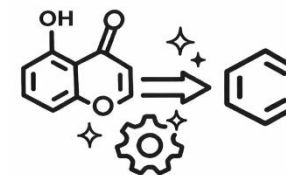
Extrakce



do org. rozpouštědel, vody
destilace, adsorpce...

- bioolej z biomasy může obsahovat **až 40 wt. % vody**
- **cíl:** oddělení vodné a organické frakce,
snížení obsahu vody, extrakce cenných látek (fenoly)
- levoglukosan, furfural/HMF – obtížná extrakce (nestabilní)
vodná fáze: voda, kyseliny, alkoholy, aldehydy/ketony
organická fáze: fenoly, oligomery ligninu, dehtové složky

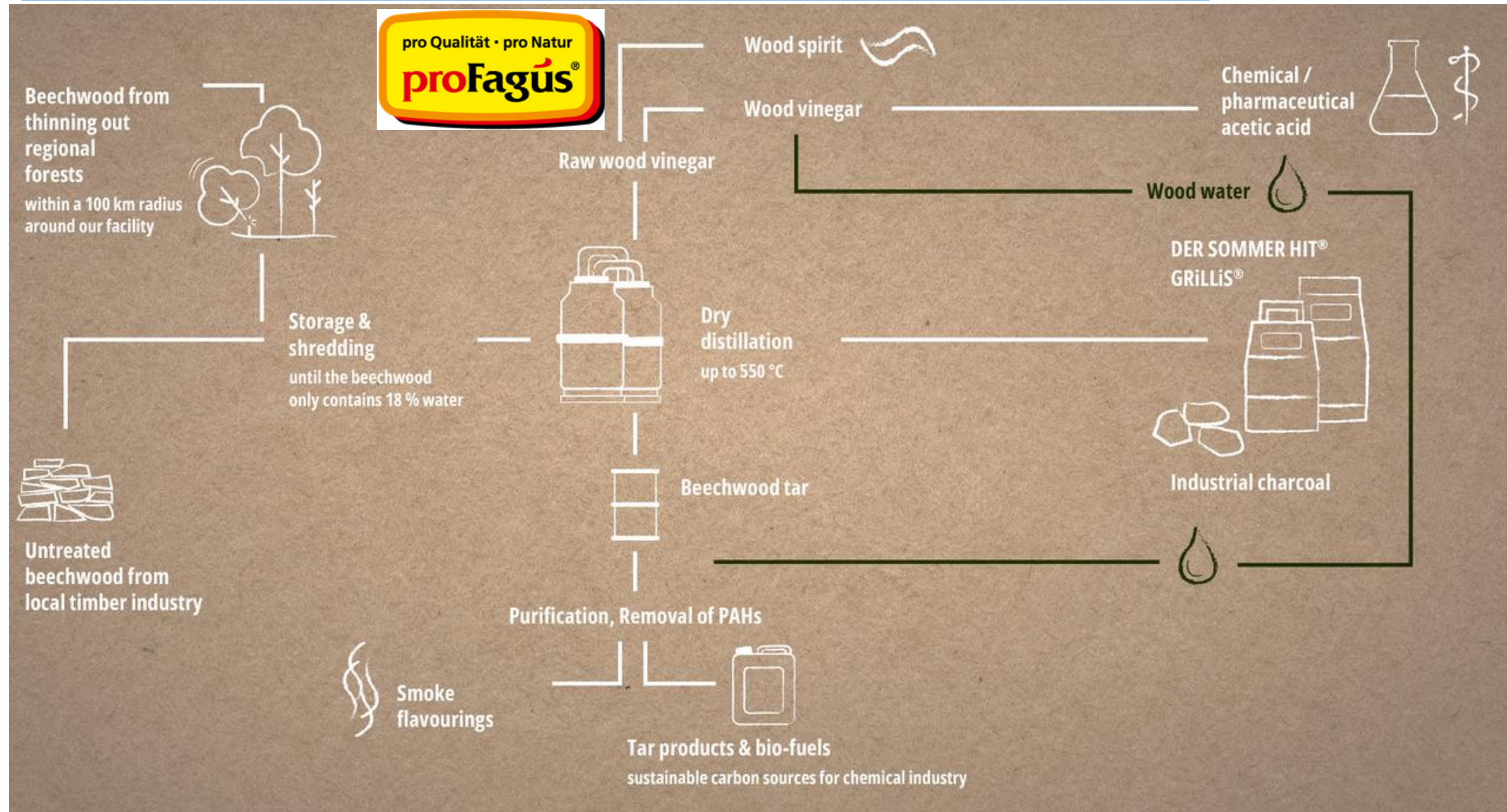
Úprava složení



především
hydrodeoxygenace
(HDO)

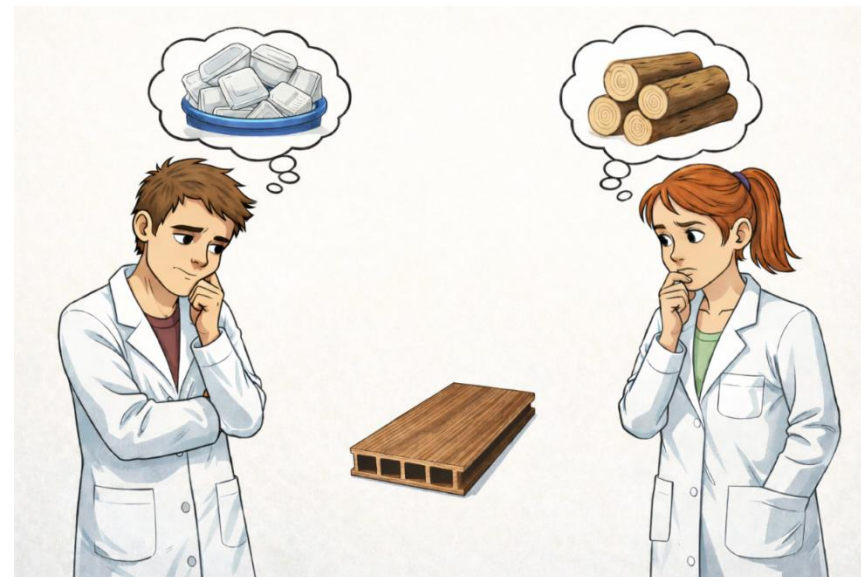
- **cíl:** odstranění kyslíku z bio-oleje a přeměna kyslíkatých sloučenin na stabilnější uhlovodíky.
- př. fenol: $C_6H_5OH + H_2 \rightarrow C_6H_6 + H_2O$
- obvykle stejné katalyzátory jako v rafinérii pro HDS (Ni-Mo, Co-Mo na alumině) při 300 – 450 °C, 50-200 bar H_2
- HDO biooleje není v současnosti ekonomicky výhodná - prodejní ceny fosilní alternativy jsou nižší
- korozivita, nestabilita, rychlé koksování drahých katalyzátorů

VC3 - Ukázka komerčního procesu



VC3 - Srhnutí

1. biomasa z míst zasažených balkánskou válkou **neobsahovala nadlimitní koncentrace prvků a lze jí vrátit do půdy**
2. ekonomické zhodnocení produktů pyrolýzy biomasy vyžaduje maximalizaci užitné hodnoty všech produktů - viz proFagus
3. neexistuje literatura zabývající se rozpuštěním/srážením a krokovou pyrolýzou WPC
4. při pyrolýze WPC dochází k interakcím dřevní a plastové složky, které je třeba zohlednit
5. nejsou dostatečné důkazy o tom, že katalytická pyrolýza přináší dostatečné výhody ve srovnání s nekatalytickou



