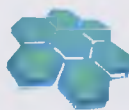




MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



uniivnet

STU
SjF

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNICKÁ FAKULTA

PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE ZHODNOCOVANIA ODPADOV – HLAVNÝ PILIER OBEHOVÉHO HOSPODÁRSTVA

Editor

Dr.h.c. prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.

Ing. Marek Patsch, PhD.



SPEKTRUM
STU

Bratislava, 2023



univnet

Progresívne technológie zhodnocovania odpadov – hlavný pilier obehového hospodárstva

Editor

Dr.h.c. prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.

Ing. Marek Patsch, PhD.

Bratislava, 2023

UNIVNET – Univerzitná a priemyselná výskumno-edukačná platforma recyklujúcej spoločnosti

Členovia združenia UNIVNET:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ekonomická univerzita v Bratislave
Technická univerzita v Košiciach
Žilinská univerzita v Žiline
Technická univerzita vo Zvolene
Zväz automobilového priemyslu SR

Editor:

Dr.h.c. prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.
Ing. Marek Patsch, PhD.

Recenzenti:

prof. Ing. Stanislav Legutko, PhD.
Poznan University of Technology
Institut of Mechanical Technology (PL)
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
University J.E. Purkině Ústí nad Labem
Faculty of Mechanical Engineering (CZ)
prof. Ing. Pavel Kovac, PhD.
University of Novi Sad
Faculty of Technical Science (SRB)

Návrh obálky:

Ing. Tibor Dzuro, PhD.,
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta

Technická úprava:

Ing. Marek Patsch, PhD.,
Ing. Peter Pilát, PhD.,
Žilinská univerzita v Žiline

Vydala:

Slovenská technická univerzita v Bratislave vo
Vydavateľstve SPEKTRUM STU

ISBN:

978-80-227-5377-7

Progresívne technológie zhodnocovania odpadov – hlavný pilier obehového hospodárstva

Obsah

Progresívne technológie zhodnocovania odpadov – hlavný pilier obehového hospodárstva	i
Predslov	v
1 Vybrané socio-ekonomické trendy a dôsledky elektromobility v Európe a v SR.....	8
1.1 Úvod.....	8
1.2 Európske a svetové trendy v rozvoji elektromobility	8
1.3 Hlavné ekonomické, technologické, environmentálne výzvy a trendy, ktoré určujú potenciál obehového hospodárstva v automotive EU.....	9
1.4 Výzva EÚ pre lepšiu manipuláciu s vozidlami po dobe životnosti	12
1.5 Súčasná stratégia a výzvy EÚ pre obehové hospodárstvo v automobilovom priemysle.....	13
1.6 Očakávané socio-ekonomické dopady elektromobility so zameraním na EÚ	14
1.7 Multi-regionálna input-output analýza vplyvu automotive sektora na zamestnanosť vo svete	18
1.7.1 Imputácia údajov o zamestnanosti k multi-regionálnym input-output tabuľkám FIGARO 2022.....	18
1.7.2 Význam automobilového priemyslu vo svete z hľadiska zamestnanosti	19
1.8 Stav, stratégia prieniku elektromobility v SR a možnosti financovania inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti	24
1.9 Stratégia podpory elektromobility v SR	25
1.10 Možnosti financovania inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti	27
1.10.1 Vývoj recyklácie starých automobilov v SR	28
1.10.2 Zdroje zo strany štátu	30
1.10.3 Zdroje z Európskej únie.....	31
1.10.4 Inovatívne formy financovania environmentálnych investícií	34
1.11 Zhodnocovanie odpadov a druhotné suroviny v automotive	34
1.11.1 Automobilový park na Slovensku	35
1.11.2 Vývoj prúdov odpadu z vozidiel po dobe životnosti	38
1.12 Záver	42
Literatúra.....	44
2 Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií – SmartOdpady	47
2.1 Úvod.....	47

2.2	Platforma „SmartOdpady“ a jej potenciál pre trvalú udržateľnosť v oblasti odpadového hospodárstva SR	47
2.3	Obehové hospodárstvo a trhy s druhotnými surovinami v EÚ	51
2.3.1	Platforma „SmartOdpady“ ako nástroj na podporu recyklácie a trhu s druhotnými surovinami v SR	54
2.4	Záver	62
	Literatúra	63
3	Recyklácia vrstveného skla. Finalizácia výroby modulov a príprava na ich testovanie	66
3.1	Úvod	66
3.2	Lepené sklo	66
3.2.1	Výroba skla	66
3.2.2	Lepené sklo	67
3.3	Lepené sklo v stavebníctve	68
3.3.1	Recyklácia lepeného skla	69
3.4	Funkčné vibračné skúšky	72
3.5	Návrh nástrojov jednotlivých modulov	74
3.5.1	Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre rovnací modul	74
3.5.2	Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre vibračný modul	75
3.5.3	Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre stierací modul	75
3.6	Popis modulov	77
3.6.1	Vibračný modul a možnosti radenia elektrických vibrátorov	77
3.6.2	Stierací modul a možnosti radenia stieracích nástrojov	78
3.7	Plán experimentov	80
3.7.1	Skúšky lámacieho modulu - Fáza A	80
3.7.2	Skúšky vibračného modulu - Fáza B	82
3.7.3	Skúšky stieracieho modulu- Fáza C	83
3.7.4	Fáza D – skúšky rôznych kombinácií jednotlivých modulov	85
3.8	Stavba linky- SWOT analýza variantných konfigurácií v rámci riešenia	86
3.8.1	Variantné riešenia usporiadania linky	86
3.8.2	Minimálna konfigurácia linky A-B-C	87
3.8.3	Konfigurácia horizontálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s jedným vibračným modulom	89
3.8.4	Konfigurácia horizontálnej linky s dvoma vibračnými modulmi A-B-B-C linka 90	
3.8.5	Konfigurácia vertikálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s jedným vibračným modulom	90
	Literatúra	92
4	Získavanie cenných zložiek z vyradených lítium iónových automobilových akumulátorov cestou materiálovej recyklácie	94
4.1	Úvod	94
4.1.1	Vývoj poznatkov o problematike recyklácie LiA	97
4.2	Experimentálna časť	101

4.3	Záver	116
	Literatúra	118
5	Zhodnocovanie problémových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov	122
5.1	Úvod	122
5.2	Špecifikácia potenciálne problémových komponentov (materiálov) vozidiel po dobe ich životnosti	122
5.3	Gumový granulát použitý na výskum	123
5.4	Textil použitý na výskum	125
5.5	Sklenená drvina z autoskiel použitá na výskum	125
5.6	Návrh metodiky merania akustických deskriptorov sypaných materiálov	126
5.7	Vývoj a výroba prípravkov a zariadenia pre potreby merania akustických deskriptorov sypaných materiálov	131
5.8	Výskum akustických deskriptorov vybraných problémových materiálov z hľadiska ich ďalšieho zhodnocovania (v kompaktnej a sypanej forme)	132
5.9	Vyhodnotenie vykonaných experimentov pomocou regresnej a korelačnej analýzy	137
5.9.1	Sledovanie závislosti Koeficientu zvukovej pohltivosti od vybraných parametrov využitím regresnej analýzy	140
5.9.2	Sledovanie závislosti Indexu útlmu od vybraných parametrov využitím regresnej analýzy	142
5.9.3	Celkové porovnanie výsledkov z merania akustických deskriptorov kompaktných a sypaných materiálov	144
5.10	Predikcia využitia sypaných materiálov do zvukovo a tepelno izolačných produktov	149
5.11	Záver	154
	Literatúra	155
6	Zhodnotenie odpadových polymérov z automobilového priemyslu v drevných kompozitných materiáloch	158
6.1	Úvod	158
6.2	Príprava kompozitov	158
6.2.1	Použitý materiál na výrobu kompozitných dosiek drevo-guma	158
6.2.2	Sitová analýza	159
6.2.3	Výroba kompozitov drevo-guma	167
6.3	Hustotný profil drevotrieskových dosiek s obsahom gummy	168
6.4	Analýza prchavých organických zlúčenín látok (VOC) metódou GC-MS	169
6.5	Mikroskopická analýza	171
6.6	Hodnotenie termofyzikálnych vlastností	172
6.7	Meranie koeficientu absorpcie zvuku	174
6.8	Vplyv kompozitov drevo-guma na akustické a terestrické prostredie	175
6.8.1	Experiment práce	176
6.8.2	Výsledky a diskusia	177
6.8.3	Záver	177

6.9	Komparácia tradičného a inovatívneho metodického postupu kalkulácie inovovaného produktu - drevoplastovej dosky	178
6.10	Záver	182
	Literatúra	183
7	Optimalizácia prevádzkových parametrov pyrolýzneho reaktora na energetické zhodnocovanie odpadu z automobilového priemyslu	187
7.1	Úvod	187
7.2	Materiálové zloženie vstupných surovín pre pyrolýzny proces	188
7.3	Popis jednotlivých druhov plastov	190
7.3.1	Polypropylén (PP)	190
7.3.2	Polyetylén (PE)	191
7.3.3	Polyuretán (PUR)	192
7.3.4	Akronitrilbutadiénstyrén (ABS)	193
7.3.5	Polyamid (PA)	193
7.3.6	Polyetylénteraftalát (PET)	194
7.3.7	Polyvinylchlorid (PVC)	195
7.4	Energetické zhodnocovanie odpadu	196
7.4.1	Pyrolýza	196
7.4.2	Vstupné suroviny a výstupné produkty	197
7.4.3	Splyňovacie a pyrolýzne zariadenie	198
7.4.4	Príprava vstupnej suroviny	198
7.5	Experimentálna laboratórna pyrolýza	199
7.6	Chemická analýza produktov pyrolýzneho procesu	207
7.7	Záver	213
	Literatúra	217

Predslov

Vážení čitatelia,

globálne ciele sformulované v dokumente Európskej komisie pod názvom „*Tematická stratégia predchádzania vzniku odpadu a jeho recyklácie*“ vytvárajú podmienky pre uvažovanie v dimenziách životného cyklu produktu, rozšírenú zodpovednosť výrobcov, hierarchiu odpadového hospodárstva, predchádzanie vzniku odpadu a využitie odpadu ako zdroja surovín. Realizácia týchto podmienok sa uskutočňuje v čase prostredníctvom série environmentálnych akčných plánov a legislatívneho rámca.

Nový akčný plán obehového hospodárstva (CEAP) prijala Európska komisia v marci 2020. Ide o jeden z hlavných stavebných kameňov novej európskej agendy „Európskej zelenej dohody“. Prechod EÚ na obehové hospodárstvo zníži tlak na ťažbu prírodných zdrojov, spotrebu energie a vytvorí udržateľný rast aj pre pracovné miesta. Je tiež nevyhnutným predpokladom na dosiahnutie cieľa EÚ v oblasti klimatickej neutrality a zastavenie straty biodiverzity do roku 2050. Plán deklaruje iniciatívy počas celého životného cyklu produktov. Zameriava sa na to, ako sú produkty navrhnuté, podporuje udržateľnú spotrebu surovín a energií s cieľom, aby sa predchádzalo vzniku odpadu a aby sa použité zdroje udržali v hospodárstve EÚ čo najdlhšie. Hlavným cieľom akčného plánu obehového hospodárstva je dosiahnutie uhlíkovo neutrálneho, environmentálne udržateľného, beztoxického a plne obehového hospodárstva do roku 2050. Pre dosiahnutie tohto cieľa zverejnila Komisia EÚ v marci 2022 prvý balík opatrení na urýchlenie prechodu na obehové hospodárstvo do roku 2050.

Slovenská republika si plne uvedomuje svoje postavenie ako jedného zo svetových lídrov vo výrobe automobilov a z toho vyplývajúcu zodpovednosť a povinnosť získavania surovín z odpadov či už z výroby a z používania vozidiel, alebo zo spracovania starých vozidiel. Príslušné právne predpisy Európskej únie nakladania s odpadmi sú u nás transponované v Zákone o odpadoch č. 79/2015 Z. z..

Nutnou podmienkou fungovania obchovnej ekonomiky je výskum a vývoj nových technológií zhodnocovania odpadov.

