



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Žilina, 2024

Ing. Andrej Klačko



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Andej Klačko

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Termické zhodnocovanie odpadov v pyrolýznom reaktore

Na získanie akademického titulu **d o k t o r**

(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v študijnom odbore Strojárstvo

v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre energetickej techniky.

Predkladateľ: Ing. Andrej Klačko
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Školiteľ: doc. Ing. Michal Holubčík, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Oponenti: 1. prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD.
2. prof. Ing. Peter Tauš, PhD.
3. doc. Ing. Peter Ďurčanský, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.08.2024 o 9.00 hod. v miestnosti BC 309 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD. v. r.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

ÚVOD

Automobilový priemysel generuje obrovské množstvo plastového odpadu, ktorý predstavuje vážnu environmentálnu výzvu. Skládkovanie a spaľovanie plastov so sebou prinášajú riziká znečistenia ovzdušia a pôdy, čím ohrozujú ľudské zdravie a ekosystémy. V tejto súvislosti sa pyrolýza, ako forma termického zhodnocovania plastov, javí ako alternatíva s potenciálom zhodnotiť materiály a energiu z plastového odpadu.

Táto dizertačná práca sa zameriava na komplexnú analýzu a optimalizáciu procesu pyrolýzy automobilových plastov. Cieľom je preskúmať vplyv rôznych parametrov, ako sú teplota, dĺžka trvania a atmosférické podmienky, na výsledné produkty pyrolýzy, vrátane plynov, kvapalín a pevných zvyškov. Dôkladná analýza zloženia a vlastností týchto produktov umožní posúdiť ich potenciálne využitie v rôznych priemyselných odvetviach. Experimentálna časť zahŕňa pyrolýzne merania rôznych typov automobilových plastov za kontrolovaných podmienok. Produkty pyrolýzy sa budú analyzovať pomocou moderných chromatografických techník, ako je plynová chromatografia s hmotnostnou spektrometriou (GC-MS), TGA, CHN a ďalšie.

Očakáva sa, že výsledky tejto dizertačnej práce prinesú cenné poznatky o procese pyrolýzy automobilových plastov a prispesú k optimalizácii podmienok pyrolýzy pre dosiahnutie maximálnej výťažnosti a kvality produktov. Zároveň sa posúdia environmentálne a ekonomické aspekty pyrolýzy, čím sa stanoví jej postavenie v porovnaní s alternatívnymi metódami spracovania plastového odpadu. Tieto poznatky by mohli slúžiť ako podklad pre rozvoj udržateľných riešení pre zhodnocovanie automobilových plastov a zníženie ich dopadu na životné prostredie.

Výťažok a zloženie plynu sú ovplyvnené predovšetkým zložením vsádzky, teplotou pyrolýzy, typom reaktora a aditívami. Pyrolýzny plyn je bohatý na uhlíkovodíky a jeho výhrevnosť je vysoká, približne 25-40 MJ.m⁻³, čo je ekvivalent k zemnému plynu.

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Odpadová politika v si v súčasnej dobe vyžaduje veľkú pozornosť. Cieľom dizertačnej práce, bolo poukázať na termické zhodnotenie automobilových plastov a premeniť ich pomocou pyrolýzy na palivá ako pyrolýzna kvapalina, pyrolýzny plyn, tuhý zvyšok, produkované pyrolýznym procesom.

Pre splnenie cieľa, bude potrebné vyriešiť nasledovné čiastkové úlohy:

- analýza energetického spracovania odpadu;
- analýza energetického potenciálu odpadu z automobilového priemyslu;
- pyrolýzne meranie automobilových plastov;
- analýza produktov pyrolýzy;

návrh matematického modelu pre hodnotenie vstupov/výstupov (hmotnosť vsádzky, energetická bilancia)

SPÔSOBY ENERGETICKÉHO ZHODNOCOVANIA ODPADU

Pojem „recyklácia odpadu“ označuje činnosť, ktorej cieľom je prospešné využitie odpadov na nahradenie iných materiálov vo výrobných činnostiach alebo v širšom hospodárstve. Jednou z činností recyklácie odpadu je príprava odpadu na opätovné použitie. To zahŕňa kontrolu, čistenie, opravu, kde sa výrobok alebo časť výrobku, ktorý sa stal odpadom, pripraví tak, aby sa dal znova použiť bez akéhokoľvek ďalšieho predbežného spracovania. (slovensko.sk, 2018)



Obrázok 1 Schéma nakladania s odpadmi (ewia, 2018)

V závislosti od optimálnej miery zhodnocovania možno rôznym druhom odpadu priradiť rôzne technológie. Napríklad pre sklo alebo kov je najudržateľnejším riešením recyklácia materiálu. Pre bioodpad sú dostupné možnosti kompostovania a anaeróbnej digescie. Najlepšiu energetickú účinnosť má v ZEVO zmesový odpad. Hoci žijeme vo „dobe plastov“, nevieme s konečnou platnosťou povedať, ktorá technológia je na ich posúdenie najlepšia. Najjednoduchším spôsobom je klasická materiálová recyklácia, no má aj svoje nevýhody. Okrem klasickej recyklácie poznáme aj chemickú recykláciu vo forme pyrolýzy alebo chemickej depolymerizácie. Treba si však uvedomiť, že chemická recyklácia plastov je nielen spojená s vysokými prevádzkovými finančnými nákladmi, ale je aj problémom pri plnení prísnych emisných limitov. (Zhodnocovanie odpadu, 2018)

Tabuľka 1 Zoznam činností zhodnocovania odpadu podľa prílohy č. 1 zákona č. 79/2015 Z. z (Zhodnocovanie odpadu, 2018)

Kód:	Zhodnocovanie odpadu
R1	Využitie najmä ako palivo alebo na získavanie energie iným spôsobom
R2	Spätné získavanie alebo regenerácia rozpúšťadiel
R3	Recyklácia alebo spätné získavanie organických látok, ktoré sa nepoužívajú ako rozpúšťadlá (vrátane kompostovania a iných biologických transformačných procesov) (Patrí sem aj splyňovanie a pyrolýza využívajúce zložky ako chemické látky.)
R4	Recyklácia alebo spätné získavanie kovov a kovových zlúčenín
R5	Recyklácia alebo spätné získavanie iných anorganických materiálov (Patrí sem aj čistenie pôdy, ktorého výsledkom je jej obnova, a recyklácia anorganických stavebných materiálov.)
R6	Regenerácia kyselín a zásad
R7	Spätné získavanie komponentov používaných pri odstraňovaní znečistenia
R8	Spätné získavanie komponentov z katalyzátorov
R9	Prečisťovanie oleja alebo jeho iné opätovné použitie
R10	Úprava pôdy na účel dosiahnutia prínosov pre poľnohospodárstvo alebo na zlepšenie životného prostredia
R11	Využitie odpadov vzniknutých pri činnostiach R1 až R10
R12	Úprava odpadov určených na spracovanie niektorou z činností R1 až R11 (Ak neexistuje iný vhodný R-kód, môžu sem patriť predbežné činnosti pred zhodnocovaním, vrátane predbežnej úpravy, okrem iného napríklad rozoberanie, triedenie, drvenie, stláčanie, peletizácia, sušenie, šrotovanie, kondicionovanie, opätovné balenie, triedenie, miešanie a zmiešavanie pred podrobením sa ktorejkoľvek z činností R1 až R11.)
R13	Skladovanie odpadov pred použitím niektorej z činností R1 až R12 (okrem dočasného uloženia pred zberom na mieste vzniku)

PYROLÝZA

Pod pojmom pyrolýza rozumieme tepelné spracovanie odpadov, ktoré sa vykonáva v pyrolýznom reaktore v rozmedzí teplôt od 250 až do 1650 °C bez prístupu vzduchu a pri zníženom atmosférickom tlaku. Podľa teploty delíme pyrolýzny proces na nízko teplotný (pod 500 °C), stredno teplotný (500-800 °C) a vysoko teplotný (nad 800 °C).