VC4 - Evaluace nemocničního odpadu

Odpad ze zdravotní péče – skupina **1801** (1802 odpady z výzkumu, diagnostiky, léčení nebo prevence nemoci zvířat)

Většinu odpadového toku 18 v roce 2022 tvořily odpady ze zdravotní péče (98,6 %)

- vzniká při poskytování zdravotní péče dle zákona o zdravotních službách (č. 372/2011 Sb.) v lůžkových, ambulantních a jim podobných zařízeních
- popř. při zdravotní péči ve vlastním sociálním prostředí pacienta a odpad vznikající mimo zdravotnická zařízení, zejména v zařízení sociální péče, tetovacích salónech nebo protidrogových centrech (pokud tyto odpady vykazují stejné vlastnosti a rizika jako odpad ze zdravotnických zařízení)

Produkce cca 49 tis. tun/ rok

VC4 – Složení nemocničního odpadu

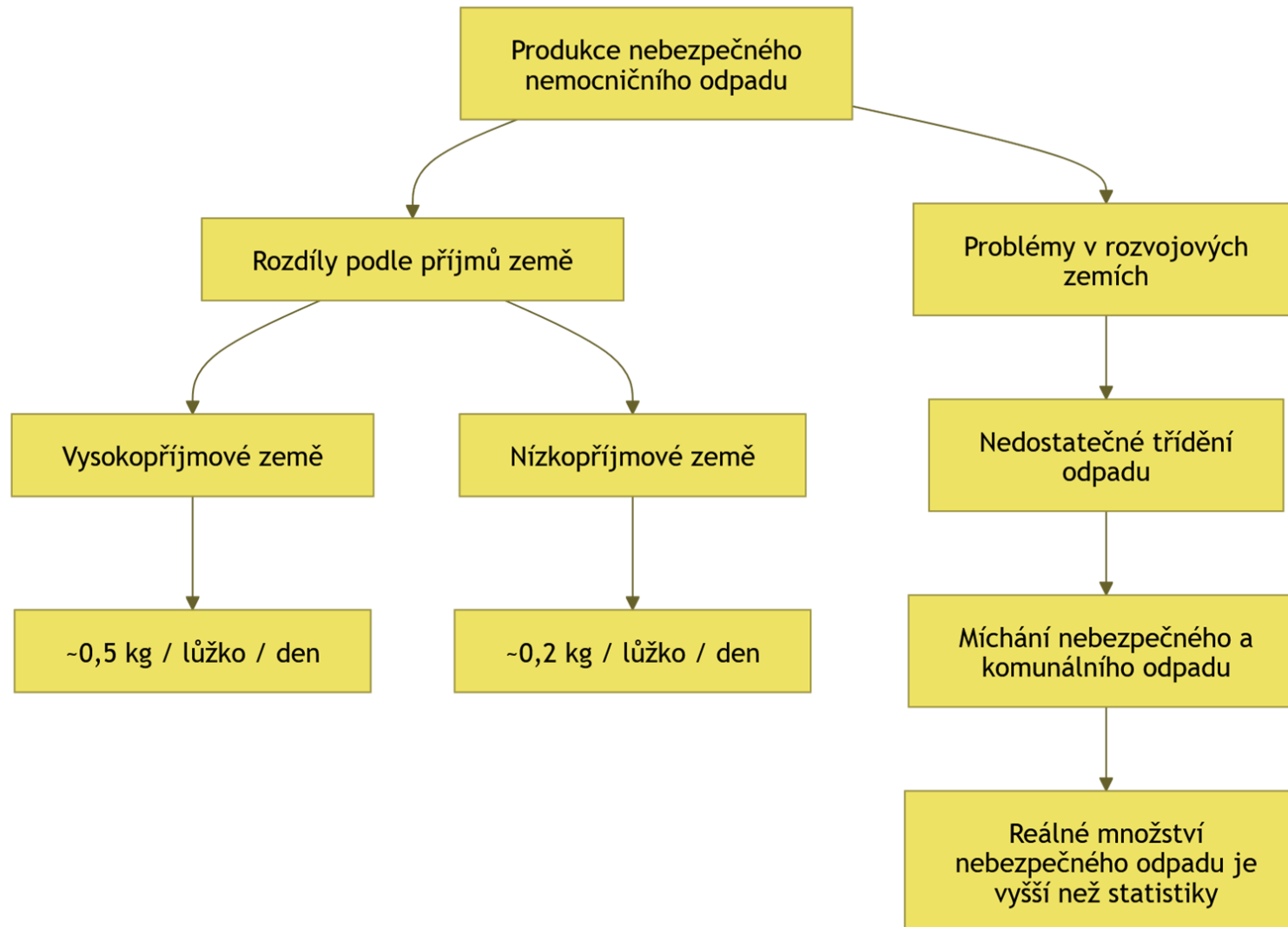
Základní rozdělení dle rizikovosti odpadu pro zdraví a ŽP:

- ostré předměty
- nepoužitelná léčiva včetně cytostatik
- odpady určené ke spálení
- radioaktivní odpad
- **odpady určené k dekontaminaci**
- komunální odpad

VC4 - Odpady ze zdravotní péče v ČR – přehled za rok 2022

- podíl na celkovém množství odpadu vyprodukovaného v ČR = **0,1 %**
- významný vzhledem k **infekčním vlastnostem**
- podíl **nebezpečného odpadu** v rámci tohoto odpadového toku byl ve výši **83 %**
- v rámci odpadů ze zdravotní péče se téměř na veškeré produkci těchto odpadů podílela dvě katalogová čísla **18 01 03*** *Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce* (76,2 %) a **18 01 04** *Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce* (17 %)
- **největšími producenty Hlavní město Praha (18,2 %)**, Jihomoravský kraj (11,9 %), Středočeský kraj (10,8 %) a Moravskoslezský kraj (9,1 %)
- nejmenším producentem byl Karlovarský kraj (2,7 %)
- přeshraniční přeprava těchto odpadů minimální – import neevidován, export (Rakousko cca 0,87 t)

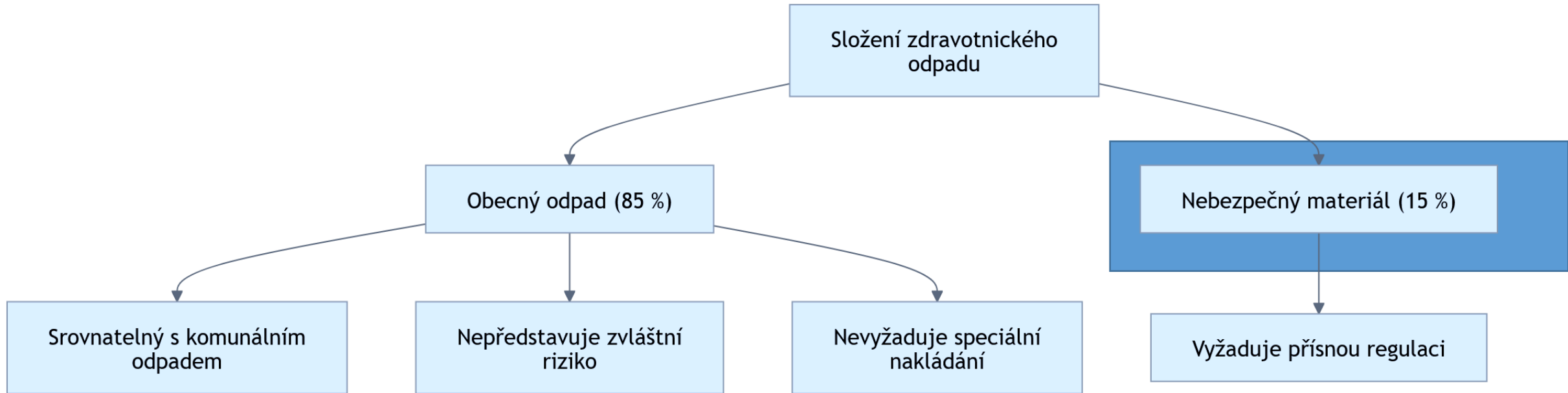
VC4 - Rostoucí zátěž pro zdravotnictví i životní prostředí