Hlavným zmyslom pre vznik nového združenia „Univerzitnej a priemyselnej výskumno-edukačnej platformy recyklujúcej spoločnosti (UNIVNET)“ bolo v roku 2019 vytvoriť zmysluplné prepojenie medzi požiadavkami priemyslu na jednej strane a vedeckým potenciálom akademickej sféry na strane druhej. Je zamerané na výskum a vývoj progresívnych technológií a technik efektívneho zhodnocovania ťažko spracovateľných odpadov najmä z automobilového priemyslu s cieľom minimalizovať negatívne dopady na životné prostredie a šetriť primárne energetické a surovinové zdroje. Členmi združenia je Slovenská technická univerzita v Bratislave (STUBA, Strojnícka fakulta), Technická univerzita v Košiciach (TUKE, Strojnícka fakulta a Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie), Ekonomická univerzita v Bratislave (EUBA, Fakulta národohospodárstva a Fakulta hospodárskej informatiky), Žilinská univerzita v Žiline (UNIZA, Strojnícka fakulta), Technická univerzita vo Zvolene (TUZVO, Fakulta techniky a renomovaná inštitúcia v danej oblasti) a Zväz automobilového priemyslu Slovenskej republiky (ZAP SR).

Významným počinom v tomto smere bolo v roku 2019 uzatvorenie Zmluvy o združení prostriedkov v súlade s § 27 zákona č. 523/2004 Z. z. o rozpočtových pravidlách verejnej správy a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov, medzi Ministerstvom

školy, vedy, výskumu a športu SR a lídrom združenia UNIVNET. Slovenskou technickou univerzitou v Bratislave.

Predmetom zmluvy o združení prostriedkov je spolupráca pri realizácii prognostických a výskumno-vývojových aktivít pri hľadaní nových technológií a technik maximálne efektívneho zhodnocovania odpadov najmä v automobilovom priemysle. V roku 2022 bola táto zmluva o združení prostriedkov na základe dohody zmluvných strán dodatkom predĺžená do roku 2026. UNIVNET zameriava svoju činnosť na progresívne technológie zhodnocovania odpadu v automobilovom priemysle v Slovenskej republike. Nepopierateľne významne sa etablovalo v odvetví zhodnocovania a recyklácie automobilov po skončení ich životného cyklu. Výsledky tejto činnosti sú zhmotnené vo viacerých významných výstupoch analytických a výskumných aktivít a zhmotnené tiež v rámci pravidelnej publikačnej činnosti.

Aktivity členov UNIVNET siahajú od prognózovania vývoja vzniku odpadov, cez hľadanie nových riešení, výskum, vývoj a výrobu nových funkčných prototypov nových konštrukčných princípov, cez odskúšanie modelových výrobných postupov, výrobných liniek, až po marketing a umiestnenie nových produktov na trhu.

UNIVNET v súčasnosti predstavuje významnú výskumnú infraštruktúru v oblasti obehového hospodárstva prierezo vo jednotlivými sektormi s celoslovenskou pôsobnosťou a s iniciatívami a aktivitami v oblasti výskumných projektov a spoluprác v Európskom meradle. Má ambície stať sa Národnou platformou obchového hospodárstva a iniciovať vytvorenie novej Európskej výskumnej infraštruktúry v rámci ESFRI a tiež podanie žiadosti do ESFRI o návrh a získanie projektu na vytvorenie spoločnej veľkej Európskej výskumnej infraštruktúry so sídlom na území SR – Výskumné centrum nových technológií a metód efektívneho zhodnocovania odpadu v automobilovom priemysle. Cieľom tejto iniciatívy bude minimalizovanie negatívneho vplyvu na životné prostredie a šetrenie primárnych zdrojov energie a surovín na úrovni EÚ.

Snahou združenia UNIVET v budúcnosti bude zabezpečiť, okrem výskumnej a vývojovej činnosti, aj odbornú a vzdelávaciu činnosť založenú na dosiahnutých výsledkoch realizovaných aktivít, napríklad formou workshopov s tvorcami, riešiteľmi tém UNIVNET. Jednou z takýchto aktivít je aj prezentácia výsledkov na medzinárodnej vedeckej konferencii Technika ochrany prostredia – TOP.

Vážení čitatelia, odborníci v odbore, milí študenti,

združenie UNIVNET vydalo za obdobie svojho pôsobenia 4 publikácie, z toho 2 v anglickom jazyku. V súčasnosti sa vám dostáva do rúk už piata publikácia ako tematické pokračovanie monografií vydaných od roku 2020. Veríme, že aj táto publikácia bude pozitívne prijatá odbornou a laickou verejnosťou a poskytne Vám potrebné informácie a odpovede na vaše otázky.

V Bratislave 28.11.2023

Dr.h.c. prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.
Ing. Marek Patsch, PhD.

Vybrané socio-ekonomické trendy a dôsledky elektromobility v Európe a v SR.



Riešiteľský kolektív:

Ekonomická univerzita v Bratislave

Ochotnický Pavol (editor a hlavný riešiteľ)

Riešitelia:

Sivák Rudolf (medzifakultný koordinátor)

Lábaj Martin

Majzlíková Erika

Katarína Belanová

Mária Vojtasová

1 Vybrané socio-ekonomické trendy a dôsledky elektromobility v Európe a v SR

1.1 Úvod

Automobilový sektor aj celý životný cyklus automobilov v Európe, vo svete a v SR prechádza momentálne obrovskými štrukturálnymi zmenami, a to najmä v dôsledku aplikácií inovácií, ktoré súvisia najmä s rozvojom elektromobility, prieniku digitalizácie do odvetvia, ktoré prispievajú k zlepšovaniu výkonu vozidiel, znižovaniu dopytu po neobnoviteľných materiálových a energetických vstupoch a k minimalizácii škodlivých vplyvov na životné prostredie. Ale sú aj dôsledkom porúch v globálnych dodávateľských reťazcoch, ktoré spôsobila pandémia COVID-19 a vojna na Ukrajine.

Vo všeobecnosti sa očakáva, že pod vplyvom regulácie EÚ sa elektricky poháňané vozidlá stanú dominantným typom takzvaných „Light“ vozidiel v roku 2050. Ak vezmeme do úvahy emisie spojené s výrobou takzvaných „nečistých“ foriem elektrickej energie pri používaní takýchto áut v niektorých členských štátoch, budú mať elektrické autá významný vplyv na zníženie celkových emisií skleníkových plynov v porovnaní s benzínovými, naftovými alebo hybridnými vozidlami.

Výroba takýchto vozidiel predstavuje veľkú, technologickú, ekologickú, surovinovú, ale aj ekonomickú výzvu do budúcnosti. Elektromobilita „posilní“ vedu, výskum a inovácie najmä v dvoch vyššie spomenutých oblastiach. Dôsledkom elektromobility bude postupné zníženie dopytu po fosilných palivách a ropných produktoch, elektromobilita bude stimulom pre rozvoj novej „palivovej“ infraštruktúry, pre rast spotreby čistých zdrojov energií a pre rast kapacít na uchovávanie energie.

Elektromobilita bude v priebehu niekoľkých rokov tiež zdrojom novej štruktúry odpadov/druhotných surovín, ktoré budú vznikať nielen vo fáze výroby, ale aj vo fáze používania vozidiel (VUP) a vo fáze spracovania vozidiel po dobe životnosti (ELVP) v jednotlivých krajinách. Včasné prispôsobenie sa výrobcov, vedeckých a vzdelávacích inštitúcií, ale najmä pracovnej sily budú predpokladmi pre aktívne zapojenie potenciálu krajín do tvorby hodnôt v rámci globálnych a meniacich sa hodnotových reťazcov v rámci elektromobility. Elektromobilita sa môže stať zdrojom výrazných zmien v medzinárodných pohyboch zahraničných investícií, zdrojom pre tvorbu nových klastrov, ale aj postupnej deštrukcie niektorých existujúcich klastrov, ktoré vygenerovali predchádzajúce technológie výroby a spracovania vozidiel po dobe životnosti.

Štúdia poskytuje priebežné zistenia, výsledky a východiská pre ďalší výskum vplyvov elektromobility v SR riešiteľského kolektívu EUBA, a to za oblastí:

- Európskych a svetových trendoch v rozvoji elektromobility,
- socio-ekonomických dopadov elektromobility so zameraním na EÚ,
- možnosti financovania inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti.

1.2 Európske a svetové trendy v rozvoji elektromobility

Prebiehajúce technologické zmeny a inovácie v automobilkách viedli už niekoľko desaťročí k radikálnej zmene materiálového zloženia vyrábaných áut – najmä úpadok kovových materiálov, nárast plastov a elektrických komponentov, zmena pohonných jednotiek a prevodových jednotiek smerom k elektromobilom, k vozidlám s hybridným alebo alternatívnym, a to najmä ako reakcia na zmeny v dostupnosti energetických zdrojov a šetrenie životného prostredia. .

Technologické zmeny a trendy v zmene materiálového zloženia a zložitosti jednotlivých vstupov sú vstupmi a impulzmi aj pre množstvo ďalších technologických zmien, ktorými sú spracovávané odpady vznikajúce vo fáze používania vozidla (VUP) a počas dojazdu vozidla (ELVP) fáza. Tieto technológie používajú spracovatelia automobilového odpadu v rôznych časoch od spustenia automobilov a majú obrovský potenciál prispieť k trvalo udržateľnému rozvoju Európy a jej členských krajín viacerými kanálmi.

Ide napríklad o vplyv na pokles ťažby primárnych surovín a materiálových vstupov, ktoré recykláciou odpadov z VUP a ELVP ne strácajú svoje pôvodné vlastnosti. Tie idú cez spracovateľov späť k automobilkám, prípadne do iných priemyselných a iných odvetví hospodárstva. Ďalšia skupina odpadov z VUP a ELVP prechádza energeticky zhodnocovaním a znižuje nároky na primárne energetické vstupy národných ekonomík. Diely vozidiel a niektoré komponenty zo spracovania ELV alebo VUP sa opätovne používajú - bez úpravy alebo po úprave - počas servisných opráv vozidla. Po spracovaní sa niektoré odpady (napríklad pneumatiky) zhodnocujú v izolačných materiáloch pre stavebný priemysel alebo v odvetviach mimo automobilového priemyslu. Takzvané nebezpečné odpady sa likvidujú alebo čakajú na vývoj technológií na ich recykláciu.

1.3 Hlavné ekonomické, technologické, environmentálne výzvy a trendy, ktoré určujú potenciál obehového hospodárstva v automotive EU

Automobilový priemysel je mimoriadne dôležitý pre európske hospodárstvo a jeho životné prostredie. V roku 2020 bol podľa Európskeho združenia výrobcov automobilov automobilový priemysel v Európe zodpovedný za výrobu až 17,6 % všetkých osobných automobilov na svete. V roku 2018 priamo zamestnával automotive 2,6 milióna ľudí, z toho až 12,6 milióna zamestnancov pôsobilo v odvetviach napojených na výrobu osobných vozidiel. Priemerné emisie skleníkových plynov z prevádzky nových vozidiel v roku 2020 dosiahli 108,2 g CO₂ na km. Rozšírená prax nákupu väčších SUV znamená, že aj pri nových registráciách prekračujú emisie vozidiel európsky priemer a patria medzi najvyššie so 121,8 g CO₂ na km (Európske združenie výrobcov automobilov, 2021).

Materiálové, technologické a ekologické aspekty automobilového priemyslu a podľa zámerov krajín EÚ výrazne ovplyvní najmä odklon od vozidiel poháňaných fosilnými palivami, najmä k elektromobilom. V dôsledku tohto trendu sa prirodzene nezmení len materiálové zloženie vyrábaných áut – zníži sa dopyt po komponentoch do spaľovacích motorov a s nimi spojených komponentov pohonu. Výrazne sa zvýši dopyt po batériových článkoch či elektromotoroch a ich komponentoch. Celkovo sa všeobecne očakáva, že prienikom elektromobility sa zníži počet automobilových komponentov o cca. 1/3 a zároveň bude dávať nové impulzy pre vývoj inovácií a technológií počas celého životného cyklu vozidiel.

V Európe to všetko už má a bude mať ešte väčší vplyv na zmeny v odvetvovej štruktúre, na zmeny v dodávateľsko-odberateľských vzťahoch, no z pohľadu projektu najmä na prevádzku vozidiel a štruktúru odpadov zo spracovanie ELV. Keďže spaľovací motor bude nahradený inými pohonnými jednotkami, zníži sa dopyt po komponentoch a nosných systémoch. Zvýšenie podielu áut na elektrický pohon spôsobí výrazný pokles dopytu po komponentoch, napr. typ: vzduchový filter, zapal'ovacie sviečky, zapal'ovacie cievky, rozvodový remeň, olejový filter alebo motorový olej, alternátor, štartér. Naopak, elektromobily budú potrebovať ďalšie komponenty, napríklad sadu batérií na pohon, kúrenie a chladenie a všetky ostatné svetlá a príslušenstvo. Pôjde tiež o meniaci výkon, ktorý sa používa aj vtedy, keď vozidlo využíva rekuperačné brzdenie a ktorý premieňa striedavý prúd generovaný elektromotormi na jednosmerný. Tým hlavným je však komponent elektromotora ako alternatívnej pohonnej

jednotky vozidla. Palubná nabíjačka batérie a systém správy batérie riadia tok elektriny do batérie a von z batérie. Nabíjací port je ďalším komponentom, ktorý nahrádza port pre klasickú nádrž v aute so spaľovacím motorom.