Pyrolýzny reaktor môže byť vyhrievaný externe cez plášť alebo zvnútra horúcim inertným plynom alebo prehriatou vodnou parou. Pyrolýza sa uplatňuje najmä pri zneškodňovaní rizikových odpadov akými sú rôzne plastové výrobky alebo pneumatiky. Tento proces môžeme využiť aj pri spracovaní biomasy a to zvyčajne pri teplotách od 300 do 500 °C. Výsledné produkty sú pyrolýzny olej a pyrolýzny plyn obsahujúci napríklad

metán, vodík, alebo oxid uhličitý. Tieto produkty by bolo možné ďalej využiť pri výrobe benzénu, toluénu alebo pri výrobe tepla a elektrickej energie spaľovaním v kotloch respektíve kogeneračných jednotkách. V prípade biomasy je výsledným produktom drevené uhlie. Na urýchlenie pyrolýzy sa môžu privádzať do reaktora spaliny z iného zdroja akým je kotol alebo splyňovacie zariadenie. V takomto prípade sa ale v spalinách vyskytuje určité množstvo kyslíka, preto sa nejedná o čisto pyrolýzny proces ale hovoríme o „pseudopyrolýze“. (Jandačka, J. a kol., 2014)

Všeobecne podľa teploty pri procese môžeme povedať, že pri nízkoteplotnej pyrolýze je zádržná doba materiálu v reaktore najdlhšia a vedie k vysokému podielu koksu. Nazýva sa aj karbonizačná pyrolýza. Strednoteplotná alebo aj „rýchla pyrolýza“ sa vyznačuje najkratšou zádržnou dobou a produkuje primárne kvapalné produkty. Pri vysokoteplotnej (splyňovacej) pyrolýze je zádržná doba stredná a hlavným produktom je pyrolýzny plyn. Pre nízkoteplotnú metódu sa používajú karbonizačné pece. Strednoteplotná a vysokoteplotná metóda je praktizovaná vo fluidných peciach na princípe reaktora. (envirovid.eu, 2022)

Technológiou pyrolýznych reaktorov sa zaoberá aj firma Beston Group, ktorá stojí za realizáciou projektov pyrolýznych staníc vo viac ako 40 krajinách po celom svete. V ponuke má horizontálny rotačný alebo pevný pyrolýzny reaktor vhodný na spracovanie použitých pneumatík alebo plastov. Rotačný typ sa v pracovnom režime otáča o 360°. Otočným režimom sa zabezpečí rovnomerné premiešanie materiálu a jeho ideálne ohriatie. Výrazne zlepšuje efekt pyrolýzy a urýchľuje produkciu pyrolýzneho oleja. Je vhodný pre polokontinuálnu prevádzku. Pevný alebo tzv. nerotačný reaktor využíva technológiu trubíc v tvare U, ktoré sú umiestnené vnútri reaktora a napomáhajú k efektívnosti produkcie. Tento typ je vhodný na nepretržitú prevádzku vďaka tomu, že dokáže zabezpečiť dávkovanie a vypúšťanie materiálu súčasne. Uplatňuje sa pri výrobe dreveného uhlia z biomasy. Garantovaná životnosť zariadení je 5-8 rokov. (bestoncompany.com, 2022)

ŽIVOTNÝ CYKLUS AUTOMOBILU

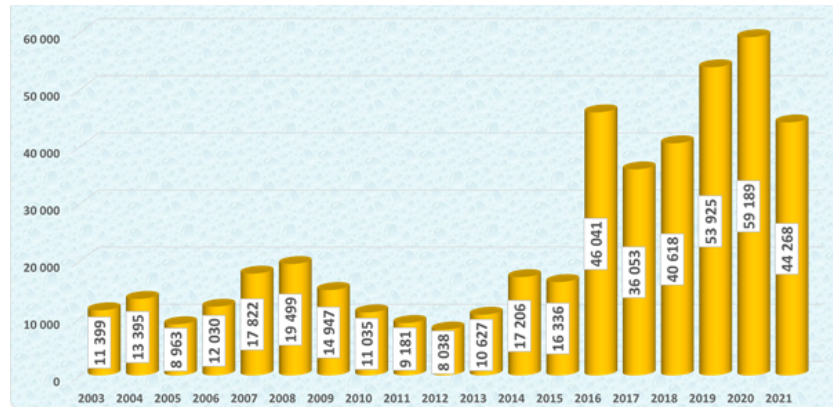
Automobil prechádza počas svojej existencie komplexným životným cyklom, ktorý zahŕňa viacero fáz, od výroby až po konečnú recykláciu. Každá fáza má vplyv na životné prostredie a je dôležité s ňou zaobchádzať zodpovedne.

Výroba automobilu je energeticky náročný a materiálovo náročný proces. Zahŕňa ťažbu surovín, spracovanie materiálov, lisovanie dielov, montáž a lakovanie. Táto fáza produkuje značné emisie skleníkových plynov a znečistenie ovzdušia.

Prevádzka automobilu je spojená s emisiami výfukových plynov, ktoré prispievajú k znečisteniu ovzdušia a zmene klímy. Spotreba paliva má tiež vplyv na zdroje energie a emisie skleníkových plynov. Počas životnosti automobilu je potrebná pravidelná údržba, ktorá zahŕňa výmenu oleja, pneumatík a iných komponentov. Táto údržba produkuje odpad a vyžaduje si spotrebu energie a materiálov.

Na konci životnosti sa automobily demontujú a recyklujú sa z nich rôzne materiály, ako napríklad oceľ, hliník, plasty a sklo. Recyklované materiály sa ďalej používajú na výrobu nových produktov, čím sa znižuje potreba ťažby surovín. Recyklovanie automobilov je dôležitý proces, ktorý pomáha znižovať vplyv automobilového priemyslu na životné prostredie. Recyklované materiály šetria energiu, znižujú emisie skleníkových plynov a šetria zdroje.

V súčasnosti sa recykluje len približne 80% automobilov. Existuje však potenciál na zvýšenie tejto miery recyklácie zlepšením technológií recyklácie a sprísnením legislatívy. Životný cyklus automobilu je komplexný proces s vplyvom na životné prostredie. Je dôležité, aby sa s každou fázou tohto cyklu zaobchádzalo zodpovedne, s cieľom minimalizovať negatívny vplyv a maximalizovať recykláciu materiálov.