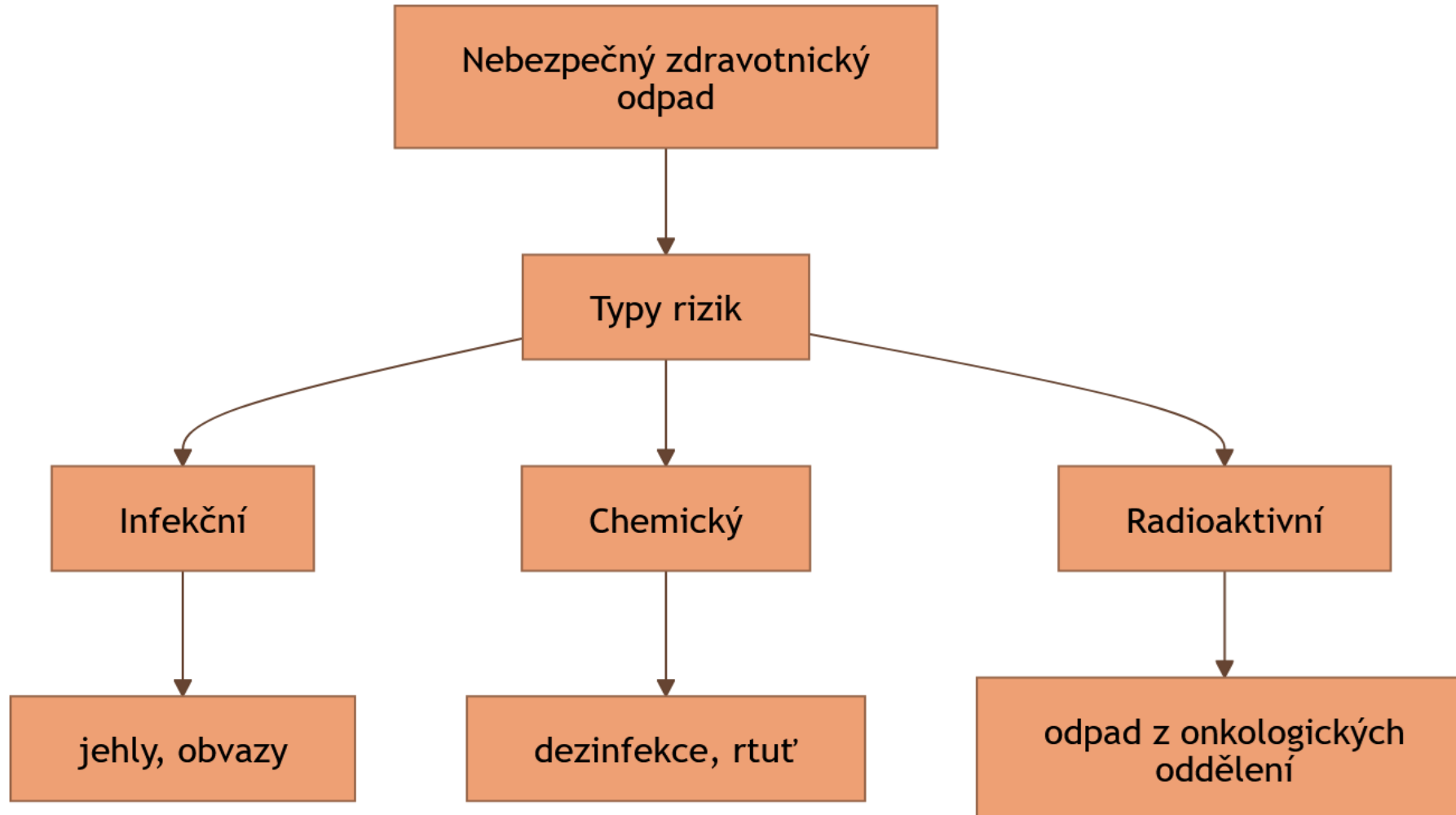
Zdroj: WHO, Health care waste, 2024

F. Wang, L. Yu, J. Long, H. Bu, C. He, A. Wu, J. Mater. Cycles Waste Manag. 25 (2023) 221–234. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01523-5>.

VC4 - Rostoucí zátěž pro zdravotnictví i životní prostředí



VC4 - Rostoucí zátěž pro zdravotnictví i životní prostředí



Zdroj: WHO, Health care waste, 2024

F. Wang, L. Yu, J. Long, H. Bu, C. He, A. Wu, J. Mater. Cycles Waste Manag. 25 (2023) 221–234. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01523-5>.

VC4 - Hierarchie odpadového hospodářství



VC4 - Způsoby nakládání s NO

Incinerace: spalování je tradiční metodou likvidace odpadu ze zdravotnictví, zvláště pro infekční a nebezpečný odpad.

Autoklávování: Sterilizace odpadu pomocí páry pod vysokým tlakem, vhodná pro dekontaminaci některých typů infekčního odpadu.

Chemická dekontaminace: Použití chemických látek k deaktivaci patogenů v odpadu.

Mikrovlnná dekontaminace: Použití mikrovlnné energie k deaktivaci patogenů.

Pyrolýza a plazmatické zplyňování: Relativně nová technologie, která využívá termické procesy pro rozklad odpadu na základní složky.

Zdroj: https://mzp.gov.cz/system/files/2025-06/OCEO-POH_CR_2025_2035_MPR-20250609.pdf

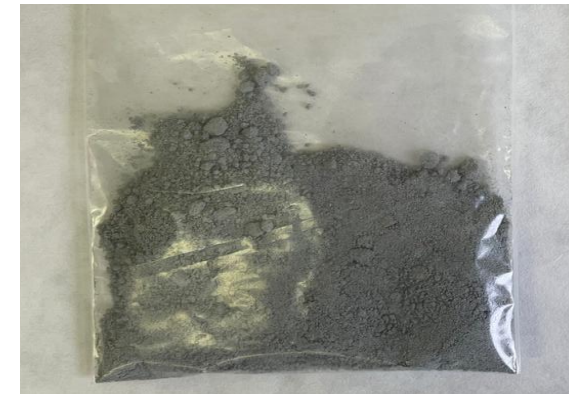
Rok	Množství (tis. t)	Energetické využití (tis. t)	Recyklace (tis. t)	Skládkování (tis. t)	Spalování (tis. t)
2018	44	3	0	7	29
2019	45	2	0	7	27
2020	46	2	0	7	28
2021	49	3	0	4	34
2022	48	4,2	0	4	34

VC4 - Infrastruktura pro zpracování odpadu skupiny 18

- V ČR evidováno 286 aktivních stacionárních zařízení a 116 aktivních mobilních zařízení s povolení nakládat s odpadem skupiny 18.
- Ve většině krajů České republiky je nedostatečná kapacita pro nakládání s těmito odpady.
- Největší deficit kapacit Hlavní město Praha (- 6 796 tun), Jihomoravský kraj (- 3 057 tun) či Olomoucký kraj (- 1 936 tun)

VC4 - Realizace v rámci projektu Esuret

- Spolupráce se společností Ecosteryl – autorizovaná firma pro nakládání s širokým spektrem zdravotnických odpadů
- Experimenty zahájeny s nemocničním odpadem z institutu IKEM
- Kód odpadu 191212, kategorie O
- Zdravotnický odpad představuje heterogenní skupinu materiálů, které se liší svým původem, složením i mírou zdravotního a ekologického rizika.