Výroba batériových článkov a elektroniky výrazne zvyšuje nároky na spotrebu vzácnych zemín či vybraných kovových prvkov, ale aj na spotrebu elektrickej energie pri prevádzke auta. Na konci životného cyklu sa teda zmení aj štruktúra odpadu z vyradených vozidiel. Diskutabilné je dnes tvrdenie, že takzvané „špinavé“ zdroje výroby elektriny pre prevádzku áut môžu eliminovať alebo diskriminovať rozvoj elektromobility z hľadiska celkových emisií CO₂. Dôvodom je úbytok uhoľných elektrární, rastúci podiel obnoviteľných zdrojov v niektorých krajinách, pričom sa začína uvažovať aj o posilnení jadrovej energetiky.

Technológie internetu vozidiel napr. podľa štúdie Deloitte¹ postupne zmenia obchodný model automobiliek. Správa „Trendy a vyhliadky automobilového priemyslu do roku 2020“ uvádza štyri hlavné hnacie sily rozvoja sektoru automotive a ich detailnejší popis:

- elektrifikácia,
- noví konkurenti,
- zdieľanie informácií a
- technológie.

Autori uvedenej štúdie odhadujú, že rýchlo rastúci dodávatelia automobilových dielov (ako napr. spoločnosti zaoberajúce sa technológiou automobilovej elektroniky), môžu generovať viac ako trojnásobok zisku. Pritom tieto revolučné technológie spôsobia útlm až zánik spoločnosti, zapojených do súčasných dodávateľských reťazcov. Štúdia odhaduje, že do roku 2025 počet automobilov vybavených elektrickými systémami na celom svete dosiahne 25 až 30 miliónov.

Súčasnne existuje niekoľko možných spôsobov, ako znížiť emisie CO₂ v automobilovom sektore. Najvýraznejšie trendy vo výrobe sú napr. elektrifikované vozidlá, ľahké konštrukcie alebo „flotilové“ limity pre výrobcov (Wellbrock, et al., 2020). Automobilový sektor je extrémne globalizovaný, kapitálovo náročný, charakterizuje ho vertikálna integrácia a úspory z rozsahu (Schulze, et al., 2015). Za snahou celého sektora smerovať svoj výrobný program smerom k udržateľnosti je ekonomické hľadisko návratnosti. Udržateľné riešenia si vyžadujú investície do výskumu a vývoja a investor má prirodzené očakávania z hľadiska návratnosti takejto investície. Dôležitými prvkami udržateľnej stratégie sú aj agent-manažér a vhodný čas potrebný ako na implementáciu technologickej zmeny, tak aj na difúziu inovatívneho produktu na trhu, resp. na zabezpečenie návratu (Belz & Schmidt-Riediger, 2009) a (Fang, et al., 2011). Ďalšou možnosťou pre redukciu emisií z vozidiel sa javí zdieľanie áut Schmidt (2020), ale aj rozvoj cyklomobility.

Na mikroúrovni spotrebiteľa sú elektromobily v horizonte životného cyklu menej emisne náročné a môžu byť v špecifických prípadoch výhodné aj z finančného hľadiska (Haluš & Engel, 2019) a (Milev, et al., 2021). Na priemyselnej úrovni je elektrifikácia vozového parku spôsobom, ako sa vysporiadať s rizikami neudržateľnosti. Aj pri rýchlom a do určitej miery vynútenom nástupe elektromobility zostávajú otvorené niektoré otázky týkajúce sa štruktúry dodávateľského reťazca, spotreby materiálu alebo plytvania energiami pri prevoze vozidla a jeho komponentov pri spracovaní po dobe životnosti (Casper & Sundin, 2020). Recyklačné kapacity, ktoré najmä pre elektromobily nie sú v súčasnosti dostatočne pripravené, budú čeliť prudkému náporu v čase, keď sa budú vyradovať autá nakúpené v rokoch rýchleho rastu, resp. v časoch

¹ <https://www.market-prospects.com/articles/automotive-industry-supply-chain>

priaznivej konjunktúry (Skeete, et al., 2020). Potenciál vysokej úrovni technickej recyklovateľnosti a opätovnej využiteľnosti batérií (Pagliaro & Meneguzzo, 2019) však exituje najmä pri znížení environmentálnych riziká v oblastiach, akými sú voda, pôda či vyčerpávanie prírodných zdrojov (Cusenza, et al., 2019).

Yamada a kol. (2019) v článku Analýza vstupno-výstupného scenára difúzie FCV a alternatívnych systémov dodávky vodíka skúmala ekonomické a environmentálne dopady nahradenia áut so spaľovacím motorom autami na vodíkový pohon. Environmentálne ciele a zmeny v preferenciách spotrebiteľov vytvárajú tlak na zásadnú zmenu výrobného programu automobilového priemyslu. Z hľadiska vstupov, vzhľadom na väčšiu penetráciu vodíkových áut na trh, dochádza k nárastu dopytu po sklenených, keramických a zemných výrobkoch Výsledná simulácia ukazuje, že prechod z konvenčného na vodíkový pohon je spojený so znížením tlaku na ekonomický zdrojov. V kombinácii s výrobou vodíka z fosílnych palív parným reformovaním to však neprináša klimatické úspory.

Vo všeobecnosti sa očakáva, že pod vplyvom regulácie EÚ sa elektricky poháňané vozidlá stanú dominantným typom takzvaných „Light“ vozidiel v roku 2050. Ak vezmeme do úvahy emisie spojené s výrobou takzvaných „nečistých“ foriem elektrickej energie pri používaní takýchto áut v niektorých členských štátoch budú mať elektrické autá významný vplyv na zníženie celkových emisií skleníkových plynov v porovnaní s benzínovými, naftovými alebo hybridnými vozidlami. Výroba takýchto vozidiel predstavuje veľkú, najmä technologickú, ekologickú, surovinovú, ale aj ekonomickú výzvu do budúcnosti. Elektromobilita „posilní“ vedu, výskum a inovácie najmä v dvoch vyššie spomenutých oblastiach. Postupne zníži dopyt po fosílnych palivách a ropných produktoch, bude stimulom pre rozvoj novej „palivovej“ infraštruktúry a rast spotreby energie. Bude tiež zdrojom novej štruktúry odpadov, ktoré budú vznikať vo VUP a ELVP, ale aj v jednotlivých krajinách EÚ. Včasné prispôbenie sa výrobcov a pracovnej sily bude predpokladom zapojenia sa do tvorby hodnôt v rámci globálnych a meniacich sa hodnotových reťazcov a pre medzinárodné pohyby v zahraničných investíciách v rámci Európy I sveta.

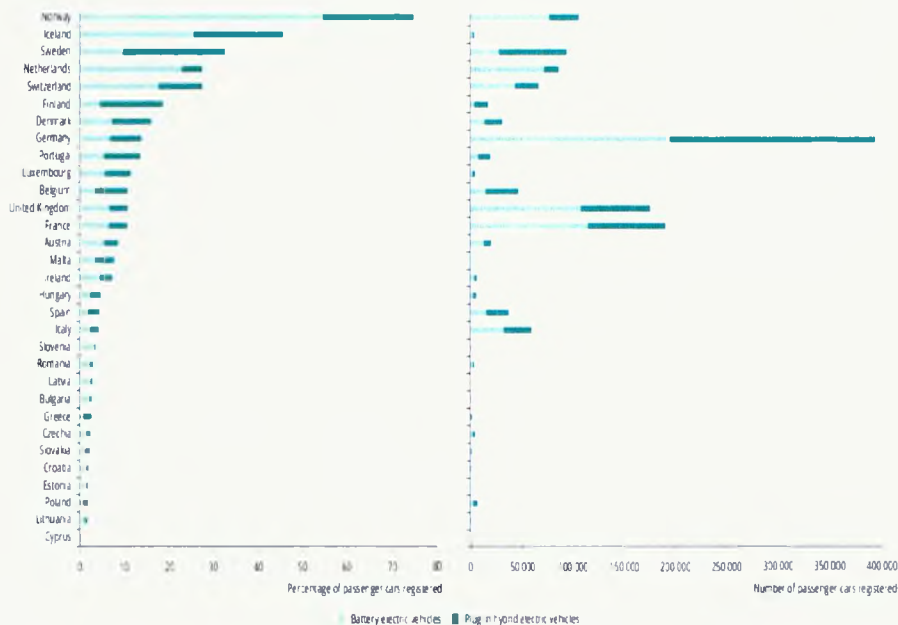
V roku 2020 zažili Európa a jej krajiny obrovský boom dopytu po elektromobiloch, a to ako batériových elektrických vozidlách (BEV), tak aj plug-in hybridných elektrických vozidlách (PHEV). V prieniku elektromobilov do „flotily“ áut vedú severské krajiny, za nimi nasleduje Luxembursko a Nemecko. Bez hlbších štatistických dôkazov je zrejmé, že prienik elektromobility je intenzívny najmä v krajinách s nadpriemernou výkonnosťou ekonomík, životnou úrovňou obyvateľstva týchto krajín a s výchovou obyvateľstva ku prírode šetriacemu udržateľnému ekonomickému rastu.

Ako ukazuje nasledovný obrázok (obr. 1.1), v SR je podiel registrácií takýchto vozidiel v porovnaní s Európou zanedbateľný. Aj krajiny strednej a východnej Európy výrazne zaostávajú za Európou, najmä kvôli rastu dovozu ojazdených áut (staršie ročníky), ktorý sa v období pandemickej recesie zvýšil.

Výsledkom je, že bez urýchlenia opatrení na zvýšenie podielu BEV a PHEV v týchto krajinách je ohrozené plnenie európskych záväzkov do budúcnosti, a tým sa nedostatočne znižuje uhlíková stopa áut, ale aj tvorba takéhoto odpadu počas prevádzky. Ich štruktúra tak bude niekoľko rokov kopírovať súčasnú štruktúru odpadov a tiež existujúce technológie ich úpravy, pričom vyspelejšie krajiny už prispôbia svoje technológie na spracovanie BEV a PHEV po dobe životnosti, ale aj ich údržbu, vrátane vzdelania, výškolenia a prípravy zodpovedajúcej pracovnej sily.

Prenikanie elektromobility už zásadne ovplyvňuje zmeny v štruktúre novoregistrovaných vozidiel v európskych krajinách a tie sa stávajú zdrojom štrukturálnych zmien v tokoch odpadov vo VUP aj ELVP. Technologické zmeny povedú najmä k tvorbe poklesu kovového odpadu, zvýšeniu podielu plastov a elektrosúčiastok a ďalším zmenám, ktoré ovplyvnia zmeny na trhu s

odpadmi z VÚP a ELVP v rámci členských krajín EÚ v rôznych intervaloch, a s rôznou intenzitou.



Obr. 1.1 Podiel elektrických a plug-hybridných vozidiel na novoregistrovaných vozidlách v EÚ v roku 2021

Zdroj: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/new-electric-vehicles-by-country>

1.4 Výzva EÚ pre lepšiu manipuláciu s vozidlami po dobe životnosti

Politika EÚ reagovala na tieto technologické a ekonomické výzvy už v roku 2000 prijatím smernice Európskeho parlamentu a Rady 2000/53/ES z 18. septembra 2000 o vozidlách po dobe životnosti (ďalej len „smernica“). Smernica spolu so zavedením takzvaného šrotovného bola obrovským impulzom pre rozvoj a modernizáciu automobilového priemyslu v Európe. Tieto dva faktory výrazne prispeli k modernizácii vozového parku, rozvoju spracovateľských kapacít, obchodu a vývoju nových technológií s pozitívnym vplyvom na životné prostredie. Ako aj pre ELVP odpad, tak aj pre PUV odpad.