Obrázok 2 Vyraďené vozidlá z evidencie (Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky, 2024)

Trvalé vyraďenie vozidiel na Slovensku za posledných 5 rokov predstavuje cenný zdroj pre pyrolýzu. Tento proces umožňuje zhodnotiť materiály, ktoré by inak skončili na skládkach. Rastúci počet vyraďených vozidiel, najmä kvôli ich technickému stavu alebo dosiahnutému veku, ponúka príležitosť premeniť automobilové plasty, pneumatiky a iné komponenty na palivá, chemikálie a ďalšie užitočné produkty.

Hoci pyrolýza čelí v oblasti optimalizácie procesov a minimalizácie emisií, technologický pokrok ju robí čoraz atraktívnejšou metódou pre udržateľné nakladanie s

automobilovým odpadom. Integrácia pyrolýzy do procesu likvidácie vyradených vozidiel by mohla výrazne zlepšiť environmentálnu bilanciu automobilového priemyslu a podporiť obehové hospodárstvo.

Pyrolýza plastových karosárskych dielov

Prevedením vstupných testov, sme zistili parametre nastavenia pyrolýzneho procesu pre dané vzorky automobilových poťahov sedadla. Vstupné analýzy zahŕňali nasledovné analýzy: TGA, CHNS, výhrevnosť a spalné teplo.

Príprava vzoriek pred meraním

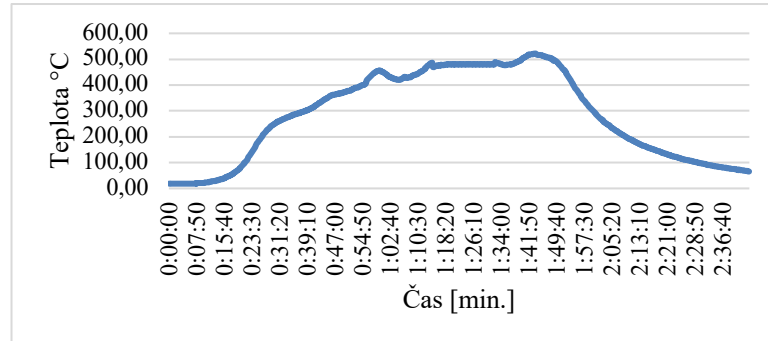
Po vykonaní vstupných analýz plastových karosárskych dielov, boli vzorky rozdrvené na menšie časti vhodné pre vsádzku do pyrolýzneho reaktora. Pred pyrolýzou sme zozbierali reprezentatívnu vzorku karosárskych plastov z automobilu. Vzorka obsahovala rôzne časti karosérie, ako sú nárazník, blatník, kapotáž a obloženia dverí. Dôkladne sme očistili plasty od všetkých nečistôt a cudzích látok, ako sú farby, lepidlá alebo kovové spojovacie prvky. Rozdrvili sme ich na malé kúsky s priemerom približne 2-5 mm, aby sme zväčšili povrchovú plochu plastu a uľahčili tepelný rozklad. Rozdrvené plasty sme vysušili v sušičke pri teplote 50-60°C po dobu 6 hodín, kým nedosiahli konštantnú hmotnosť. Po vysušení sme odvážili požadované množstvo usušeného rozdrveného plastu.

Bežná hmotnosť vzorky pre pyrolýzne meranie sa pohybovala v rozmedzí 250-300 g. Vzorku sme umiestnili do pyrolýzneho reaktora, ktorý je odolný voči vysokým teplotám a inertným plynom. Týmto postupom sme pripravili vzorku plastových karosárskych dielov na pyrolýzne meranie a analyzovali produkty pyrolýzy s cieľom získať cenné informácie o zložení a vlastnostiach materiálu.

Priebeh merania

Pri nastavení pyrolýzneho zariadenia pre plastové karosárske diely sme dôkladne zvážili niekoľko parametrov. Podľa analýzy TGA kriviek sme stanovili pyrolýznu teplotu na 485 °C a čas zotrvania po dosiahnutí pyrolýznej teploty 15 min., aby sme zabezpečili efektívny rozklad materiálov bez nadmernej tvorby nežiaducich produktov. Doba trvania pyrolýzy sa pohybovala od pár minút do niekoľkých hodín, v závislosti od typu materiálu a požadovaného stupňa rozkladu.

V reaktore sme použili inertnú atmosféru - dusík, aby sme zabránili oxidácii a horeniu materiálu. Rýchlosť ohrevu sme zvolili 6,5 °C/min, aby sme predišli nekontrolovanému rozkladu alebo zbytočnému predĺženiu procesu.



Obrázok 2 Časový priebeh merania

Tabuľka 2 Pyrolýzne meranie automobilových poťahov sedadla

Meranie	1.	2.
Hmotnosť vsádzky	294,5 g	321,6 g
Tuhý zvyšok	46,2 g	47,6 g
Kvapalina	86,9 g	177,1 g
Plyn	161,4 g	96,9 g
Čas merania	15 min	15 min

Získané produkty plastových karosárskych dielov

Po pyrolýznom spracovaní plastových karosárskych dielov sme získali pevný zvyšok, ktorý sme ďalej skúmali. Materiál, nazývaný char, predstavoval zmes uhlíka a anorganických látok, pričom jeho presné zloženie bolo ovplyvnené pôvodným materiálom a podmienkami pyrolýzy.

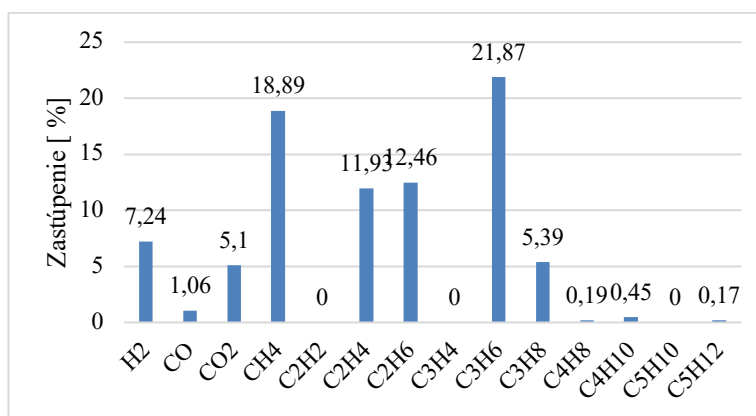
Analýzou charu sme zistili jeho potenciálne využitie v rôznych oblastiach. Vzhľadom na vysoký obsah uhlíka sme ho úspešne testovali ako palivo s nižšou výhrevnosťou. Okrem toho sme preverili jeho adsorpčné vlastnosti a zistili, že môže byť efektívne využitý na zachytávanie určitých typov znečisťujúcich látok.