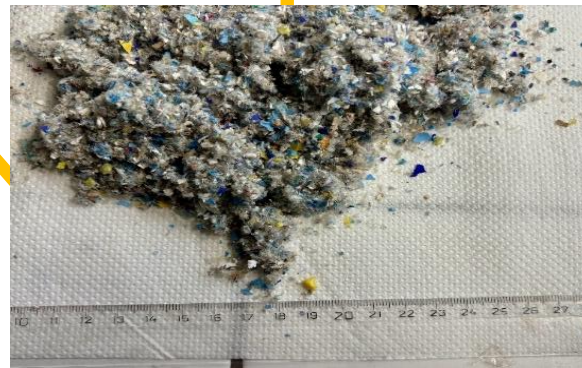
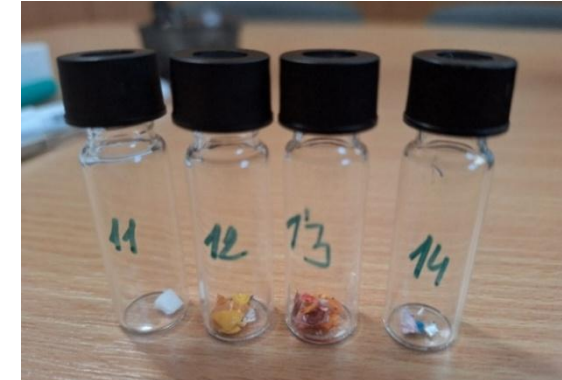
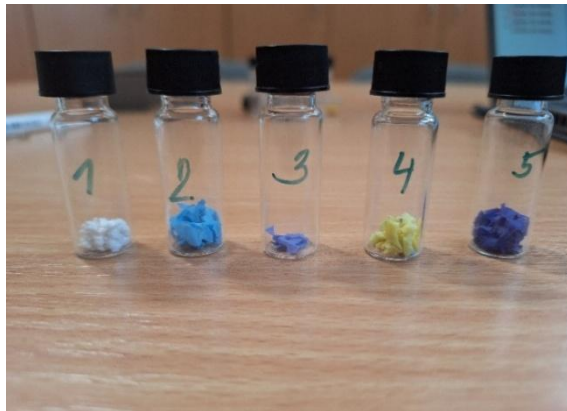


VC4 – Kam směřujeme ?



VC4 - Materiálová charakterizace – manuální separace NO

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7
Materiál	NS	NS	NBR	PE	NBR	PU	PE
Číslo vzorku	8	9	10	11	12	13	14
Materiál	PES	NS	PE	NS	PE	NS	PE



- **NBR (nitril-butadienový kaučuk)**
typicky rukavice po použití, silně rizikové
- **PES (polyester)**
roušky, pláště, krytí ran, jednorázové textilie
- **PU (polyuretan)**
krytí ran, katétry, pěny, materiály v přímém kontaktu s pacientem

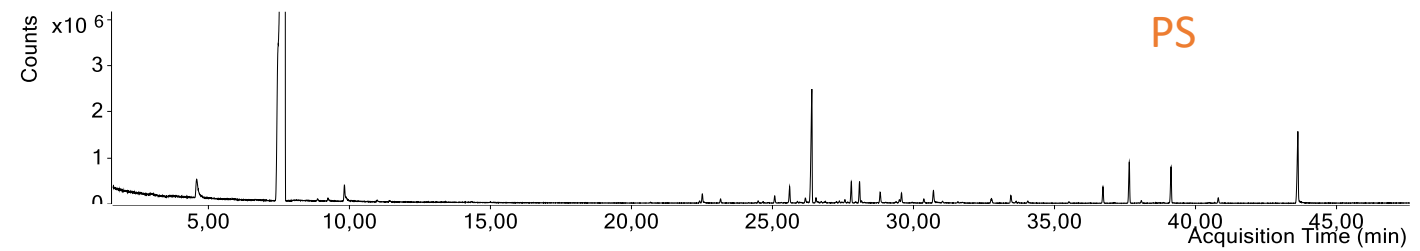
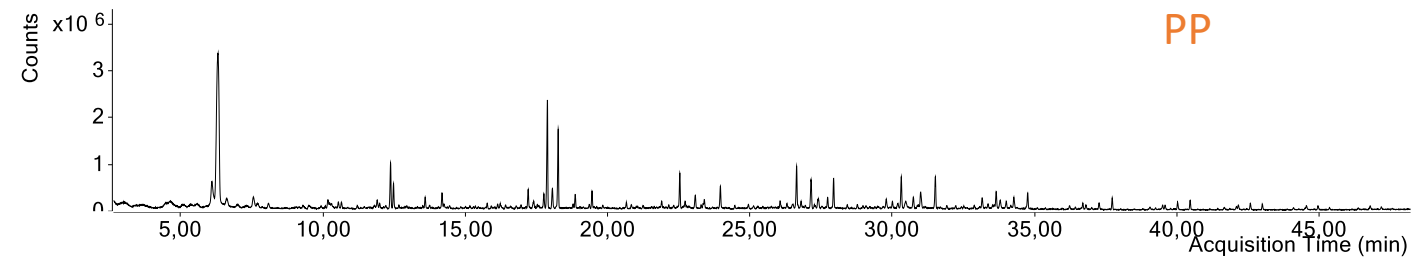
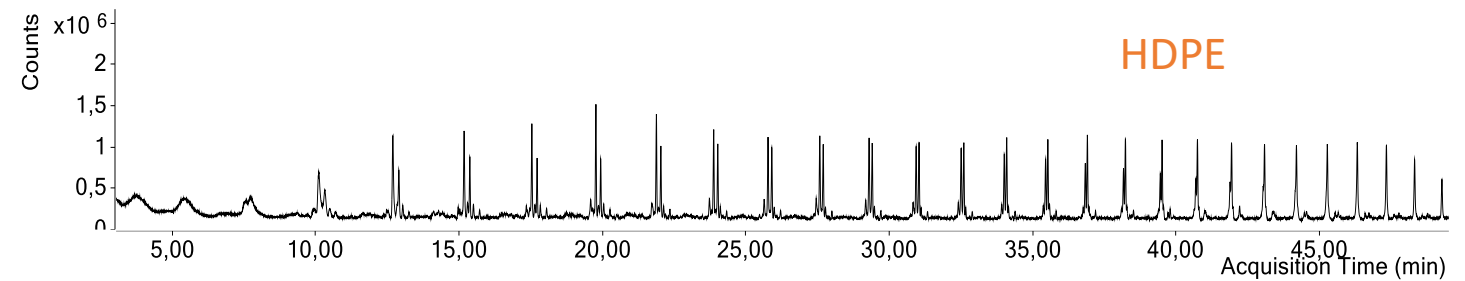
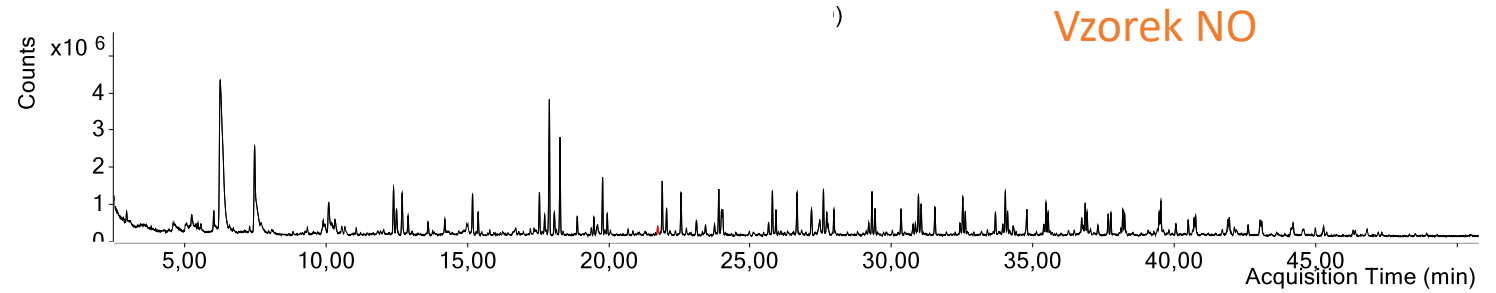
- **PE (polyetylén) (často také)**
sáčky na infekční odpad, kontaminované obaly, zástěry
- **NS (nespecifikovaný materiál)**
obvykle směsný kontaminovaný odpad automaticky rizikový