Na tento impulz zareagovali najmä výskumné centrá a univerzity, ale aj vývojári u spracovateľov odpadu vývojom nových inteligentných zelených technológií. Tie sú v rôznom štádiu technologickej vyspelosti pripravované alebo realizované spracovateľmi odpadov za účelom lepšieho vytlačenia vstupných surovín, ich energetickej efektívnosti alebo ich skvalitnenia. Nie všetky vyvinuté technológie a patenty našli svoje uplatnenie vo výrobe. Príčin môže byť viacero, napríklad nízka ziskovosť, nízke úspory z rozsahu, náročnosť dopravy alebo nízke ceny spracovaných materiálov a energií v menších krajinách, napr. akou je aj SR. Okrem toho to môže byť spôsobené aj nízkou úrovňou spolupráce medzi zainteresovanými stranami v dôsledku informačných bariér, ktoré viedli k nerovnomernému vytváraniu miestnych, národných alebo cezhraničných zoskupení. Tieto technológie, ako aj ich transfer, sú obrovskou výzvou a potenciálom pre ďalšie znižovanie závislosti ekonomik EÚ od primárnych zdrojov surovín a energie. A sú aj hlavnou inšpiráciou pre predkladaný projekt a metodiku.

Smernica už významne prispela k tomu, že podľa najnovších údajov Eurostatu bola v EÚ v roku 2019 zošrotovaná celková hmotnosť osobných automobilov, dodávok a iných ľahkých

nákladných vozidiel 6,9 milióna ton; 95,1 % dielov a materiálov bolo opätovne použitých a regenerovaných, zatiaľ čo 89,6 % bolo opätovne použitých a recyklovaných.

Bez ohľadu na to, či majú automobilky svoje výrobné kapacity v jednotlivých členských krajinách EÚ alebo sú krajiny závislé od dovozu áut, rozvoj cestnej dopravy v každom členskom štáte EÚ vytvára obrovské množstvo odpadu, ktorý vzniká pri VUP alebo ELVP. Napriek často obrovskej asymetrii medzi počtom vyrobených / dovezených áut a objemom spracovania odpadu, ktorý VUP a ELVP vyprodukujú v jednotlivých krajinách EÚ, nakladanie s tokmi automobilového odpadu/druhotných surovín prispieva k zlepšovaniu obehového hospodárstva. Či už v automobilovom sektore alebo v iných odvetviach. A nepochybne v každej krajine EÚ aj zvyšujú kapacitu obehového hospodárstva s nepopierateľným pozitívnym ekonomickým a ekologickým dopadom na všetky národné ekonomiky.

1.5 Súčasné stratégie a výzvy EÚ pre obehové hospodárstvo v automobilovom priemysle

Základným teoretickým konceptom obehového hospodárstva je využívať zdroje čo najdlhšie, a to minimalizovaním materiálových a energetických nárokov, ako aj odpadu a emisií ekonomického systému (Geissdoerfer et al., 2017). Obehové hospodárstvo v automotive tvorí celý hodnotový reťazec resp. celý životný cyklus vozidiel. Zahŕňa ťažbu surovín, dizajn produktu, výrobu polotovarov a hotových výrobkov a produktov ako aj použitie a následná recyklácia materiálov. Dobré fungujúce trhy druhotných surovín sú základným pilierom obehového hospodárstva, kde je cieľom aj cez hranice dosiahnuť optimalizáciu a predĺženie využívania zdrojov v podobe **uzavretej slučky**.

Významnou aktuálnou výzvou pre automotive EU je nový obehový akčný plán EÚ, ktorého cieľom je čistejšia a konkurencieschopnejšia Európa. Európska komisia prijala tento politický dokument v marci 2020 ako jeden z pilierov Európskej zelenej dohody, novej európskej agendy pre udržateľný rast. Nový akčný plán oznamuje iniciatívy počas celého životného cyklu produktov. Na základe uvedených výziev Európska komisia v júli 2021 prijala balík legislatívnych návrhov s názvom „Fit for 55“. Cieľom je posilniť pozíciu EÚ ako globálneho lídra v oblasti klímy, modernizovať súvisiacu legislatívu v súlade s klimatickými cieľmi do roku 2030 a zaviesť nové opatrenia na dosiahnutie klimatickej neutrality do roku 2050. Navrhovaný regulačný rámec projektu pokrýva sektor energetiky vrátane diaľkového vykurovania a kogenerácie, sektora cestnej dopravy.

Automobilový priemysel EÚ, ako jeden z akceleratorov zelenej Európy a najmä Slovenská republika ako najväčší výrobca automobilov na obyvateľa na svete, sa pripojil k základnému dokumentu „Green Deal“ – deklarácii Európskej komisie o uhlíkovej neutralite a tzv. Akčný plán FIT FOR 55“. Akčný plán obsahuje 14 dokumentov a záväzkov pre členské krajiny. Sú zamerané na znižovanie emisií z dopravy, budovanie infraštruktúry pre alternatívne palivá, znižovanie emisií z dopravy prostredníctvom obnoviteľných zdrojov energie a palív, novú štruktúru minimálnych sadzieb dane na základe skutočného energetického obsahu a environmentálnych vlastností palív a elektriny.

Nový obehový akčný plán, najmä s „cieľom zabezpečiť, aby sa predchádzalo vzniku odpadu má cieľ vytvoriť predpoklady, aby použité zdroje zostali v hospodárstve EÚ čo najdlhšie“ a aby sa zvýšilo prepojenie výskumnej spolupráce a zlepšenie fungovania trhu s odpadmi generovanými VUP a ELVP. Očakávané zmeny vplyvu elektromobility ako najväčšej technologickej výzvy v automobilovom priemysle ovplyvnia s odstupom času trhy s odpadom vo VUP a ELVP, a to výrazne selektívne. Dá sa predpokladať, že bude mať viacrýchlostný efekt

na jednotlivé členské štáty EÚ. Ďalším aktuálnym impulzom je trend zvýšenej registrácie individuálne dovezených áut s tradičnými bezmotorovými, naftovými alebo staršími autami do ekonomicky menej vyspelých krajín EÚ, spravidla CEE. Najmä v dôsledku nižšej kúpnej sily obyvateľov niektorých krajín, kedy pri vysokých cenách vozidiel a nízkej podpore elektromobility z verejných zdrojov, niektoré krajiny zaostávajú za strategickými cieľmi vyspelej časti EÚ.

Životný cyklus auta ako základ metodiky pre automobilové obchodné hospodárstvo má však v porovnaní s inými produktmi alebo odvetvami niekoľko špecifik: a) výrobcovia automobilov sú nadnárodné korporácie, ktorých vývoz komponentov a dovoz komponentov presahuje hranice a potreby automobilov; v krajinách EÚ, kde sa vyrábajú vozidlá, (b) autá dnes pozostávajú z cca. 30 000 alebo 20 000 komponentov (pre elektromobily), ktoré sa líšia prostredníctvom zložitých globálnych dodávateľských vzťahov TIER1-TIER3 a prostredníctvom zložitých globalizovaných hodnotových reťazcov, (c) Ako bolo uvedené v úvode, medziprodukty, druhotné suroviny a energia zo spracovaného odpadu a ojazdených automobilov majú len malý potenciál byť opätovným vstupom pre samotných výrobcov automobilov. Idú skôr do iných odvetví hospodárstva, ako aj do exportu. To sťažuje lepšie štatistické vyhodnotenie, ako a ktoré materiály zo starých vozidiel vstupuje opäť do výroby nových automobilov.

Z dôvodu nesymetrie medzi počtom vyrobených vozidiel v jednotlivých krajinách, vo vzťahu k počtu používaným a spracovaným vozidlám v niektorých európskych krajinách, má cieľ uzatvárať slučku obchodného hospodárstva v automotive v EÚ má tak skôr nadnárodný európsky až globálny rozmer než národný.

1.6 Očakávané socio-ekonomické dopady elektromobility so zameraním na EÚ

Nejednoznačný postoj, viacerýchlostný posun v implementácii elektromobility v jednotlivých členských štátoch EÚ, ale aj odklon v stratégii prechodu na čisté energie v dôsledku energetickej krízy a vojny na Ukrajine dáva priestor uvažovať do budúcnosti stále o rôznych možných scenároch prechodu k elektromobilite. Tak ako to uvádza správa Asociácie európskych dodávateľov pre automotive o alternatívnych scenároch pre dosiahnutie klimatickej neutrality v EÚ do roku 2050.

Podľa štúdie CLEPA² ambiciózne zníženie emisií z vozidiel v EÚ predpokladá bezprecedentnú transformáciu pre automobilový priemysel a jeho dodávateľský reťazec. Táto transformáciu bude mať obrovský vplyv nielen na zamestnanosť, ale aj na výber spotrebiteľov, cenovú dostupnosť individuálnej mobility a konkurencieschopnosť EÚ. Napriek zmenám podľa CLEPA jeden imperatív však zostane rovnaký: „odolnosť a vynaliezavosť tohto odvetvia bude potrebná na to, aby sa inovácie posunuli vpred“.

Prínosom uvedenej štúdie nesporne je, že sa snažila pochopiť vplyv prechodu k elektromobilite na európsky automobilový dodávateľský priemysel ako celok, zároveň načrtnúť prognózy zamestnanosti, najmä z regionálneho hľadiska. Ďalej maximalizovať súvisiace príležitosti a minimalizovať hrozby.

Štúdia zahŕňa členské štáty EÚ27, EZVO, krajiny a Spojené kráľovstvo. Podrobne analyzuje Nemecko, Taliansko, Francúzsko, Českú republiku, Španielsko, Poľsko a Rumunsko. Tempo a pravdepodobný vplyv prechodu na elektrické vozidlá (EV) na dodávateľov boli zoskupené do troch trhových scenárov: scenár zmiešanej technológie, scenár len EV a zrýchlený radikálny scenár. Scenáre sa líšia v stanovení cieľových hodnôt oxidu uhličitého (CO₂) a povolených

²<https://clepa.eu/wp-content/uploads/2021/12/Electric-Vehicle-Transition-Impact-Report-2020-2040.pdf>

alternatívnych palivách, emisnej legislatívy EURO 7 a vládnych dotáciách (plány obnovy COVID).

CLEPA scenár zmiešanej technológie

Scenár zmiešanej technológie predpokladá do roku 2030 zníženie výfukových emisií CO₂ o 50 %. Scenár predpokladá úlohu udržateľných obnoviteľných palív na dosiahnutie čistého zníženia CO₂ pomocou hybridných a iných technológií a tým aj dosiahnutie parížskych klimatických cieľov. Normy EURO 7 v tomto scenári uľahčia významnú úlohu mierne hybridných elektrických vozidiel (MHEV) pri dosahovaní zníženia emisií CO₂ a že vládne dotácie sa poskytujú len na stimuly na nákup batériových elektrických vozidiel (BEV). Avšak nie na infraštruktúru.

CLEPA scenár len pre EV

Scenár len s EV predpokladá 60 % zníženie emisií CO₂ do roku 2030 a 100 % zníženie do roku 2035. Scenár predpokladá, že norma EURO 7 bude prísnejšia a bude uprednostňovať plne hybridné elektrické vozidlá (FHEV). Predpokladá aj vládnu podporu BEV stimulmi aj financovaním nabíjacej infraštruktúry. To môže vytvoriť sieť približne 1 milióna verejných nabíjajúcich staníc v Európe do roku 2024.

CLEPA radikálny scenár implementácie EV

Radikálny scenár predpokladá 100 % zníženie emisií CO₂ do roku 2030. Scenár predpokladá vysoko reštriktívne emisné normy EURO 7, čo je možné splniť len s výraznými dodatočnými nákladmi na podporu miernych hybridných elektrických vozidiel (MHEV). Predpokladá tiež, že vlády budú podporovať BEV stimulmi a financovaním nabíjacej infraštruktúry, čo pomôže vytvoriť sieť v rovnakom rozsahu ako predchádzajúci scenár.

Hlavné socio ekonomické dopady scenárov štúdie CLEPA sú:

- Elektrifikácia ohrozuje zamestnanosť hnacieho ústrojenstva s potenciálnou čistou stratou až -275 tisíc zamestnancov do roku 2040. Ohrozených bude ďalej 501 tisíc pracovných miest v oblasti výroby motorov s vnútorným spaľovaním (ICE). Tento predpoklad je ale bez započítania nových pracovných príležitostí vytvorených elektrifikáciou.
- Väčšina budúcej pridanej hodnoty v technológiách hnacieho ústrojenstva EV závisí od výroby batérií v EÚ (70 % pridanej hodnoty). Tým európska a národná zamestnanosť bude výrazne závisieť od miestnej výroby batérií.
- Len medzi rokmi 2030 a 2035 VLEPA očakáva čisté zníženie o 291 tisíc pracovných miest: - 359 000 pracovných miest len v doméne ICE, plus kladná transformácia smerom k budúcim potrebám v oblasti softvéru, elektronike, infraštruktúre apod.
- Scenár zmiešanej technológie zmierňuje vplyv na zamestnanosť a vytvára pridanú hodnotu najmä do roku 2040.
- Krajiny západnej Európy budú pravdepodobne najlepšie umiestnené ako bašty vo výrobe elektrických vozidiel (+56,2 mld. EUR pridanej hodnoty do roku 2040). Krajiny strednej a východnej Európy budú naopak ovplyvňované poklesom výroby vozidiel ICE.