Plynná fáza

Pri pyrolýznom spracovaní karosárskych automobilových dielov sme zaznamenali vznik plynnej fázy, ktorá bola významným produktom tohto procesu. Zistili sme, že zloženie tejto plynnej zmesi sa líšilo v závislosti od konkrétneho druhu spracovávaného materiálu a použitých podmienok pyrolýzy. Vo väčšine prípadov sme identifikovali vodík, metán, oxid uhoľnatý a oxid uhličitý ako dominantné zložky, avšak pozorovali sme aj prítomnosť ďalších uhl'ovodíkov a iných plyných látok v menších množstvách.



Obrázok 3 Horenie pyrolýzneho plynu v dopaľovacej komore



Obrázok 4 Obsah uhl'ovodíkov v plynnej zložke plastových karosárskych dielov

Analýza plynnej fázy získanej pyrolýzou plastových karosárskych dielov automobilov odhalila významné rozdiely v porovnaní s pyrolýzou syntetických poťahov sedadiel. Dominantnými zložkami v tomto prípade boli propén (C₃H₆) s obsahom 21,87 % a metán (CH₄) s obsahom 18,89 %, zatiaľ čo oxid uhličitý (CO₂) tvoril 5,1 %. Vodík (H₂) a etén (C₂H₄) boli tiež prítomné vo významných množstvách (7,24 % a 11,93 %).

Zaujímavé je, že v tejto vzorke sme zaznamenali len stopové množstvá alebo úplnú neprítomnosť etínu (C_2H_2), propínu (C_3H_4) a pentánu (C_5H_{12}), ktoré boli prítomné v plyne získanom z pyrolýzy pot'ahov sedadiel. Tento rozdiel môže byť spôsobený odlišným zložením plastov použitých v karosérii oproti pot'ahom sedadiel.

Spalné teplo plynu ($46,16 \text{ MJ.kg}^{-1}$) je výrazne vyššie ako pri pyrolýze pot'ahov sedadiel, čo naznačuje jeho väčší energetický potenciál. Napriek tomu, výhrevnosť ($16,44 \text{ MJ.kg}^{-1}$) zostáva podobná, čo môže byť spôsobené vyšším obsahom vodíka v plyne z karosérie. Hustota plynu ($1,2089 \text{ kg/m}^3$) je mierne nižšia ako pri pyrolýze pot'ahov sedadiel.

Vysoký obsah propénu a metánu naznačuje, že karosárske plasty môžu obsahovať polypropylén (PP) a polyetylén (PE), čo sú bežné plasty používané v automobilovom priemysle. Nízky obsah oxidu uhoľnatého (1,06 %) v porovnaní s pyrolýzou pot'ahov sedadiel môže byť spôsobený odlišnými podmienkami pyrolýzy alebo odlišným zložením plastov.

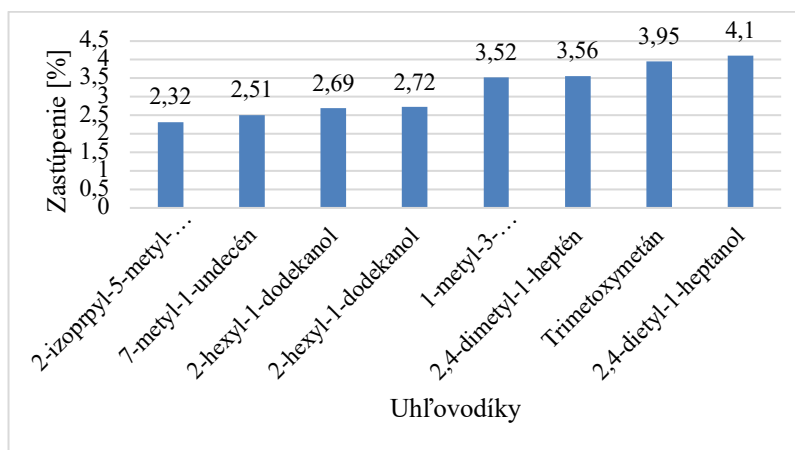
Aj keď výsledky analýzy plynnej fázy z pyrolýzy karosárskych plastov sú sľubné, je potrebné zdôrazniť, že pred praktickým využitím by bolo potrebné plyn ďalej upraviť. To by zahŕňalo odstránenie nežiaducich zložiek a optimalizáciu jeho zloženia pre konkrétne použitie.

Kvapalná fáza

Pri pyrolýznom spracovaní plastových karosárskych dielov automobilov sme získali kvapalnú produkciu, ktorú sme označili ako pyrolýzny olej. Analýzou sme zistili, že jeho zloženie bolo komplexné a pozostávalo z rôznych uhľovodíkov, aromatických zlúčenín a ďalších organických látok. Konkrétne zloženie oleja sa líšilo v závislosti od druhu spracovávaného plastu a podmienok pyrolýzy, čo naznačuje potenciál prispôbiť proces na získanie rôznych typov olejov s rôznymi vlastnosťami.



Obrázok 5 Kvapalná fáza plastových karosárskych dielov



Obrázok 2 Najviac zastúpené uhl'ovodíky v kvapalnej fáze

Analýza spektra získaného z merania pomocou spektrometra odhalila prítomnosť rôznorodých organických zlúčenín vo vzorke, pričom prevažnú väčšinu tvoria uhl'ovodíky a ich deriváty.

V oblasti s najnižším časom retencie (2,32) sa nachádza 2-izoprpyl-5-metyl-1-heptanol, čo je rozvetvený alkohol s desiatimi uhlíkmi v reťazci. Táto zlúčenina sa bežne používa ako zložka vonných kompozícií a môže byť prítomná v rôznych kozmetických a čistiacich prostriedkoch.

V oblasti medzi 2,51 a 2,72 sa nachádza skupina uhl'ovodíkov. 7-metyl-1-undecén (2,51) je nerozvetvený alkén s 12 uhlíkmi, ktorý sa môže nachádzať v niektorých ropných produktoch. 2-hexyl-1-dodekanol (2,69 a 2,72) je masťný alkohol s 18 uhlíkmi, ktorý sa môže vyskytovať v niektorých mazivách a olejoch.

V oblasti 3,52 sa nachádza 1-metyl-3-propylcyklooktán, čo je cyklický uhl'ovodík s dvoma substituentmi. Táto zlúčenina sa môže nachádzať v niektorých ropných produktoch a môže byť tiež produktom rozkladu niektorých polymérov.

V oblasti 3,56 sa nachádza 2,4-dimetyl-1-heptén, čo je nerozvetvený alkén s deviatimi uhlíkmi a dvoma metylovými skupinami. Táto zlúčenina sa môže nachádzať v niektorých ropných produktoch.

V oblasti 3,95 sa nachádza trimetoxymetán, čo je acetál kyseliny mravčej. Táto zlúčenina sa používa ako rozpúšťadlo a medziprodukt pri výrobe liečiv a pesticídov.

V oblasti 4,1 sa nachádza 2,4-dietyl-1-heptanol, čo je rozvetvený alkohol s 13 uhlíkmi. Táto zlúčenina sa môže nachádzať v niektorých mazivách a olejoch.