VC4 - Mikropyrolýza



Navážka vzorku cca 0,25 mg
Teplota pyrolýzy 500 °C

Možnost katalytické mikropyrolýzy



VC4 - Mikropyrolýza



VC4 - Charakterizace vstupního materiálu

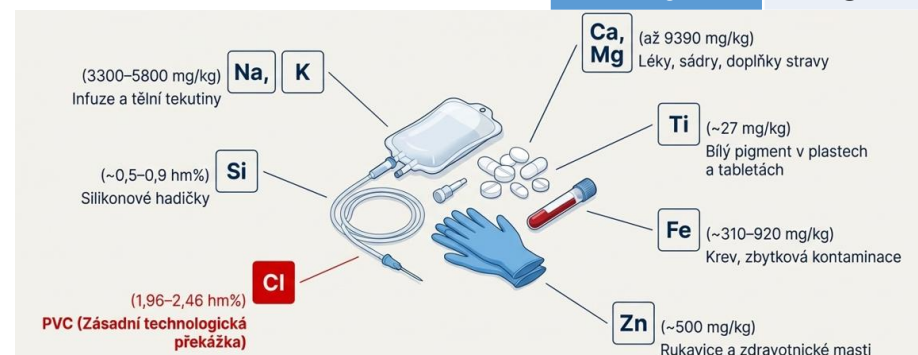
2 vzorky z roku 2024 a 2025

Prvková analýza (XRF, ICPMS...)

Prvek	IK2024 (hm %)	IK2025 (hm %)
C	65,10	66,40
H	9,57	9,58
S	0,48	0,33
N	0,51	0,52
O	-	-

Prvek	IK2024 (hm %)	IK2025 (hm %)
Cl	2,46	1,96
Si	0,94	0,54

Prvek [mg/kg]	IK2024	RSD [%]	IK2025	RSD [%]
Ca	8400	8	9390	4
Na	3300	10	5800	6
Al	1500	9	950	4
Fe	920	2	310	2
K	510	8	630	5
Zn	500	8	590	4
Mg	410	11	450	4
P	200	11	260	4
Cr	120	1	46	3
Cu	37	12	43	5
Ti	27	31	29	6
Mn	15	12	10	4
Ni	3	13	2	15
Pb	3	12	3	2



VC4 - Heteroatomy v pyrolýzních produktech

Hlavní negativní dopady: Koroze aparatury, deaktivace katalyzátorů, zanášení procesních jednotek a degradace kvality pyrolýzního oleje...

Klíčové heteroatomy a jejich rizika při pyrolýze plastů

- **Halogeny (Cl, Br, F):**

- **Chlor (Cl):** Nejagresivnější prvek, pochází zejména z PVC a aditiv; způsobuje silnou korozi a otravu katalyzátorů.

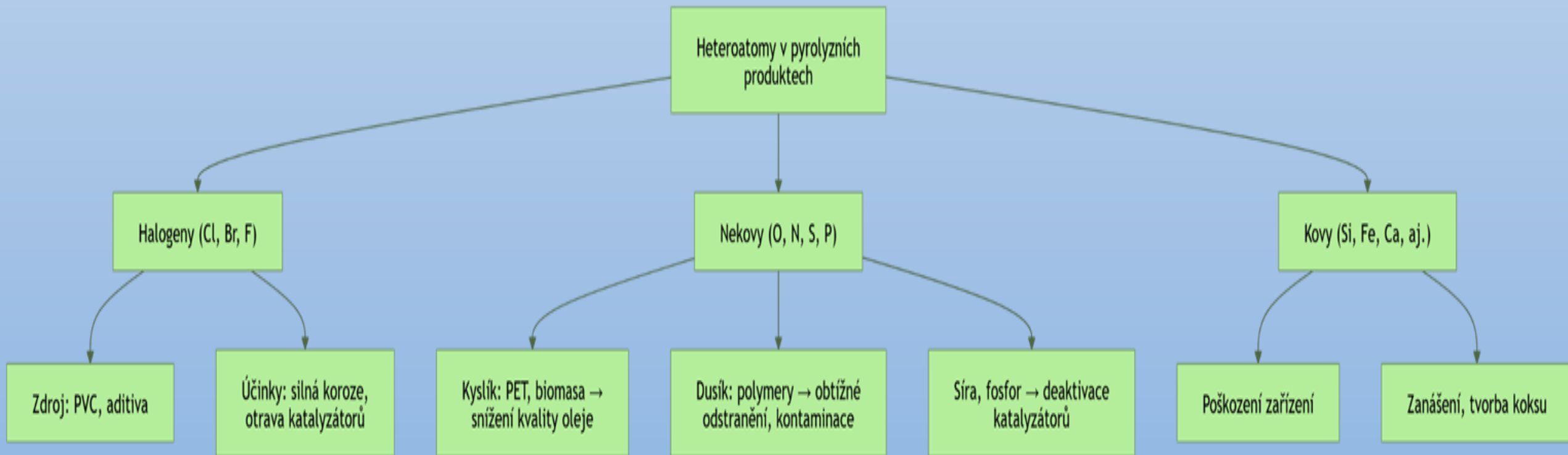
- **Nekovy (O, N, S, P):**

- **Kyslík:** Pochází z PET, biomasy (celulózy) a aditiv; snižuje kvalitu oleje a vede k tvorbě nežádoucích vedlejších produktů.
- **Dusík:** Přítomen v polyuretanu, polyamid, NBR; obtížně se odstraňuje (vysoká stabilita vazeb) a znečišťuje výsledný produkt.
- **Síra a fosfor:** způsobují deaktivaci katalyzátorů v navazujících procesech.