Výroba pohonných jednotiek je v Európe mimoriadne dôležitým odvetvím, keď podľa ACEA (2021) predstavuje automobilová výroba (vozidlá a komponenty) 8,6 % zamestnanosti EÚ vo výrobe. Obrovský význam a podiel na dopyte má aj pre odvetvia, ako je výroba ložísk, elektromotorov, chladiacich a ventilačných zariadení a pneumatík. Spolu s týmito odvetviami dosahuje podiel automobilového priemyslu na zamestnanosti 11,6 % a celkovo ide o viac ako

60 % pracovných miest v automobilovej výrobe v rámci dodávateľského priemyslu pre automotive. Priama zamestnanosť vo výrobe automobilov predstavuje viac ako 10 % zamestnanosti vo výrobe v šiestich členských štátoch EÚ. V Rumunsku a na Slovensku predstavuje najvyšší podiel automobilový priemysel s 15,7 % zamestnanosti vo výrobe. Predpokladaný vývoj tvorby pridanej hodnoty a zamestnanosti pri výrobe áut a pohonných jednotiek (PT) podľa CEPTA uvádza graf na obr. 1.2.

Dostupné údaje z ekologických input-output tabuliek Eurostatu do roku 2016 spolu s vyššie uvedenými skutočnosťami potvrdzujú jednoznačný dlhodobý pozitívny trend vplyvu automobilového priemyslu na znižovanie emisií CO₂ v SR.

Country	Vehicle		...whereof Powertrain	
	Value-add €Mn 2018	Employ. in k 2018	PT Value-add €Mn 2020, (2040) ¹⁾	PT employ. in k 2020 (2040) ¹⁾
Germany	24,686	289,876	22,500 (24,200)	150,600 (67,900)
France	7,434	95,820	3,800 (15,600)	27,800 (31,400)
Italy	6,828	95,999	8,700 (4,700)	74,000 (14,800)
Poland	5,161	166,981	2,900 (3,500)	55,100 (43,900)
Spain	4,778	78,593	7,300 (20,300)	72,000 (45,900)
Romania	3,472	169,662	1,900 (3,600)	56,200 (28,700)
Czech Republic	4,412	134,969	2,300 (4,900)	40,700 (40,800)
Hungary	2,224	76,418		
Slovakia	1,648	53,218		
Sweden	1,409	22,814		
Portugal	1,112	32,573		

Focus countries

Obr. 1.2 Pridaná hodnota a zamestnanosť v kľúčových krajinách EÚ7

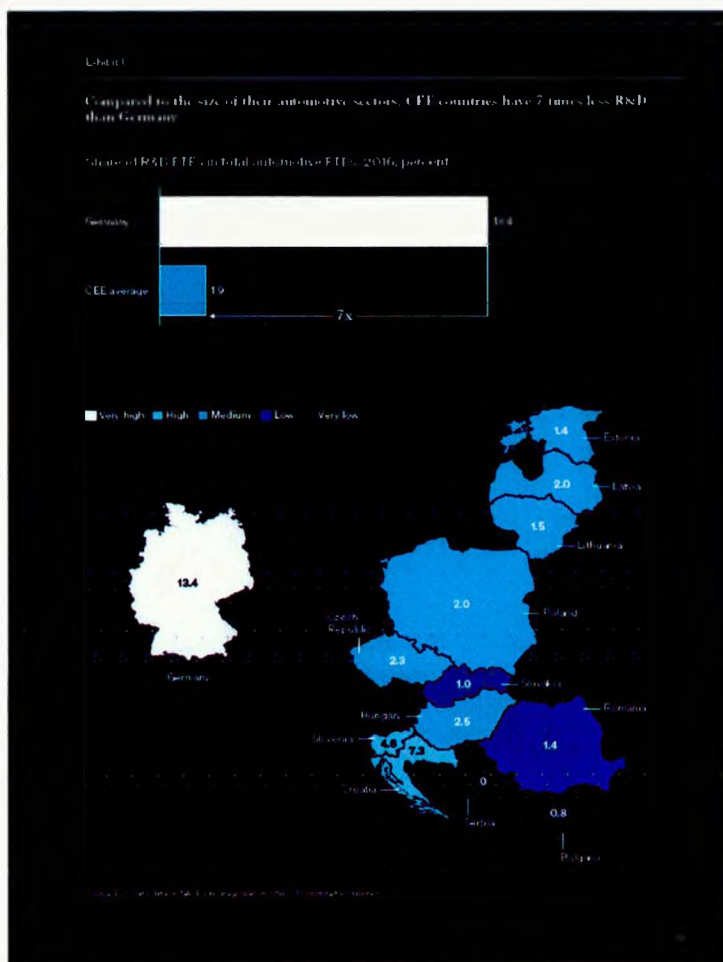
Zdroj: CLEPA.

Podľa dokumentov a stratégie EÚ batérie a ich vývoj považované za jednu nosných technológií pri transformácii automotive. Celosvetový dopyt po batériách (najmä lítium-iónových batériách) vzrástol z viac ako 20 GWh v roku 2010 (takmer čisto pre spotrebiteľské aplikácie) na približne 250 GWh v roku 2020. EÚ očakáva zvýšenie na minimálne 2-3 TWh v roku 2030 a viac ako 10 TWh za rámec tohto horizontu, pričom už v dopyte bude plne dominovať dopyt po batériách v dôsledku prechodu na elektromobilitu. Očakáva sa, že európsky dopyt bude predstavovať 20 – 30 % v porovnaní s celosvetovým dopytom čomu zodpovedá potreba vybudovať kapacity na výrobu batérií.

Aj keď sa v EÚ vyčlenilo veľa financií na budovanie vedomosti o batériách Európa momentálne čelí výzve investovať do veľkovýrobných zariadení na batérie s cieľom uspokojiť narástajúci dopyt a vytvoriť konkurencieschopný európsky batériový ekosystém. Táto stratégia si vyžaduje vychovať skúsených odborníkov, ktorí riadia a pomáhajú realizovať projekty pre výrobu a celý životný cyklus batérie a vychovávať ďalšiu generáciu (generácie) nasledovateľov. Úzkymi miestami sú momentálne rekvalifikácia zamestnancov pracujúcich v odvetviach a oblastiach napojených na výrobu elektromobilov vrátane batérií, ale aj tie, ktoré v budúcnosti zaniknú alebo

budú nahradené (napríklad v dôsledku redukcie výroby spaľovacieho motora a ďalších komponentov).

Ďalším úzkym miestom z pohľadu konkurencieschopnosti Európy a jej krajín je aj schopnosť domácej vedy a výskumu zapojiť sa do procesu tvorby hodnoty v hodnotovom reťazci pri transformácii krajín na elektromobilitu. Ako ukazuje nasledovný graf na obr. 1.3, EÚ krajiny sa výrazne líšia v podiele počtu hodín odpracovaných jedným zamestnancom na plný úväzok (FTE) vo vede a výskume (R&D) k celkovému počtu FTE v automotive. Ako z grafu a už predchádzajúcich štúdií UNIVNET vyplýva, možno v SR vzhľadom na jej prvenstvo vo výrobe počtu osobných automobilov na obyvateľa opäť konštatovať alarmujúci nízky stav zapojenia pracovníkov vedy a výskumu to tvorby pridanej hodnoty v automotive: pri cca. 50 % zapojení voči priemeru EÚ a pri 13 krát menšom podiele voči Nemecku.



Obr. 1.3 Podiel FTE vo výskume a vývoji na celkovom automobilovom priemysle v krajinách EÚ

Zdroj: Rethinking European Automotive Competitiveness – The R&D CEE opportunity. January 2020. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/rethinking-european-automotive-competitiveness-the-r-and-d-cee-opportunity>

1.7 Multi-regionálna input-output analýza vplyvu automotive sektora na zamestnanosť vo svete

Cieľom výskumu v tejto časti bolo preskúmať aktuálny význam automobilového priemyslu vo svete s využitím multi-regionálnej input-output databázy FIGARO 2022 rozšírenej o údaje o zamestnanosti. Keďže súčasné vydanie umožňuje len analýzu z hľadiska hrubej produkcie a pridanej hodnoty neobsahuje komplexné údaje o zamestnanosti podľa odvetví a krajín, v prvom kroku sme preto zostavili databázu zamestnaných v tisícoch osôb, ktorá môže mať širšie využitie v empirickom výskume. V rámci druhej kapitoly preto vysvetľujeme imputáciu údajov o zamestnanosti k multi-regionálnym input-output tabuľkám FIGARO 2022¹. Pre tento účel sme využili údaje z rôznych zdrojov, medzi ktoré patria údaje o zamestnanosti v národných účtoch podľa odvetví z Eurostatu, OECD Trade in Employment Data a údaje o zamestnanosti zo Svetových rozvojových ukazovateľov Svetovej banky. Prepojenie týchto údajov s dátami z databázy FIGARO 2022 nám umožňuje preskúmať význam automobilového priemyslu vo svete z hľadiska zamestnanosti. Okrem priamej zamestnanosti v automotive sektore sa pozrieme aj na podiel zamestnanosti priamo a nepriamo generovanej automotive sektorom na celkovej celosvetovej zamestnanosti s príspevkami jednotlivých regiónov sveta. Súčasťou príspevku je aj subsystémová analýza, ktorá slúžila na výpočet zamestnanosti v regiónoch sveta generovanej konečným dopytom po automobiloch v týchto regiónoch. Výsledky analýzy naznačujú stabilný význam automobilového sektoru vo svete, no aj silnejúci regionalizáciu výrobných reťazcov.

1.7.1 Imputácia údajov o zamestnanosti k multi-regionálnym input-output tabuľkám FIGARO 2022

V prvom kroku sme zostavili údaje o zamestnanosti v tisícoch osôb pre FIGARO tabuľky vydané v roku 2022, ktoré poskytol Eurostat. Sú zostavené pre 46 krajín (vrátane zvyšku sveta, RoW) a 64 priemyselných odvetví a pokrývajú roky 2010 až 2020. Konečná tabuľka má 2944 riadkov, ktoré zodpovedajú 46 krajinám a 64 odvetviám pre obdobie 11 rokov. Krajiny a odvetvia sú zoradené rovnakým spôsobom ako v pôvodných tabuľkách FIGARO 2022.

Pre imputáciu sme museli skombinovať údaje z troch rôznych zdrojov:

- **EUROSTAT:** údaje o zamestnanosti v národných účtoch podľa odvetví (k dispozícii pre 64 odvetví),
- **OECD Trade in Employment** údaje o zamestnanosti podľa odvetví (dostupné pre 45 odvetví) a údaje OECD o zamestnanosti na základe výberového zisťovania pracovných miest – OECD LFS Employment data (agregované/makroúroveň),
- údaje **Svetovej banky** o zamestnanosti zo Svetových rozvojových ukazovateľov – World Bank Development Indicators database (agregovaná/makro úroveň).

Stratégia imputácie bola založená na týchto troch zásadách:

- i) zameranie na EÚ krajiny,
- ii) jednoduchosť a transparentnosť,
- iii) minimálny počet rôznych zdrojov údajov.

Použité bolo údaje Eurostatu za krajiny EÚ-27, Veľkú Britániu, Nórsko, a Švajčiarsko. Až na niekoľko výnimiek opísaných nižšie boli údaje o zamestnanosti k dispozícii za všetkých 64

¹<https://ec.europa.eu/eurostat/web/esa-supply-use-input-tables/figaro>. Podrobná imputácia údajov s kódmi pre replikáciu sú dostupné v Mendeley Data Repository: <https://data.mendeley.com/datasets/gzp7rh25g7>.

odvetví, ktoré sa zhodujú s údajmi v tabuľkách Figaro 2022 a za roky 2010 – 2020. Údaje za niektoré odvetvia boli dôverné alebo chýbali pre Luxembursko, Maltu, Nórsko a Švajčiarsko. Tieto údaje sme imputovali na základe podielov pridanej hodnoty z najbližšej dostupnej agregovanej úrovne údajov. Predpokladajme napríklad, že údaje o zamestnanosti sú k dispozícii za odvetvie C29-C30, Výroba motorových vozidiel, prívesov, návesov a ostatných dopravných zariadení, ale nie za samostatné odvetvia C29 a C30. V tomto prípade, podiely pridanej hodnoty odvetví C29 a C30 v agregovanom odvetví C29-C30 sa vypočítajú z tabuliek FIGARO 2022 a tieto podiely sa použijú na rozdelenie zamestnanosti z odvetví C29-C30 do samostatných odvetví C29 a C30. V prípade Malty boli k dispozícii podrobné údaje za niektoré roky, ale za iné chýbali, preto sme na imputáciu týchto chýbajúcich údajov použili kľzavé priemery. Za Veľkú Britániu chýbali údaje za rok 2020. Imputovali sme ich na základe podielov zamestnanosti v odvetví v roku 2019 a súhrnných údajov o raste zamestnanosti medzi rokmi 2019 a 2020 získaných z databázy Svetovej banky. Týmto spôsobom, sme imputovali údaje za 30 zo 46 krajín v tabuľkách FIGARO 2022. Teraz opíšeme imputáciu pre zostávajúce krajiny, konkrétne: Turecko, Spojené štáty americké, Kanada, Mexiko, Argentína, Brazília, Ruská federácia, India, Čína, Južná Afrika, Japonsko, Južná Kórea, Indonézia, Austrália a Saudská Arábia.