Je dôležité poznamenať, že táto analýza je len kvalitatívna a neposkytuje informácie o presných koncentráciách jednotlivých zlúčenín. Na kvantifikáciu by bolo potrebné použiť iné analytické metódy, ako napríklad plynovú chromatografiu s hmotnostnou spektrometriou (GC-MS).

Celkovo výsledky spektrálnej analýzy naznačujú, že vzorka obsahuje zmes rôznych organických zlúčenín, z ktorých väčšina sú uhľovodíky a ich deriváty. Prítomnosť niektorých zlúčenín, ako napríklad 2-izoprpyl-5-metyl-1-heptanol a metylester kyseliny benzoovej, môže naznačovať, že vzorka pochádza z kozmetického alebo čistiaceho prostriedku. Prítomnosť iných zlúčenín, ako napríklad 7-metyl-1-undecén, 2-hexyl-1-dodekanol a 1-metyl-3-propylcyklooktán, môže naznačovať, že vzorka obsahuje ropné produkty alebo ich deriváty. Prítomnosť trimetoxymetánu môže naznačovať, že vzorka bola kontaminovaná rozpúšťadlom alebo inou chemikáliou.

Tuhý zvyšok

Pevný zvyšok, ktorý zostáva po pyrolýznom spracovaní karosárskych dielov automobilov, označovaný ako char, predstavuje komplexnú zmes materiálov. Jeho hlavnou zložkou je uhlík, avšak obsahuje aj rôzne anorganické látky, ktorých presné zloženie závisí od pôvodných materiálov použitých pri výrobe karosérie (ocel, hliník, plasty) a špecifických podmienok pyrolýzy.

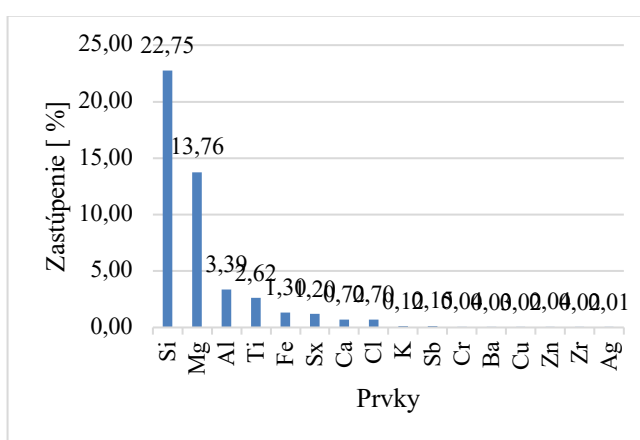
Char je charakteristický svojou tmavou farbou a pórovitou štruktúrou. Vďaka prítomnosti kovov a ďalších prvkov, ktoré pochádzajú z aditív a farbív použitých pri výrobe karosérie, môže mať char špecifické vlastnosti.

Tento zvyšok má široké možnosti využitia. Vzhľadom na vysoký obsah uhlíka môže slúžiť ako palivo, hoci s nižšou výhrevnosťou v porovnaní s tradičnými palivami. Jeho pórovitá štruktúra ho predurčuje na využitie ako adsorbent, schopný zachytávať rôzne znečisťujúce látky z plynov alebo kvapalín. Okrem toho sa char môže uplatniť ako plnivo v kompozitných materiáloch, čím sa zvyšuje ich pevnosť a odolnosť.

Využitie charu z pyrolýzy karosárskych dielov prispieva k zhodnocovaniu odpadových materiálov a znižovaniu environmentálnej záťaže spojenej s likvidáciou automobilového odpadu.



Obrázok 3 Tuhý zvyšok po pyrolýze plastových karosárskych dielov



Obrázok 4 Prvkové zloženie tuhého zvyšku plastových karosárskych dielov [m/m%]

Po vykonaní pyrolýznej analýzy plastových karosárskych dielov automobilov sme získali pevný zvyšok (char), ktorý sme podrobili elementárnej analýze pomocou EDXRF spektrometra. Výsledky odhalili komplexné zloženie tohto materiálu, pričom dominantné zastúpenie mal kremík (Si - 22,75 %). Kremík je bežnou súčasťou rôznych typov plastov, najmä silikónov a niektorých technických plastov, čo naznačuje, že analyzovaný materiál mohol byť pôvodne tvorený plastovým kompozitom s obsahom tohto prvku.

Druhým najviac zastúpeným prvkom bol horčík (Mg - 13,76 %), ktorý sa v plastoch často používa ako plnivo alebo stabilizátor. Prítomnosť hliníka (Al - 3,39 %) by mohla súvisieť s použitím hliníkových pigmentov v pôvodnom plaste alebo s prítomnosťou hliníkových častí v karosérii. Titán (Ti - 2,62 %) sa bežne používa ako biely pigment v plastoch a farbách, čo by mohlo vysvetľovať jeho prítomnosť vo vzorke.

Železo (Fe - 1,3 %) a síra (Sx - 1,2 %) pravdepodobne pochádzajú z kovových častí karosérie alebo z prísad do plastov, ako sú farbivá alebo stabilizátory. Vápnik (Ca - 0,72 %),

chlór (Cl - 0,30 %) a draslík (K - 0,12 %) mohli byť prítomné v pôvodnom materiáli v stopových množstvách alebo sa do vzorky dostali ako kontaminanty počas procesu pyrolýzy.

Prítomnosť antimónu (Sb - 0,15 %) je obzvlášť zaujímavá, pretože tento prvok sa často používa ako retardér horenia v plastoch. To potvrdzuje naše predpoklady o zložení pôvodného materiálu a naznačuje, že karosárske diely boli pravdepodobne vyrobené z plastu s protipožiarnymi vlastnosťami. Stopové množstvá chrómu (Cr), bária (Ba), medi (Cu), zinku (Zn), zirkónia (Zr) a striebra (Ag) mohli byť prítomné v pôvodnom materiáli alebo sa do vzorky dostali ako kontaminanty.

Celkovo výsledky analýzy ukázali, že pevný zvyšok (char) z pyrolýzy plastových karosárskych dielov automobilov je komplexná zmes prvkov s rôznym pôvodom. Ďalší výskum by sa mal zamerať na podrobnejšiu analýzu jednotlivých zložiek charu, aby sme lepšie pochopili ich zloženie, pôvod a potenciálne využitie.

ENVIRONMENTÁLNE ASPEKTY

Pozitívne environmentálne aspekty

Pyrolýza automobilových plastov prináša významné environmentálne výhody. V prvom rade umožňuje spracovať aj zmiešané plasty, ktoré sú tradičnými metódami ťažko recyklovateľné, čím sa znižuje objem odpadu končiaceho na skládkach a pozitívne ovplyvňuje kvalitu pôdy a podzemných vôd. Ďalšou výhodou je výrazné zníženie emisií skleníkových plynov v porovnaní so spaľovaním. Pyrolýza prebieha bez prístupu kyslíka, čo zabraňuje úplnému spáleniu uhlíka na CO₂. Navyše, niektoré produkty pyrolýzy, ako napríklad vodík, môžu slúžiť ako čisté palivá, čím sa ďalej znižuje uhlíková stopa.