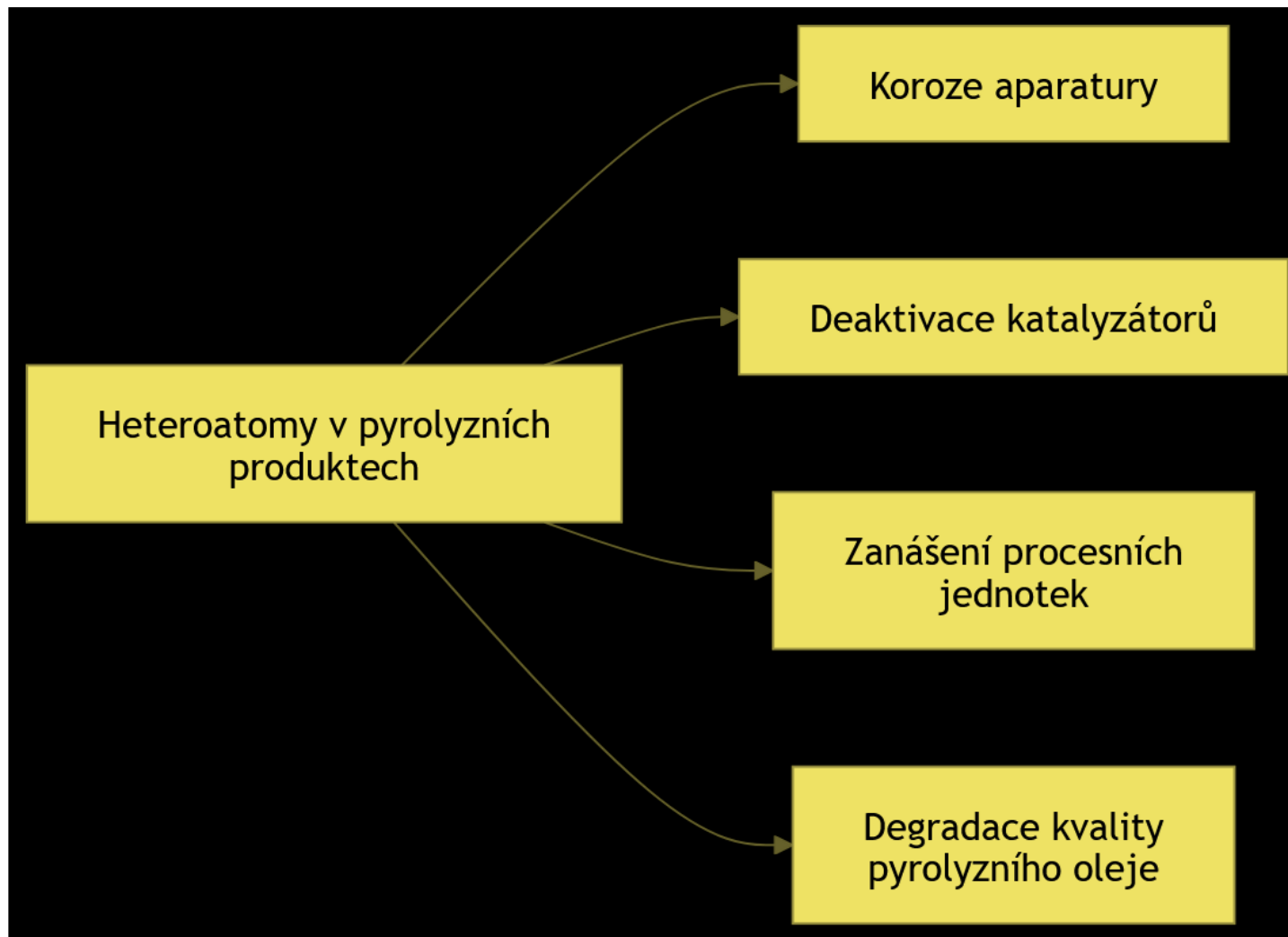
- **Kovy a další prvky (Si, Fe, Ca, aj.):**

- Poškozují technologická zařízení.
- Způsobují zanášení jednotek a tvorbu koksu aj.

VC4 – Výskyt heteroatomů v pyrolyzních produktech a jejich rizika

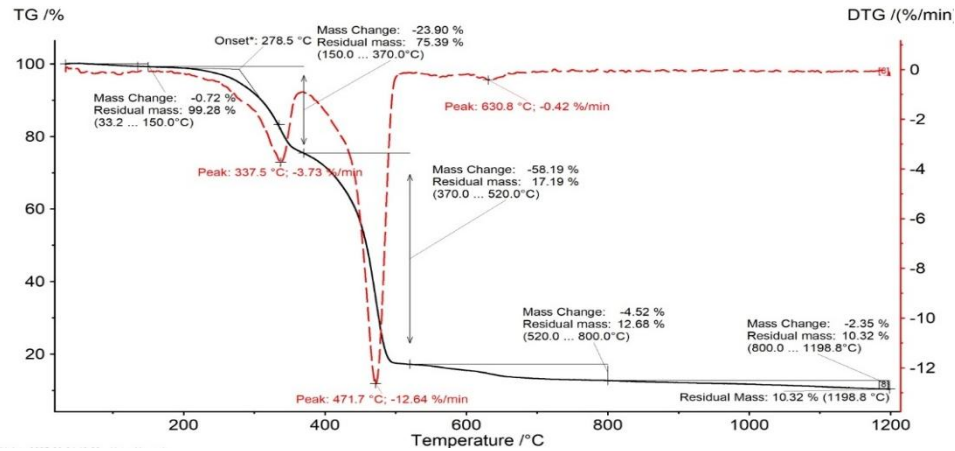


VC4 – Co způsobují heteroatomy v pyrolyzních produktech ?

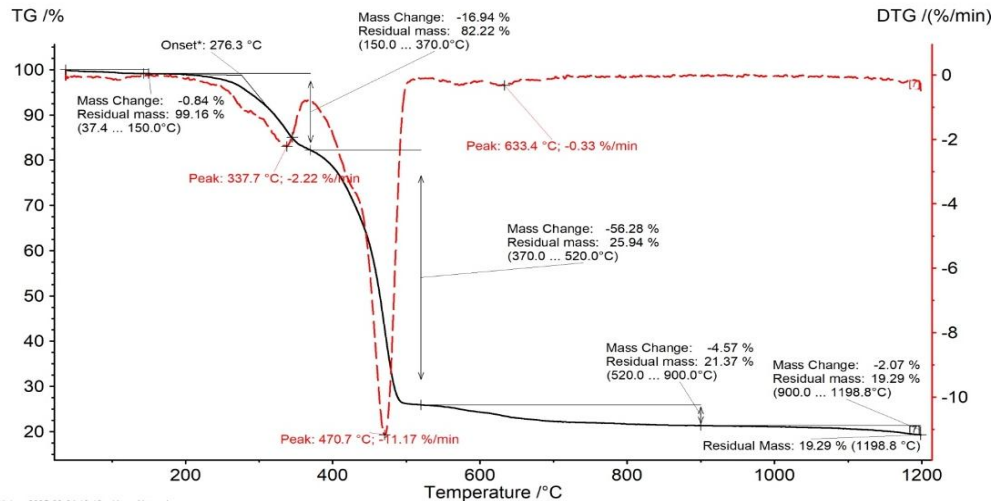
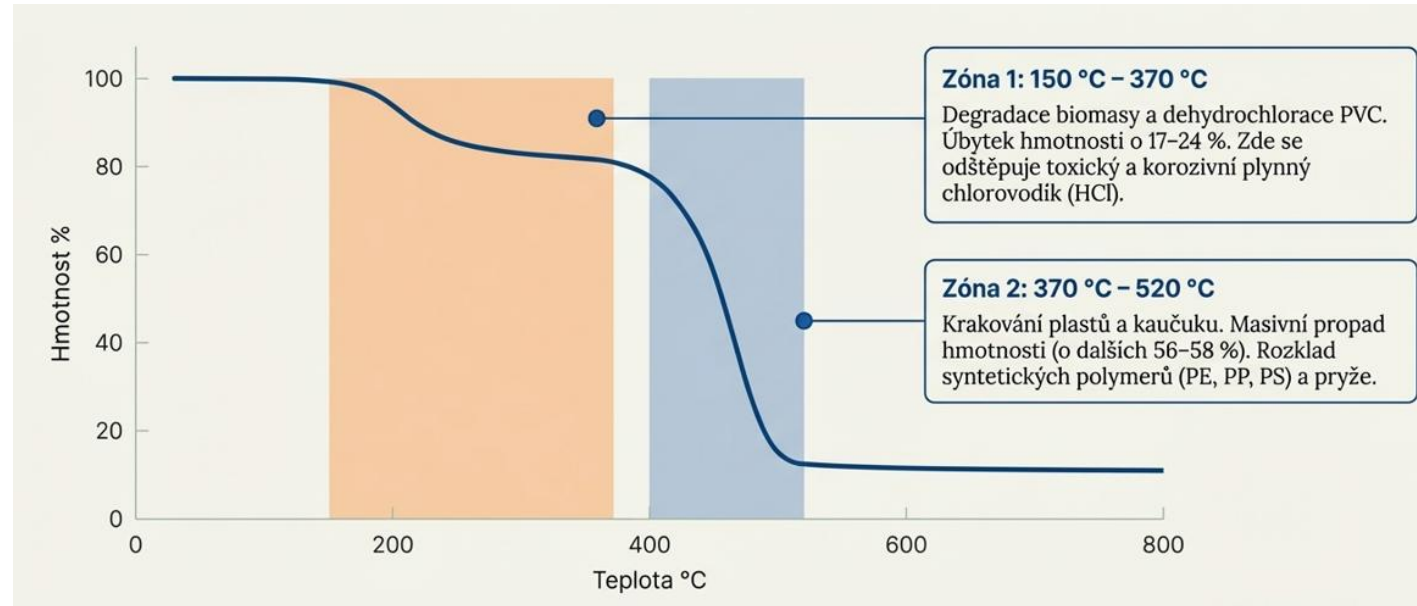