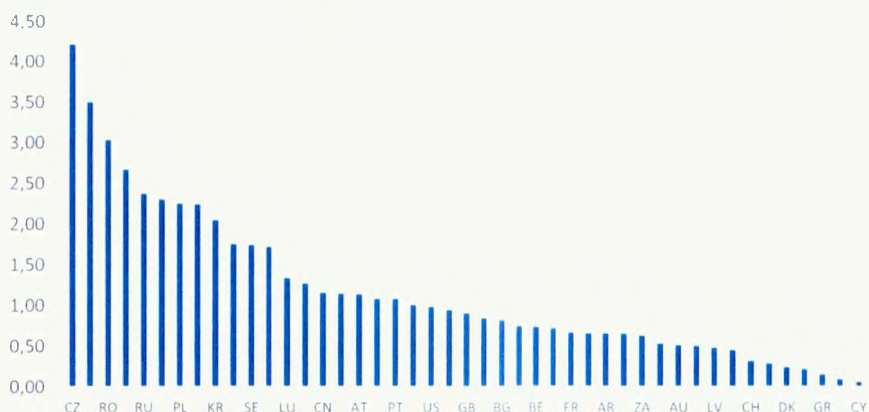
Databáza OECD Trade in Employment (TiM), vydanie 2021, poskytuje údaje o zamestnanosti pre 45 odvetví a prekrýva sa s údajmi FIGARO 2022 za roky 2010 až 2018. Pre väčšinu krajín sú k dispozícii súhrnné údaje o zamestnanosti za roky 2019 a 2020 v databáze OECD LFS Employment. V prípade ostatných krajín (Saudská Arábia, Čína, Indonézia a Spojené kráľovstvo) boli použité údaje z databázy Svetovej banky.

Tieto zdroje údajov sme skombinovali s tabuľkami FIGARO 2022 nasledovne. Najprv sme imputovali údaje zo 45 odvetví na 64 odvetví za roky 2010 až 2018. Urobili sme tak na základe podielov pridanej hodnoty z tabuliek FIGARO 2022. Po druhé sme extrapolovali údaje o zamestnanosti na roky 2019 a 2020 z mier rastu zamestnanosti OECD a Svetovej banky. Tieto údaje sme potom imputovali do odvetví na základe pevnej odvetvovej štruktúry zamestnanosti prevzatej z roku 2018. Analýza zamestnanosti automotive sektora vo svete na základe imputovanej zamestnanosti pre FIGARO 2022.

1.7.2 Význam automobilového priemyslu vo svete z hľadiska zamestnanosti

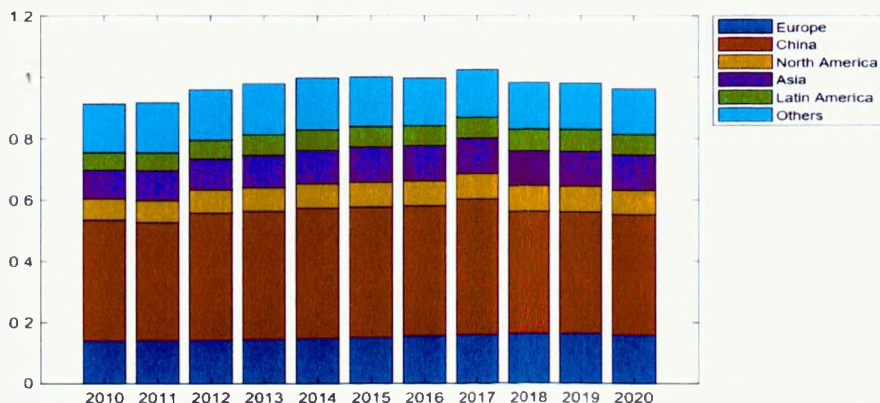
Krajiny Vyšehradskej štvorky patria so svojím podielom zamestnanosti v automobilovom priemysle medzi top 10 krajín v roku 2020. Slovenská republika má s 3,5 % druhý najvyšší podiel priamo pracujúcich v automobilovom priemysle hneď po Českej republike. Medzi krajiny zamestnávajúce viac než 2 % ľudí v automotive sektore okrem V4 zaraďujeme aj Rumunsko, Rusko, Nemecko, Mexiko a Južnú Kóreu (obr. 1.4).

Automobilový priemysel má význam aj z hľadiska celosvetovej zamestnanosti, keď v priebehu poslednej dekády stabilne zamestnáva v priemere 1 % pracujúcich. Z grafu na obr. 1.5 pozorujeme silné zastúpenie v Číne, Európe a Ázii, pričom rastúci podiel možno sledovať aj v Severnej Amerike. Najvýraznejší nárast z hľadiska zamestnanosti vidíme v Európe, kde išlo o postupný proces. Silné roky pre automotive sektor v Číne boli 2014 až 2017, pričom v priemere ide o stabilný podiel 0,4 % na celkovej celosvetovej zamestnanosti. Od roku 2014 možno celkovo pozorovať zvýšený význam tohto sektora pre globálnu zamestnanosť.



Obr. 1.4 Podiel priamej zamestnanosti v automobilovom priemysle na celkovej zamestnanosti, 2020

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.



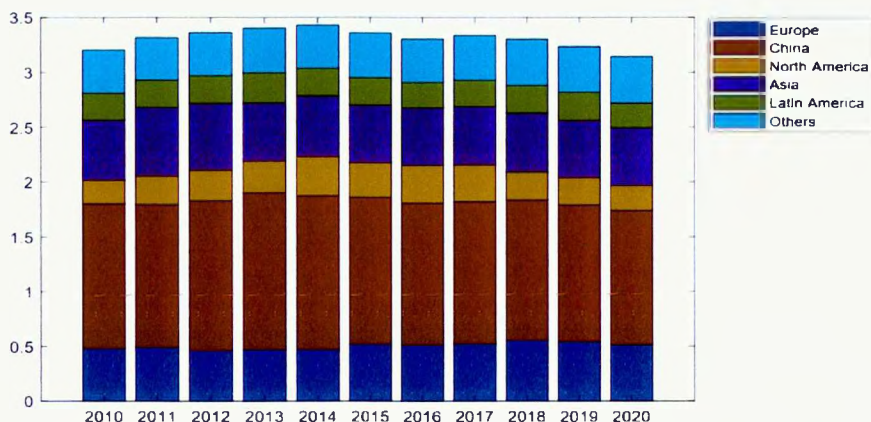
Obr. 1.5 Podiel zamestnanosti v automobilovom priemysle na celkovej celosvetovej zamestnanosti s príspevkami jednotlivých regiónov sveta, 2020, v %

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.

Z hľadiska priamo a nepriamo generovanej zamestnanosti automotive sektorom sledujeme globálne počas celého obdobia 2010 – 2020 podiel nad 3 % s vrcholom v roku 2014 (obr. 1.6). Zastúpenie jednotlivých regiónov sveta je podobné ako v prípade priamej zamestnanosti. Výnimku tvorí len klesajúci podiel zamestnanosti v Severnej Amerike v porovnaní s najsilnejším rokom 2014 a tiež stenčujúci sa podiel Číny. Význam automobilového priemyslu pre európske krajiny v priebehu rokov postupne silnie.

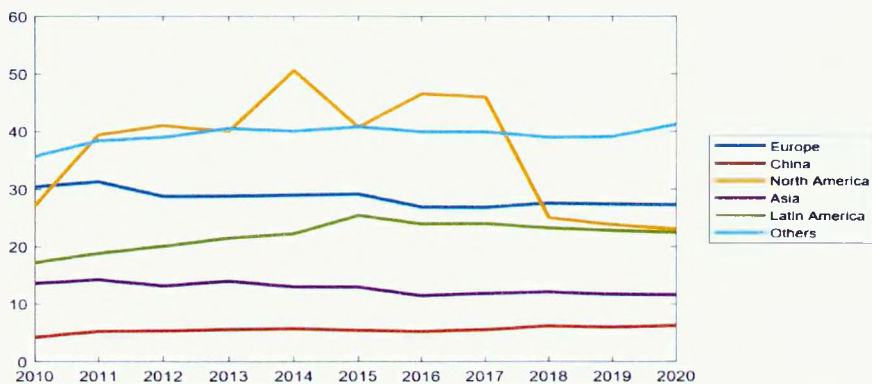
Z grafu na obr. 1.7 pozorujeme výrazne klesajúci podiel offshoringu v Severnej Amerike z 27 % na 23 %. Prvým zlomovým rokom bol 2014, pričom ešte výraznejší pokles možno pozorovať medzi rokmi 2017 a 2018. Podobne klesajúci trend offshoringu sledujeme aj v Európe a ázijských krajinách. Zatiaľ čo v roku 2010 predstavoval offshoring v automotive sektore v Európe takmer 30 %, v roku 2020 to bolo len približne 27 %. Tento trend do veľkej miery kopíruje celkový vývoj offshoringu v spracovateľskom priemysle v daných regiónoch. Výrazný pokles v Severnej Amerike sa zhoduje so zmenou politiky USA, ktorej cieľom bolo vrátiť pracovné miesta v spracovateľskom priemysle (vrátane automotive sektora) späť do Spojených

štátov. Na druhej strane, hodnoty offshoringu v Číne sú v percentuálnom vyjadrení relatívne nízke, v čase sa postupne zvyšujú.



Obr. 1.6 Podiel zamestnanosti v automobilovom priemysle na celkovej celosvetovej zamestnanosti s príspevkami jednotlivých regiónov sveta, 2020, v %

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.



Obr. 1.7 Podiel offshoringu pracovných miest automotive sektora na celkovej generovanej zamestnanosti podľa regiónov sveta, v %

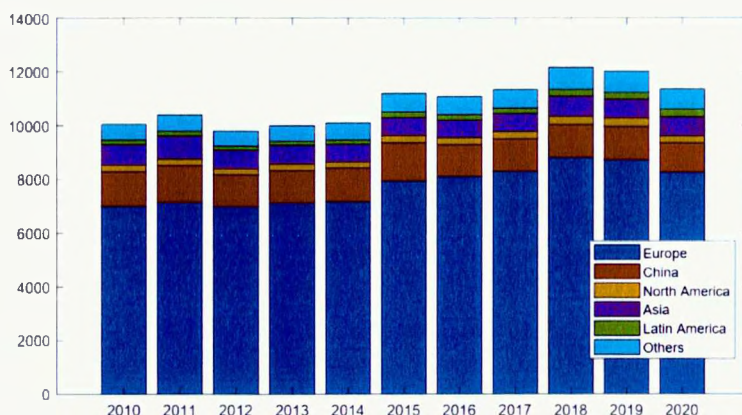
Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.

V nasledujúcich grafoch (obr. 1.8 – 1.12) sa pozrieme na zamestnanosť generovanú v jednotlivých regiónoch priamo aj nepriamo dopytom po produktoch automotive sektora v týchto regiónoch. Pozorovania zo všetkých zoskupení naznačujú silnejúci trend nearshoringu alebo regionalizácie hodnotových reťazcov. Z grafu na obr. 1.8 vidíme, že zamestnanosť generovaná konečným dopytom po automotive sektore v Európe sa sústreďuje v samotnej Európe a má viditeľne rastúci trend. Medzi rokmi 2010 a 2020 narástol počet pracujúcich naviazaných na tento sektor v Európe 1,3 milióna. Tento vývoj opäť korešponduje s nearshoringom pozorovaným v spracovateľskom priemysle najmä od druhej polovice rokov 2010. Súčasne je na dopyt po automotive sektore v Európe naviazanej menej zamestnanosti v Číne a iných ázijských krajinách.