Pyrolýza tiež umožňuje produkciu alternatívnych palív. Z plastového odpadu možno získať kvapalné uhľovodíky (pyrolýzny olej), syntetický plyn a pevný uhlíkový zvyšok (char). Pyrolýzny olej je možné ďalej rafinovať na benzín, naftu alebo iné kvapalné palivá, syntetický plyn sa dá využiť na výrobu elektriny či tepla a char ako palivo v priemyselných procesoch. V neposlednom rade, pyrolýza prispieva k zhodnoteniu materiálov. Z plastového odpadu sa získavajú cenné suroviny, ktoré možno použiť na výrobu nových produktov. Napríklad, pyrolýzny olej slúži ako surovina pre chemický priemysel, zatiaľ čo char môže byť použitý ako adsorbent alebo plnivo v kompozitných materiáloch. Týmto spôsobom pyrolýza podporuje obehové hospodárstvo, kde sa odpad stáva zdrojom.

Negatívne environmentálne aspekty

Pyrolýza, hoci environmentálne výhodnejšia ako spaľovanie, nie je bez rizík. Môže produkovať škodlivé látky ako polyaromatické uhľovodíky (PAH), ťažké kovy a dioxíny, ktoré majú negatívny vplyv na zdravie a prostredie. Preto je nevyhnutné dôkladné čistenie pyrolýzneho plynu a oleja pred ich použitím.

Ďalším aspektom je energetická náročnosť procesu. Vysoké teploty potrebné na rozklad plastov vyžadujú značnú energiu. Ak táto energia pochádza z fosílnych palív, môže to zvýšiť uhlíkovú stopu pyrolýzy. Riešením je optimalizácia procesu a využitie obnoviteľných zdrojov energie alebo odpadového tepla.

Potenciálne riziká sú spojené aj s nesprávnym zaobchádzaním s produktmi a odpadmi pyrolýzy. Nesprávne skladovanie alebo likvidácia pyrolýzneho oleja môže kontaminovať pôdu a vodu. Dodržiavanie prísnych bezpečnostných opatrení a správna likvidácia odpadu sú preto nevyhnutné.

EKONOMICKÁ ANALÝZA PYROLÝZY AUTOMOBILOVÝCH PLASTOV

Pyrolýza automobilových plastov, proces tepelného rozkladu plastov bez prístupu kyslíka, sa javí ako sľubná metóda recyklácie a zhodnocovania plastového odpadu v automobilovom priemysle. Avšak, pre úspešné komerčné využitie tejto technológie je nevyhnutné dôkladné posúdenie jej ekonomickej životaschopnosti. Komplexná ekonomická analýza zahŕňa detailné zhodnotenie všetkých nákladov a potenciálnych príjmov spojených s celým procesom pyrolýzy.

Nákladová stránka pyrolýzy

Investície do infraštruktúry a technológií sú jedným z najvýznamnejších nákladov. Výstavba a inštalácia pyrolyzného zariadenia, najmä pri väčších a komplexnejších systémoch, si vyžaduje značné finančné prostriedky. Náklady na špeciálne reaktory, systémy ohrevu, kondenzátory a ďalšie komponenty môžu byť vysoké.

Prevádzkové náklady predstavujú ďalšiu dôležitú položku. Spotreba energie na ohrev reaktorov a udržanie požadovaných teplôt je významným faktorom. Okrem toho, nákup a obnova katalyzátorov, pravidelná údržba zariadenia a mzdy kvalifikovaných pracovníkov zvyšujú prevádzkové náklady.

Zber, triedenie a pređuprava plastového odpadu sú ďalšie nevyhnutné kroky, ktoré však prinášajú svoje vlastné náklady. Náklady na zber a prepravu odpadu, jeho triedenie

podľa typu a odstránenie nečistôt môžu byť značné, najmä ak odpad nie je dobre vytriedený a obsahuje kontaminanty.

Environmentálne aspekty pyrolýzy tiež ovplyvňujú ekonomickú stránku. V prípade potreby čistenia emisií vznikajúcich pri pyrolýze sa náklady na prevádzku zariadenia ešte zvyšujú. Inštalácia a prevádzka systémov na zachytávanie a čistenie plyných a tuhých emisií predstavujú dodatočné investície a prevádzkové náklady.

Príjmová stránka pyrolýzy

Napriek značným nákladom ponúka pyrolýza aj potenciál pre významné príjmy. Predaj pyrolýznych produktov je kľúčovým zdrojom príjmov. Pyrolýzny olej, plyn a pevný zvyšok (char) majú rôzne využitie a môžu byť predávané na trhu. Pyrolýzny olej môže byť využitý ako palivo alebo surovina pre chemický priemysel, pyrolýzny plyn môže byť použitý na výrobu energie a char môže nájsť uplatnenie ako materiál v stavebníctve alebo ako sorbent.

Okrem priamych príjmov z predaja produktov môže pyrolýza priniesť aj nepriame ekonomické výhody. Zníženie nákladov na likvidáciu plastového odpadu je významným faktorom. Namiesto platenia za skládkovanie alebo spaľovanie odpadu, pyrolýza ponúka možnosť jeho zhodnotenia a premeny na cenné produkty.

Celková ekonomická bilancia

Celková ekonomická bilancia pyrolýzy automobilových plastov je zložitá a závisí od mnohých faktorov. Cena plastového odpadu, cena produktov pyrolýzy na trhu, náklady na prevádzku zariadenia, náklady na čistenie emisií a vládne stimuly alebo dotácie sú len niektoré z faktorov, ktoré ovplyvňujú celkovú ekonomickú výhodnosť pyrolýzy.

Dôkladná ekonomická analýza, ktorá zohľadňuje všetky tieto faktory, je nevyhnutná pre posúdenie, či je pyrolýza automobilových plastov ekonomicky životaschopná v konkrétnych podmienkach. Táto analýza by mala zahŕňať detailné finančné modelovanie, analýzu citlivosti a posúdenie rizík.

NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU PRE HODNOTENIE VSTUPOV A VÝSTUPOV

Numerická simulácia pyrolýzneho procesu heterogénnych zmesí plastov predstavuje významnú výzvu v oblasti modelovania a optimalizácie recyklačných procesov. Hlavným problémom je komplexné zloženie týchto zmesí, ktoré pozostávajú z rôznych druhov plastov

s odlišnými fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. V súčasnosti dostupné numerické modely sú schopné simulovať iba homogénne vzorky, kde sa predpokladá rovnomerné rozloženie jednotlivých zložiek. Tento zjednodušený prístup však nezohľadňuje interakcie medzi rôznymi druhmi plastov, ktoré môžu významne ovplyvniť priebeh a výsledok pyrolýzneho procesu.

V heterogénnych zmesiach môže dochádzať k rôznym javom, ako je napríklad vzájomné ovplyvňovanie rýchlosti rozkladu jednotlivých zložiek, tvorba nových chemických zlúčenín alebo zmena fyzikálnych vlastností zmesi počas procesu. Tieto javy nie sú v súčasných modeloch zahrnuté, čo môže viesť k nepresným výsledkom a obmedzenej aplikovateľnosti modelov v praxi.