VC4 - Charakterizace vstupního materiálu

- 2 druhy odpadu: z roku 2024 a 2025

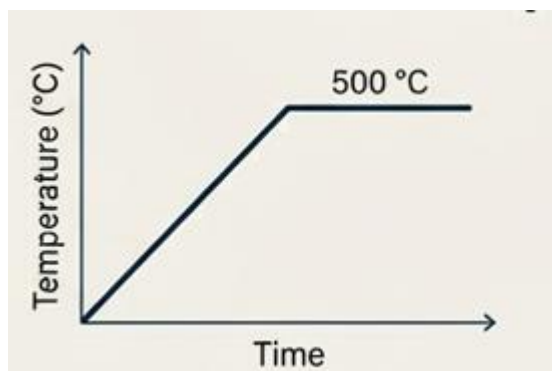


DTG – derivační termogravimetrie

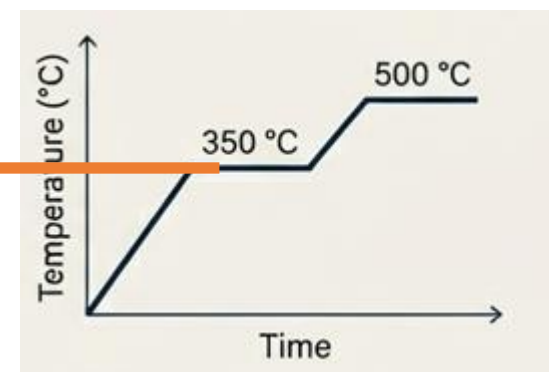


VC4 - Pyrolýza

Parametry	Konvenční
Hmotnost vsádky	160 g
Rychlost ohřevu	10 °C/min
Průtok dusíku	5 l/hod
Finální teplota	500 °C
Celková doba	4 hodiny



Parametry	Kroková
Hmotnost vsádky	160 g
Teplota I. kroku	350 °C (1 hod)
Průtok dusíku v I. kroku	60 l/hod (historická záležitost)
Průtok dusíku v II. Kroku	5 l/hod
Finální teplota	500 °C
Celková doba	5 hod

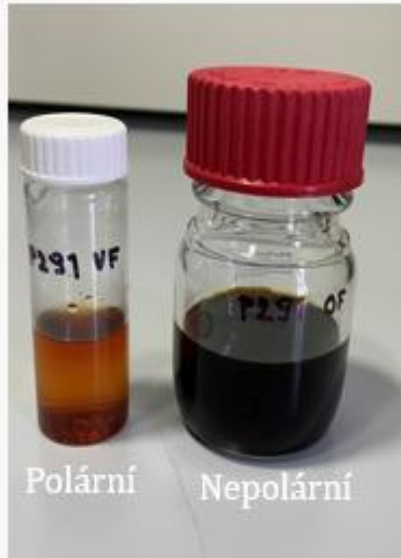


Uvolnění části
halogenů, O, S, P ...



VC4 - Výsledek

Konvenční



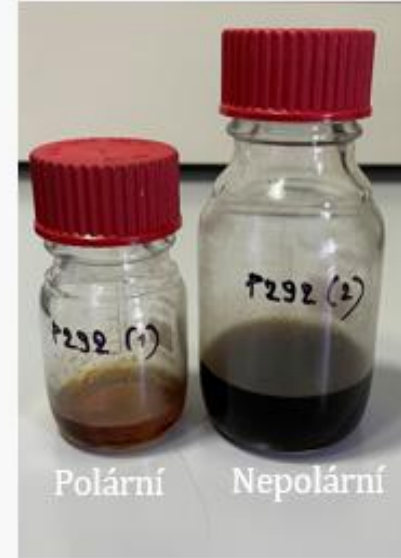
- pH nepolární: 5-6
- pH polární: 4-5



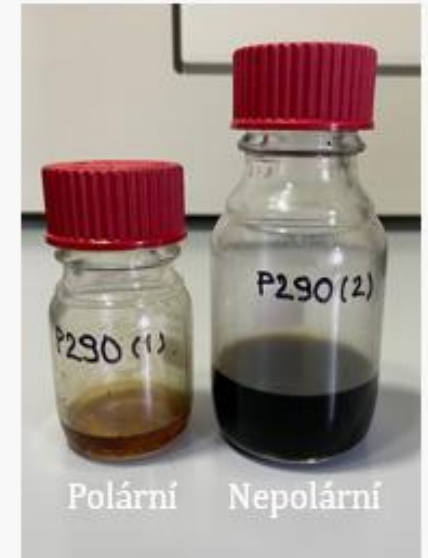
- pH nepolární: 5-6
- pH polární: 4

- **Polární: $27,8 \pm 3,6$ %**
- **Nepolární: $17,6 \pm 3,2$ %**
- Plyn: $33,8 \pm 1,3$ %
- **Struska: $20,5 \pm 1,6$ %**