Podobný trend pozorujeme aj na obr. 1.9, z ktorého je viditeľná výrazná závislosť Číny od vlastného konečného dopytu, pričom spomedzi ostatných regiónov silnejú jej väzby skôr s

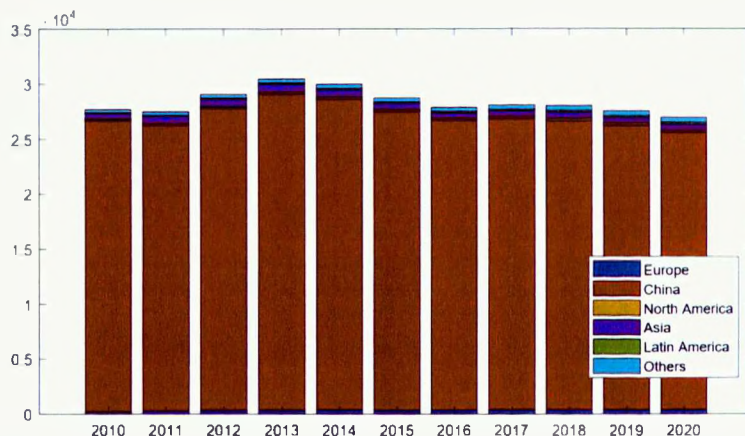
Európou a Áziou než Severnou Amerikou. V priemere bolo v danom období v automotive subsystéme Číny zamestnaných viac než 27 miliónov pracujúcich, pričom offshoringom sa vytvorilo dodatočných skoro 230 tisíc pracovných miest v Európe a Ázii.

Graf na obr. 1.10 potvrdzuje silnejúcu regionalizáciu výrobných reťazcov. Z hľadiska offshoringu z Ázie pozorujeme menší význam Číny a v čase mierne rastúci význam európskych partnerov.



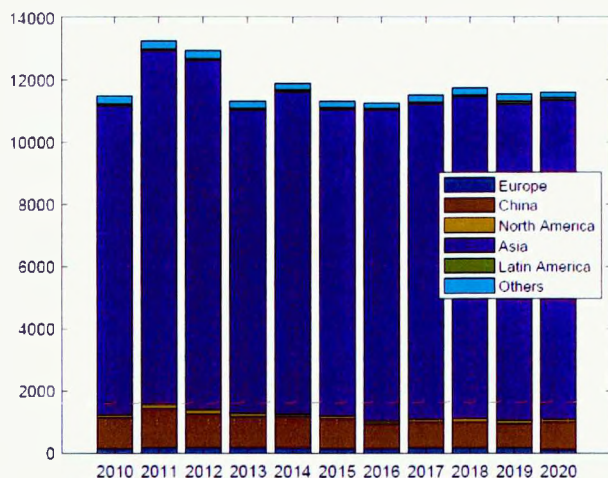
Obr. 1.8 Zamestnanosť v regiónoch sveta generovaná konečným dopytom po automobiloch v EURÓPE, v tis. osôb.

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.



Obr. 1.9 Zamestnanosť v regiónoch sveta generovaná konečným dopytom po automobiloch v ČÍNE, v tis. osôb.

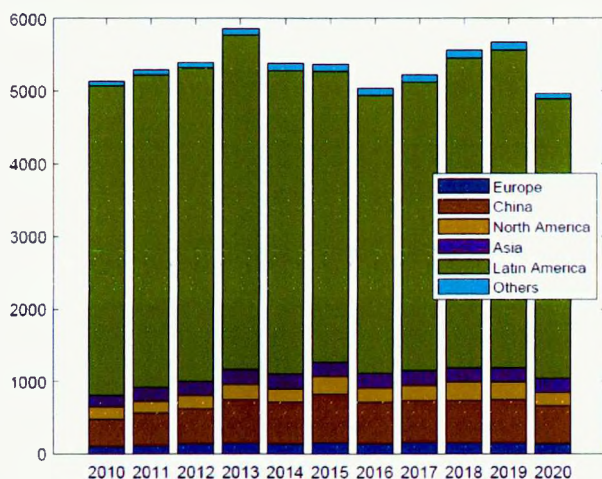
Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.



Obr. 1.10 Zamestnanosť v regiónoch sveta generovaná konečným dopytom po automobiloch v ÁZII, v tis. osôb.

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.

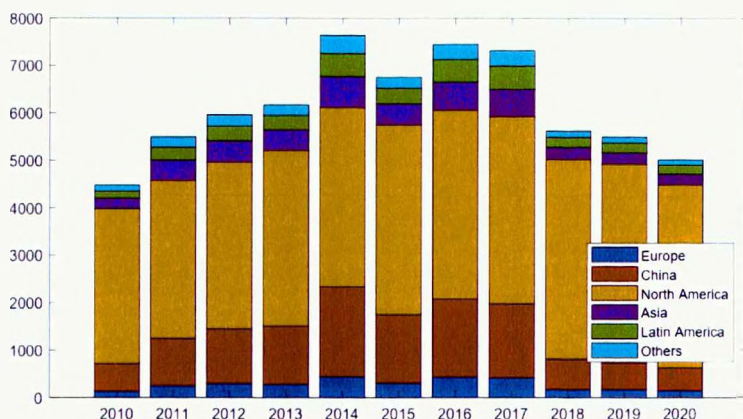
V Latinskej Amerike bol vrchol zamestnanosti generovanej automobilovým priemyslom dosiahnutý v roku 2013. Jeho silnejší význam možno pozorovať aj v rokoch 2017 – 2019. Z regiónov, ktoré sú najviac naviazané na tento dopyt vyniká z hľadiska počtu zamestnaných Čína a Ázia, no pomerne stabilne sa pohybuje počet pracovných miest v Európe aj Ázii.



Obr. 1.11 Zamestnanosť v regiónoch sveta generovaná konečným dopytom po automobiloch v Latinskej Amerike, v tis. osôb.

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.

V Severnej Amerike na obr. 1.12 vidíme na prvý pohľad výrazné oslabenie väzieb s Čínou, ale aj Európou a zvyškom Ázie. Znovu ide o trend, ktorý pozorujeme aj v subsystém pre celý spracovateľský priemysel v USA, Kanade a Mexiku. Výrazné zníženie offshoringu do Číny, Ázie a Európy nastalo najmä od roku 2018, kedy bolo až 75 % zamestnanosti v severnej Amerike naviazanej na domáci dopyt a offshoring smerom do Číny klesol oproti predošlému roku až o takmer 10 percentuálnych bodov, prípadne Európy a Ázie to boli skoro 3 percentuálne body.

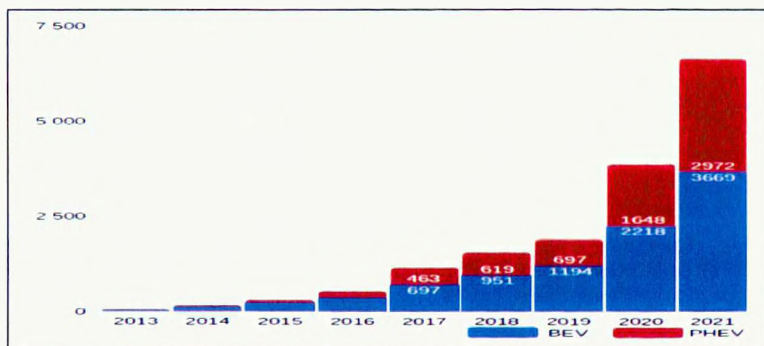


Obr. 1.12 Zamestnanosť v regiónoch sveta generovaná konečným dopytom po automobiloch v Severnej Amerike, v tis. osôb.

Zdroj: Vlastné výpočty na základe imputovaných údajov o zamestnanosti FIGARO 2022.

1.8 Stav, stratégia prieniku elektromobility v SR a možnosti financovania inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti

Evidencia nových EV vozidiel na Slovensku predstavuje 1,66 % a za rok 2021 vzrástla o 66 %, resp. 80 %. Celková registrácia nových osobných vozidiel zaznamenala mierny pokles. Oproti priemeru a najvyspelejším krajinám EÚ však prienik elektromobility SR do predaja áut zaostáva (obr. 1.13).



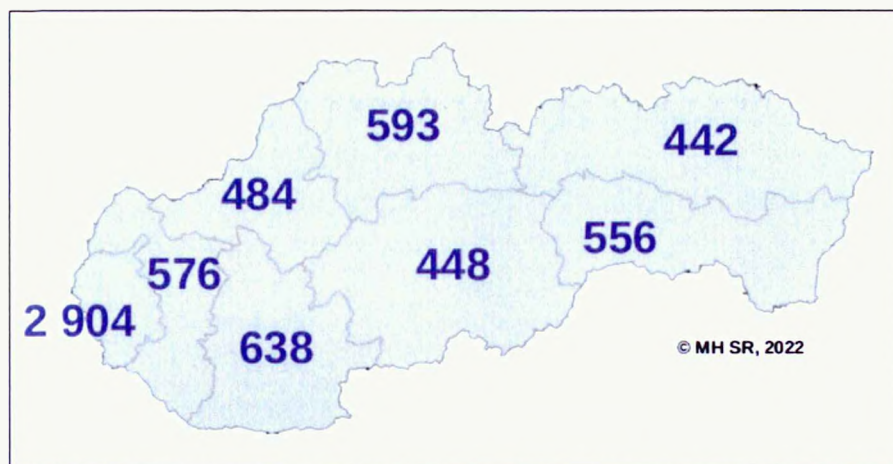
Obr. 1.13 Vývoj počtu BEV/PHEV (M1) na Slovensku

Zdroj: MH SR.

V evidencii vozidiel SR je k 30. 6. 2022 v kategórii vozidiel M1 a N1 celkovo 4 790 BEV a 3 786 PHEV. Ich regionálne rozloženie uvádza obr. 1.14.

K 30. 6. 2022 bolo podľa MHS v kategórii vozidiel M1 a N1 celkovo evidovaných 4 790 BEV a 3 786 PHEV⁴. Na dosiahnutie minimálnej požiadavky potrebuje SR celkový nabíjaci výkon verejne prístupných bodov aspoň 7 288,76 kW. Inštalovaný výkon v tomto čase vysoko prevyšuje požiadavky nariadení EÚ, avšak na konci roku 2024 sa už ukazuje ako nedostatočný.

⁴ Evidencia vozidiel v SR k 30.6.2022, dáta MV SR spracované MH SR



Obr. 1.14 Regionálne rozloženie EV (BEV+PHEV) v krajoch SR k 31.12.2021
Zdroj: MH SR.

1.9 Stratégia podpory elektromobility v SR

Stratégia rozvoja a podpora elektromobility sa v súčasnosti opiera o dokument MH SR⁵: Akčný plán rozvoja elektromobility v Slovenskej republike. Akčný plán rozvoja elektromobility na Slovensku (2022) priamo nadväzuje na Akčný plán rozvoja elektromobility v Slovenskej republike (2019) a na Revíziu a aktualizáciu Národného politického rámca pre rozvoj trhu s alternatívnymi palivami (2019).

Dokument definuje súbor opatrení, ktoré sú rozdelené na 3 hlavné skupiny a to priame finančné, legislatívne a podporné nefinančné opatrenia.

⁵ Dokument je v štádiu pred rokovanim vo vláde.

Tab. 1.1 Akčný plán a jeho východiská.

Název dokumentu	Akčný plán rozvoja elektromobility v Slovenskej republike (2022)
Identifikácia potrieb	nadväznosť na transpozičné a strategické dokumenty: - Návrh Nariadenia Európskeho parlamentu a rady o zavádzaní infraštruktúry pre alternatívne palivá⁶. - Plán obnovy a odolnosti Slovenskej republiky (2021)⁷. - Akčný plán rozvoja elektromobility Slovenskej republiky (2019)⁸. - Národný politický rámec pre rozvoj trhu s alternatívnymi palivami (2019)⁹.
Predkladateľ	Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky
Typ dokumentu	rczortná (sektorová) stratégia, iniciatívny materiál
Spolupracujúce strany pri realizácii dokumentu	- vecne príslušné ministerstvá a subjekty štátnej a verejnej správy, - Slovenská inovačná a energetická agentúra, - distribučné spoločnosti, - Zväz automobilového priemyslu SR, - Slovenská asociácia pre elektromobilitu.
Definovaný cieľ	zavedenie nových politík v oblasti podpory rozvoja elektromobility v Slovenskej republike
Finančné zdroje pre implementáciu opatrení	- štátny rozpočet, - finančné prostriedky subjektov zodpovedných za realizáciu opatrení Akčného plánu, - finančné prostriedky mechanizmu POO SR, - štrukturálne fondy PSK 2021 – 2027.
Roční vývojový plán	2022
Doba realizácie	strednodobá: 2022 – 2026
Schvaľovateľ	Vláda Slovenskej republiky
Forma schválenia	uznesenie vlády Slovenskej republiky
Indikátory	- realizovanie/neralizovanie jednotlivých opatrení, - monitorovanie rastu počtu elektrických vozidiel, nabíjacej infraštruktúry a podporných nefinančných opatrení.
Monitoring	Monitoring realizácie jednotlivých opatrení ako aj problematika zavádzania infraštruktúry alternatívnych palív budú pravidelne vyhodnocované na základe Nariadenia Európskeho parlamentu a rady o zavádzaní infraštruktúry pre alternatívne palivá ¹⁰ . Jednotlivé opatrenia môžu byť zmenené prijatím alebo zmenou európskej legislatívy.