Cieľom bolo vytvoriť numerický model, ktorý dokáže predpovedať, koľko a akých výťažkov získame po pyrolýze. Zároveň sme chceli nájsť spôsob, ako tento proces urobiť čo najúspornejší a najšetrnejší k životnému prostrediu.

Vytvorili sme numerický model, čo je súbor matematických rovníc a výpočtov, ktorý nám pomáha pochopiť, čo sa deje pri recyklácii plastov z áut pomocou pyrolýzneho spracovania. Tento model nám umožňuje predikovať, približne koľko plastov do procesu vstupuje, koľko energie sa spotrebuje a aké sú vlastnosti týchto plastov.

ZÁVER

Štúdiom zahraničnej literatúry a odborných článkov sa nám podarilo potvrdiť vážnosť a aktuálnosť riešenia odpadovej politiky vo svete ale aj na Slovensku. Predbežnou analýzou vzoriek z automobilového priemyslu sme tiež potvrdili zahraničné štúdie o možnostiach získavania napr. uhlíka, vodíka a iných pyrolýznych produktov získaných termickým spôsobom. Prostredníctvom skúmania rôznych parametrov a úvah táto dizertačná práca objasnila kľúčové poznatky a dôsledky.

Po prvé, optimalizácia prevádzkových podmienok, vrátane teploty, času zotrvania a zloženia suroviny, je rozhodujúca pre maximalizáciu výťažku a kvality produktu. Experimentálne štúdie preukázali význam jemného doladenia týchto parametrov na zvýšenie účinnosti a účinnosti pyrolýzneho procesu. Okrem toho pokroky vo výpočtovom modelovaní poskytli cenné prediktívne nástroje na optimalizáciu a výkonu reaktora.

Po druhé, environmentálne dôsledky tepelnej obnovy v pyrolýznych reaktoroch sú značné. Odklonením organického odpadu zo skládok a spaľovania pyrolýza zmierňuje emisie skleníkových plynov a znižuje znečistenie životného prostredia.

Okrem toho je ekonomická životaschopnosť technológie pyrolýzy kritickým faktorom pre široké prijatie. Aj keď počiatočné kapitálové náklady môžu byť značné, potenciál tvorby príjmov prostredníctvom predaja produktov môže kompenzovať prevádzkové náklady a priniesť dlhodobé finančné výhody.

Dôležité je, že tento výskum poukazuje na širšie dôsledky termickej obnovy v pyrolýznych reaktoroch nad rámec odpadového hospodárstva. Zhodnocovaním odpadových materiálov a výrobou obnoviteľných zdrojov energie pyrolýza prispieva k prechodu na obehové hospodárstvo a trvalo udržateľný rozvoj. Integrácia technológie pyrolýzy do existujúcej infraštruktúry odpadového hospodárstva ponúka cestu k zníženiu vyčerpania zdrojov a degradácie životného prostredia.

Na záver, zistenia prezentované v tejto dizertačnej práci podčiarkujú transformačný potenciál termického zhodnocovania v pyrolýznych reaktoroch na riešenie naliehavých environmentálnych výziev pri súčasnom vytváraní ekonomických príležitostí. Napredovanie, neustály výskum, inovácia a spolupráca budú nevyhnutné na realizáciu všetkých výhod pyrolýznej technológie a napredovanie smerom k udržateľnejšej budúcnosti.

Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť

Práca prináša nové poznatky o termickom zhodnocovaní automobilových plastov, ktoré sú cenným zdrojom energie a surovín. Detailná analýza energetického potenciálu tohto odpadu a pyrolýzne merania odhaľujú jeho skrytý potenciál. Navrhnutý matematický model pre hodnotenie vstupov a výstupov pyrolýzy poskytuje vedeckovýskumnej komunite nástroj na optimalizáciu procesu a predikciu jeho výsledkov, čo urýchľuje vývoj tejto technológie.

Prínos pre pedagogickú oblasť

Výsledky práce môžu byť využité na rozšírenie a aktualizáciu učebných materiálov v oblasti odpadového hospodárstva, chemickej technológie a environmentálneho inžinierstva. Študenti sa tak môžu oboznámiť s najnovšími poznatkami v oblasti energetického zhodnocovania automobilových plastov, pochopiť princípy pyrolýzy a jej environmentálne aspekty, a získať prehľad o možných aplikáciách tejto technológie v praxi.

Prínos pre technickú prax

Práca prináša praktické poznatky o možnostiach energetického zhodnocovania automobilových plastov, ktoré môžu byť aplikované v praxi. Navrhnutý matematický model slúži ako nástroj pre inžinierov a technologov pri návrhu, optimalizácii a prevádzke pyrolýznych zariadení. Výsledky analýzy produktov pyrolýzy a hodnotenia

environmentálnych aspektov môžu pomôcť pri implementácii tejto technológie v praxi a pri rozhodovaní o jej vhodnosti pre konkrétne aplikácie.

LITERATÚRA

2022. aipalmall.com. [Online] 2022.

Anju Dahiya, Plant & Soil Science, Jeffords Hall. 2020. Bioenergy: biomass to biofuels. 2020.

Beston. 2022. <https://bestoncompany.com/sk/pyrolysis-reactor/>. [Online] 2022.

Bioplynová stanica ČOV. 2022. <http://www.intechenergo.sk/kniznica/paliva-pre-kj/bioplyn/>. [Online] 2022.

Bioplynová stanica. 2022. <http://www.bfpartners.sk/chemicky-a-energeticky-priemysel>. [Online] 2022.

C. Nobre, C. Vilarinho, O. Alves, B. Mendes, M. Gonçalves. 2019. Upgrading of refuse derived fuel through torrefaction and carbonization: Evaluation of RDF char fuel properties Energy. 2019.

2020. cen.acs.org. [Online] 2020.

Cen.acs.org. 2020. <https://cen.acs.org/environment/recycling/New-plastic-pyrolysis-capacity-planned/98/i27>. [Online] 2020.

D.A. Agar, M. Kwapinska, J.J. Leahy. 2018. Pyrolysis of wastewater sludge and composted organic fines from municipal solid waste. 2018.

Engul. 2022. <https://www.engul.sk/realizacie/spracovanie-plastoveho-odpadu-depolymerizaciou-kgj-1400-rach/>. [Online] 2022.

Envirovid.eu. 2022. <https://www.envirovid.eu/pyrolyza/>. [Online] 2022.

2019. Eurostat. [Online] 2019. <https://ec.europa.eu/eurostat>.

F. Tang, Z. Yu, Y. Li, L. Chen, X. Ma. 2020. Catalytic co-pyrolysis behaviors, product characteristics and kinetics of rural solid waste and chlorella vulgaris Bioresour. 2020.

F. Wang, P. Wang, A. Raheem, G. Ji, M.Z. Memon, Y. Song, M. Zhao. 2019. Enhancing hydrogen production from biomass pyrolysis by dental-wastes-derived sodium zirconate. 2019.