Kroková



- pH nepolární: 5-6
- pH polární: 3-4

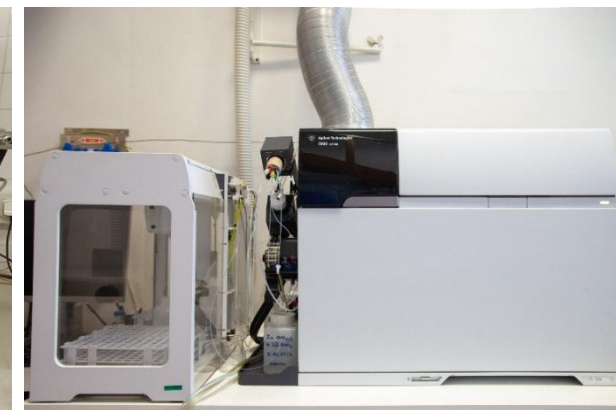
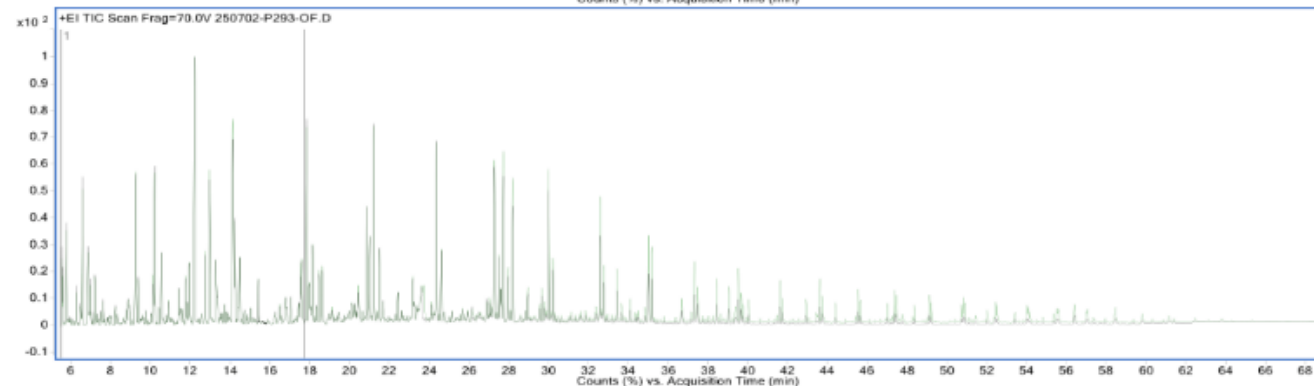
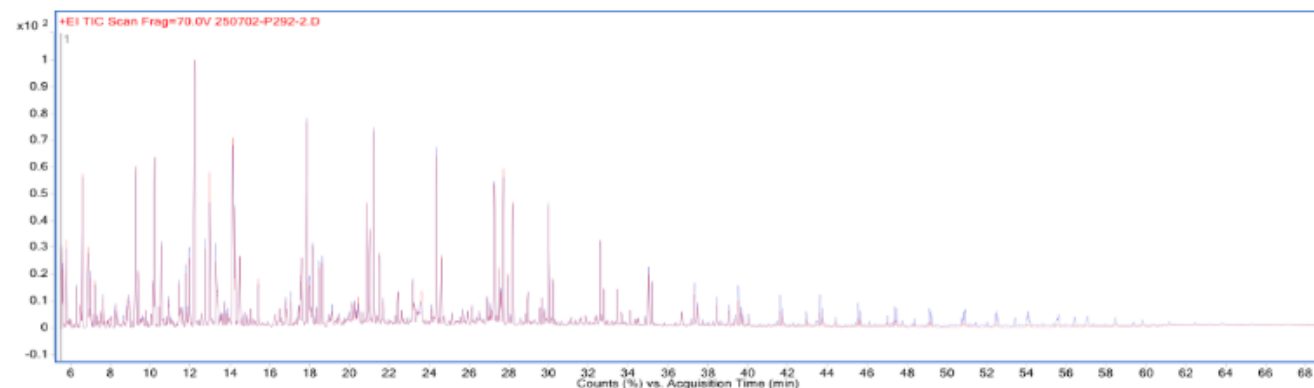


- pH nepolární: 5-6
- pH polární: 3-4

- **Polární: $10,1 \pm 0,1$ %**
- **Nepolární: $35,7 \pm 4,4$ %**
- Plyn: $33,8 \pm 4,9$ %
- **Struska: $20,4 \pm 0,6$ %**

VC4 -Co dál? Charakterizace vzniklých produktů pyrolýzy.

- Skupinová charakterizace + zastoupení jednotlivých látek (GC-MS)
- Stanovení Cl
- Prvkové zastoupení (ICP-MS)



VC4 - Závěr

- Nemocniční odpad představuje různorodou směs materiálů, která je zdrojem nežádoucích heteroatomů ovlivňující pyrolýzní produkty.
- Konvenční i krokovou pyrolýzou byly připraveny pyrolýzní oleje, kdy krokovou pyrolýzou byly získány polární (vodná) frakce 10 hm % a nepolární frakce 35 hm %.
- Charakterizace výsledných produktů.

Plány do budoucna:

- Využití katalytické pyrolýzy pro odstranění heteroatomů + žádané produkty.

Závěr

Plány do budoucna:

- Využití katalytické pyrolýzy pro odstranění heteroatomů + žádané produkty.
- Využití **preparativní kapalinové chromatografie** → pro izolaci cenných chemikálií z kapalných produktů chemické recyklace
- Proč? Všechny **VC1-VC4** produkují kapalinu – komplexní směs organických látek, nutnost další separace.

Výzkumný záměr:

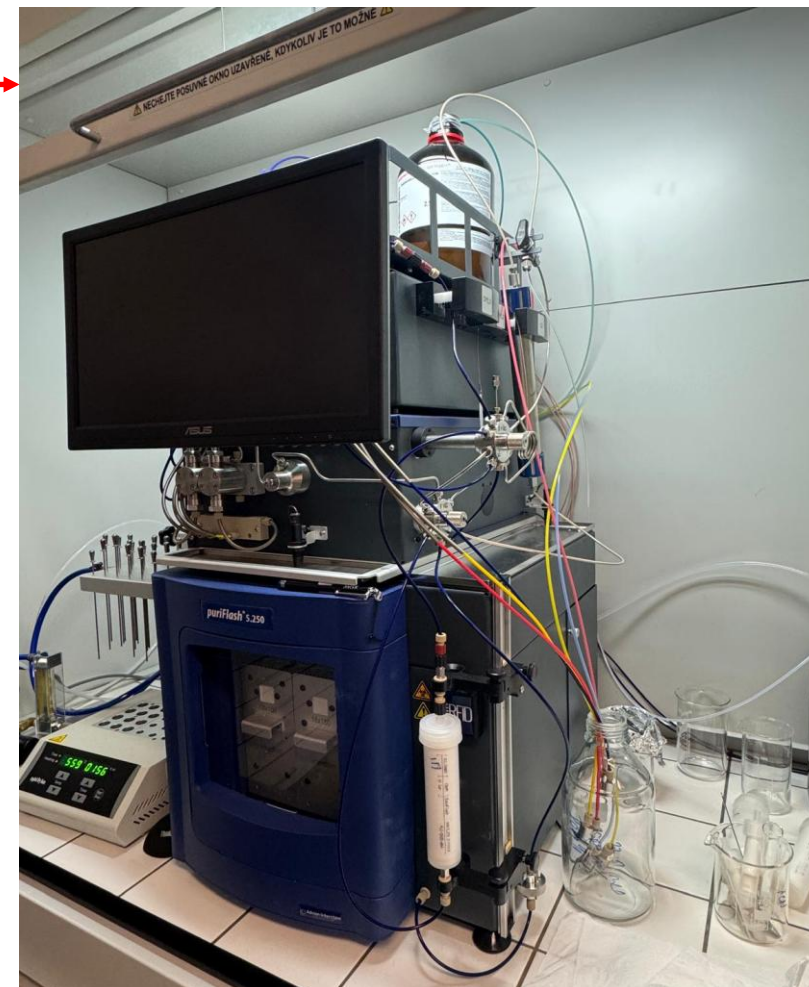
Vývoj metod chemické recyklace pro netradiční odpadní materiály

VC1: Recyklace směsných syntetických a viskózných odpadních vláken

VC3: Zhodnocení zemědělsky neupotřebitelné odpadní biomasy

VC2: Nový přístup k recyklaci pneumatik

VC4: Evaluace nemocničního odpadu





Spolufinancováno
Evropskou unií

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Děkuji za pozornost



Přednáška je výsledkem projektu OP JAK „**Evaluace netradičních odpadních surovin pokročilými recyklačními technologiemi (ESURET)**“ CZ.02.01.01/00/23_021/0009163, který je spolufinancován Evropskou unií z Evropského fondu pro regionální rozvoj prostřednictvím Operačního programu JAK.

INDORAMA
VENTURES

UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM



simple engineering s.r.o.