F. Wang, P. Wang, A. Raheem, G. Ji, M.Z. Memon, Y. Song, M. Zhao. 2019. *Enhancing hydrogen production from biomass pyrolysis by dental-wastes-derived sodium zirconate.* 2019.

Greencorp. 2022. <https://greencorp.sk/co-sa-skryva-za-vznikom-bioplynu-a-ake-su-fazy-priebehu-tohto-procesu/>. [Online] 2022.

charcoal-machines. 2021. <https://www.charcoal-machines.com/many-indonesian-users-choose-coconut-shell-carbonization-furnace.html>. [Online] 2021.

Jandačka J. a kol. 2014. *Energetické využitie komunálneho odpadu*. s.l. : EDIS, 2014. SBN 978-80-554- 0923-8.

Kompostovanie. 2014. <http://www.priateliazeme.sk/spz/co-je-kompostovanie/surovinova-skladba-kompostu>. [Online] 2014.

L. Quesada, M. Calero, M.A. Martín-Lara, A. Pérez, G. Blázquez. 2019. Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste Energy. 2019.

Ľubomír Šooš ; rec. Dušan Šebo, Juraj Ladomerský, Vladimír Hlavňa. 2020. *Stav a vízie zhodnocovania odpadov z automobilového priemyslu SR*. s.l. : Bratislava Spektrum STU, 2020. ISBN978-80-227-5039-4.

M. Wang, Y. Yang, S. Jin, L. Gu, H. Zhang. 2016. *Social and cultural factors that influence residential location choice of urban senior citizens in China*. 2016.

M.M. Massaro, S.F. Son, L.J. Groven. 2014. Mechanical, pyrolysis, and combustion characterization of briquetted coal fines with municipal solid waste plastic (MSW) binders Fuel. 2014.

Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky. 2024. Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky. [Online] 2024. <https://www.minv.sk/?pocet-vozidiel-vyradenych-z-evidencie>.

Miroslav Badida, rec. Dušan Šebo, Juraj Ladomerský, Vladimír Hlavňa. 2021. *Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle*. s.l. : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2021. ISBN 978-80-553-3867-5.

Li, J. Shao, K. Wang, H. Chen. 2015. 2015.

Patsch M., Pilát P. 2020. Conceptual design of a small device for energy recovery of waste from the automotive industry. 2020.

Piekutin, J. 2019. Monitoring of Groundwater in the Area of a Reclaimed Municipal Waste Landfill. 2019.

PWR s.r.o. <http://www.pwr.sk/profil-spolocnosti/>. [Online]

Recycling. 2022. <https://www.britannica.com/science/recycling/Ferrous-metals>. [Online] 2022.

Recyklácia skla. 2020. <https://www.odpady-portal.sk/Dokument/105338/ako-prebieha-recyklacia-skla-pozrite-si-ako-recykluje-sklo-vetropack-nemsova.aspx>. [Online] 2020.

S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 The World Bank. 2018.

S.H.Y.S. Abdullah, N.H.M. Hanapi, A. Azid, R. Umar, H. Juahir, H. Khatoun, A. Endut. 2017. *A review of biomass-derived heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production.* 2017.

Sme. 2022. <https://smeti.sme.sk/dok/i/recyklacia-dreva>. [Online] 2022.

Stehlik, P. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 10.1007/978-3-319-15467-1.

Štatistický úrad Slovenskej republiky.

http://datacube.statistics.sk/#!/view/sk/VBD_SK_WIN2/zp3801rr/v_zp3801rr_00_00_00_sk. [Online]

Štatistický úrad Slovenskej republiky.

http://datacube.statistics.sk/#!/view/sk/VBD_SK_WIN/zp3001rr/v_zp3001rr_00_00_00_sk. [Online]

Triedenie odpadu. 2019. <https://www.triedenieodpadu.sk/plasty/>. [Online] 2019.

UNIVNET. 2021. *Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle.* Bratislava : SPEKTRUM STU, 2021. ISBN: 978-80-553-3867-5.

—, **2021.** Stav a vízie zhodnocovania odpadov z automobilového priemyslu SR. 2021, ISBN: 978-89-227-5039-4.

2022. wastetireoil.com. [Online] 2022.

2019. weibold.com. [Online] 2019.

Weibold.com. 2019. <https://weibold.com/one-of-the-worlds-biggest-tire-pyrolysis-plants-will-be-constructed-in-denmark>. [Online] 2019.

Y. Zhang, Y. Cui, S. Liu, L. Fan, N. Zhou, P. Peng, Y. Wang, F. Guo, M. Min, Y. Cheng, Y. Liu, H. Lei, P. Chen, B. Li, R. Ruan. 2020. *Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production.* 2020.

Young, Gary C. 2019. Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons. 2019.

Z. Fu, S. Zhang, X. Li, J. Shao, K. Wang, H. Chen. 2015. MSW oxy-enriched incineration technology applied in China: Combustion temperature, flue gas loss and economic considerations Waste Manag. 2015.

Zelená kniha. 2008.

lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:SK:PDF. [Online] 2008.

ZEVO. 2022. https://www.atpjournals.sk/rubriky/rozhovory/energeticke-zhodnocovanie-odpadu-je-pilierom-obehoveho-hospodarstva.html?page_id=34101. [Online] 2022.

— **2018.** <https://www.ewia.sk/sluzby/zariadenie-na-energeticke-vyuzitie-odpadov/>. [Online] 2018.

Zhodnocovanie odpadu. 2018.

https://www.slovensko.sk/sk/agendy/agenda/_nakladanie-s-odpadmi. [Online] 2018.

Resumé

Dizertačná práca sa zaoberá energetickým potenciálom premeny automobilových plastov v pyrolýznom reaktore a ich zhodnotením. Ponúka udržateľné riešenie pre súčasné výzvy v oblasti riadenia zdrojov. Pyrolýza, termochemický proces, rozkladá organickú hmotu v neprítomnosti kyslíka a poskytuje vedľajšie produkty ako pyrolýzny olej, plyn a tuhý zvyšok. Výskum skúma optimálne prevádzkové podmienky, vrátane teploty, doby zotrvania a zloženia suroviny v pyrolýznom reaktore, aby sa zvýšil výťažok a kvalita produktov. Dizertačná práca vrhá svetlo na účinnosť a potenciál tepelnej obnovy v pyrolýznych reaktoroch a ponúka cestu k obehovému hospodárstvu a udržateľnému využívaniu zdrojov.

Summary

Dissertation thesis on the energy potential of the transformation of automotive waste plastics in a pyrolysis reactor and their evaluation. I offer a sustainable solution for current challenges in resource management. Pyrolysis, a thermochemical process, decomposes organic matter in the absence of oxygen and provides byproducts such as pyrolysis oil, gas, and solid residue. Research investigated the optimal operating conditions, including temperature, residence time and raw materials in the pyrolysis reactor, in order to increase yield and product quality. The thesis sheds light on the effectiveness and potential of thermal recovery in pyrolysis reactors and offers a path to a circular economy and sustainable use of resources.