Zdroj: MII SR

⁶ MH SR.

⁷ <https://www.planobnovy.sk/kompletny-plan-obnovy/>

⁸ <https://www.mhsr.sk/uploads/files/5wuw3Lle.pdf>

⁹ <https://www.economy.gov.sk/uploads/files/cmljLKj.pdf>

¹⁰ Členské štáty sú povinné do 31. marca roka 2024, a potom každý rok, poskytovať údaje do 31. marca v kľúčových ukazovateľoch k 31.12.

Tab. 1.2 Opatrenia Akčného plánu.

A. FINANČNÉ OPATRENIA
A1: Národná sieť ultrarýchlonabíjajúcich bodov (UFC)
A2: Finančné opatrenie pre budovanie nabíjacej infraštruktúry
A3: Finančné opatrenie pre budovanie vodíkovej infraštruktúry
A4: Finančné opatrenie pre batériové systémy/úložiská
A5: Finančné opatrenie na nákup bezemisných a nízkoemisných vozidiel
B. LEGISLATÍVNE OPATRENIA
B1: Úprava distribučných taríf
B2: Zabezpečenie dostatočnej kapacity distribučných sústav pre rozvoj nabíjacej infraštruktúry
B3: Zavedenie práva na nabíjací bod ("right to plug")
B4: Pravidlá pre účtovanie nabíjania firemných vozidiel
B5: Podpora v oblasti daní
B6: Zavedenie princípu „znečisťovateľ platí“
B7: Zjednodušenie a zrýchlenie procesu výstavby infraštruktúry
B8: Jednotné stavebné požiadavky pri výstavbe infraštruktúry
B9: Užívateľské výhody pre zelené EČV (evidenčné číslo vozidla).
C: PODPORNÉ OPATRENIA
C1: Zber a publikovanie dát o infraštruktúre

Každé z opatrení detailne definuje: *Gestora, Spolugestora, Termín plnenia, Typ opatrenia, Nadväznosť na cieľ/dokument, Východiská a požiadavky na realizáciu opatrenia, Indikátor úspešnej realizácie opatrenia, Zdroj financovania.*

Stav implementácie Akčného plánu bližšie pozri na: <https://www.slov-lex.sk/legislativne-procesy/SK/LP/2022/747>

1.10 Možnosti financovania inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti

Problematika likvidácie starých vozidiel (ELV) sa netýka len súčasných vozidiel v používaní, ale aj tých ktoré budú spracované v budúcnosti. Demontáž jednotlivých zariadení a komponentov je značne komplikovaná. Obzvlášť nebezpečné sú i rôzne mazivá, brzdové kvapaliny, náplne akumulátorov a iné látky, ktoré sa z autovraku môžu dostať do životného prostredia a ohroziť kvalitu vody a zdravie človeka (Dulebová, Varga; 2011). V Usmernení ELV sa uvádza, že na skládku nie je možné odoslať viac ako 5 % priemernej hmotnosti vozidla, zvyšná časť sa má recyklovať alebo opätovne použiť. Celkový dopad Usmernenia prirodzene vyústil do modifikácie montážneho procesu výroby automobilov (v súvislosti s možnou demontážou), do používania materiálov, ktoré sú recyklovateľné, ďalej do hľadania nových alternatívnych materiálov a nakoniec i do hľadania nových recyklačných technológií, ktoré budú schopné obnoviť dnes nerecyklovateľné materiály. Okrem transformácie ľudského potenciálu je kľúčovým bodom budúcej úspešnej transformácie celého životného cyklu automobilov na elektromobilitu aj podpora financovania výskumu a vývoja, ako aj implementácie nových technológií nakladania s odpadmi, najmä ak ide o problematické odpady (napr. plasty, batérie,

kompozitné materiály, čelné sklá s fóliami, a pod.) a nebezpečné odpady. V ďalšom je uvedený prehľad možností financovania inovačných technológií pri zhodnocovaní odpadov z vozidiel po dobe životnosti.

1.10.1 Vývoj recyklácie starých automobilov v SR

Spoločnosti pôsobiace v oblasti recyklácie starých automobilov začali na Slovensku postupne vznikať v deväťdesiatych rokoch minulého storočia, pričom spracovateľský priemysel starých vozidiel sa začal výraznejšie rozvíjať až na začiatku prvej dekády tohto storočia. V tomto období sa začala vyvíjať aj legislatíva zhodnocovania starých vozidiel. V roku 2001 bol prijatý zákon č. 223/2001 Z.z. o odpadoch, ktorý nahradil vôbec prvý zákon o odpadoch z roku 1991. Zákon platil až do roku 2015, kedy došlo k výrazným zmenám, ktoré ovplyvňujú odpadové hospodárstvo doposiaľ.

Podľa Zákona č. 79/2015 o odpadoch, ktorý nadobudol účinnosť od roku 2016 je starým vozidlom vozidlo, ktoré sa stalo odpadom. Ide o vyhradený prúd odpadov, na ktorý sa vzťahuje rozšírená zodpovednosť výrobcu. Nakladanie s uvedeným vyhradeným prúdom odpadov upravuje piaty diel štvrtej časti zákona, do ktorého boli transponované ustanovenia smernice Európskeho parlamentu a Rady č. 2000/53/ES z 18. septembra 2000 o vozidlách po dobe životnosti a smernice Európskeho parlamentu a Rady 2018/849 z 30. mája 2018, ktorou sa menia smernice 2000/53/ES o vozidlách po dobe životnosti, 2006/66/ES o batériách a akumulátoroch a použitých batériách a akumulátoroch a 2012/19/EÚ o odpade z elektrických a elektronických zariadení.

Významným strategickým dokumentom v odpadovom hospodárstve Slovenskej republiky (SR) na roky 2021 – 2025 je Program odpadového hospodárstva Slovenskej republiky (POH SR). POH SR na roky 2021 - 2025 je v poradí šiestym národným programom ustanovujúcim základné požiadavky, ciele a opatrenia zamerané na oblasť odpadového hospodárstva. Vychádza z vyhodnotenia predchádzajúceho POH SR na roky 2016 - 2020 a z analýzy súčasného stavu a potrieb odpadového hospodárstva SR.

V automobilovom priemysle je cieľom udržať záväzné limity pre rozsah opätovného použitia častí starých vozidiel a zhodnocovanie odpadov zo spracovania starých vozidiel najmenej na 95 % a opätovného použitia a recyklácie starých vozidiel najmenej na 85 %. V rámci POH SR sa to odrazilo prostredníctvom stanovenia dvoch opatrení, a to podporovať financovanie výskumu a vývoja nových technológií nakladania s odpadmi, najmä ak ide o problematické odpady (napr. plasty, kompozitné materiály, čelné sklá s fóliami a pod.) a nebezpečné odpady a podporovať financovanie s cieľom:

- a) implementácie progresívnych technológií na zhodnocovanie problémových odpadov zo spracovania starých vozidiel (napr. plasty, kompozitné materiály, čelné sklá s fóliami, kvapalné nebezpečné odpady, komponenty z elektrovozidiel a pod.), ktoré sú v súlade s BAT,
- b) budovania nových zariadení na spracovanie starých vozidiel, ktoré sú v súlade s požiadavkami pre BAT v tých častiach SR, kde sa nenachádzajú,
- c) modernizovania existujúcich zhodnocovacích zariadení na spracovanie starých vozidiel ktoré sú v súlade s požiadavkami pre BAT.

Podľa výsledkov analýzy vypracovanej Ministerstvom životného prostredia SR (Koreňová, 2022) v období rokov 2005 – 2020 mali odpady z dopravy kolísavý charakter s výrazným nárastom od roku 2017. V roku 2020 odpady z dopravy zaznamenali medziročný pokles o 46,2 %, ale oproti roku 2005 narástli o cca 700 tis. ton.

V súčasnosti platná legislatíva rozdeľuje vozidlá po skončení ich životnosti na dve skupiny. Do prvej skupiny patria osobné a malé nákladné vozidlá s celkovou hmotnosťou do 3,5 tony čiže vozidlá kategórie M1, N1, L2e. Do tej druhej skupiny patria vozidlá ostatných kategórií. Teda aj nákladné vozidlá, traktory, autobusy, trolejbusy, návesy, prívesy, motocykle, štvorkolky, pracovné stroje a iné. Kým prvú skupinu vozidiel bez potvrdenia od autorizovaného spracovateľa starých vozidiel nie je možné trvalo vyradiť (k žiadosti o trvalé vyradenie je potrebné predložiť aj potvrdenie o prevzatí starého vozidla na spracovanie), druhú skupinu vozidiel je v súčasnosti možné odhlásiť z evidencie aj bez takéhoto potvrdenia.

Zber starých vozidiel bol iniciovaný v roku 2001 prevádzkovateľom spracovateľského zariadenia bez náležitého efektu. Evidencia a sledovanie počtu spracovaných starých vozidiel začalo v roku 2004. V počte spracovaných starých vozidiel pretrvával kolísavý trend, s výnimkou rokov 2009 a 2019, kedy došlo k nárastu v zbere starých vozidiel. V roku 2009 to bolo spôsobené tým, že SR zaviedla tzv. „šrotovné“, ktoré sa prejavilo na vysokom náraste v počte odovzdaných starých vozidiel. Systém „šrotovného“ sa uskutočnil v dvoch vlnách. V prvej vlne, ktorá trvala od 9. marca 2009 do 25. marca 2009 bolo autorizovaným spracovateľom odovzdaných na spracovanie 22 100 kusov starých vozidiel. V druhej vlne od 6. apríla do 14. apríla 2009 bolo celkom odovzdaných 20 100 kusov starých vozidiel. Celkovo bolo počas „šrotovného“ odovzdaných 42 200 kusov starých vozidiel.

V roku 2020 počet starých vozidiel bol na úrovni predchádzajúceho roku. Najvyšší počet starých vozidiel bol spracovaný v roku 2009 (67 795 kusov), najmenej ich bolo spracovaných v roku 2005 (3 922 ks). Analýzy skladby odpadov ukazujú, že odpady z vyradených cestných vozidiel tvoria prevažne železné kovy (65 - 80 %), farebné kovy (6 - 6,5 %), pneumatiky (4 - 5 %).

Nakladanie s opotrebovanými pneumatikami v roku 2020 dosiahlo úroveň materiálového zhodnotenia 87,2 % a energetického zhodnotenia 8,7 %. Skládkovanie odpadových pneumatík je podľa zákona o odpadoch zakázané¹¹. Cieľom pre odpadové pneumatiky bolo do roku 2020 dosiahnuť 80 % mieru materiálového zhodnocovania a 15 % mieru energetického zhodnocovania, čo sa podarilo naplniť.

¹¹ Pozn.: okrem pneumatík, ktoré sú použité ako konštrukčný materiál pri budovaní skládky, pneumatík z bicyklov a pneumatík s väčším vonkajším priemerom ako 1400 mm.



Obr. 1.15 Vývoj v zhodnocovaní vozidiel po dobe životnosti

Zdroj: spracované autormi podľa databázy Eurostat

Ak sa pozrieme na vývoj z hľadiska EÚ ako celku, tak v období 2012 – 2016 pozorujeme stabilný trend, ktorý mal následne do roku 2019 rastúcu tendenciu.

V súčasnosti pôsobí v Slovenskej republike 18 zariadení oprávnených na zber a spracovanie starých vozidiel, spracovateľské technológie (Enviroregister, 2023).

1.10.2 Zdroje zo strany štátu

A. Recyklačný fond

Recyklačný fond bol neštátny účelový fond, ktorý od 1. januára 2002 slúžil na sústredovanie finančných prostriedkov od dovozcov a výrobcov komodít stanovených zákonom o odpadoch a ich následné poskytnutie na podporu projektov zakladajúcich a rozvíjajúcich separovaný zber, zhodnotenie a spracovanie opotrebovaných batérií a akumulátorov, odpadových olejov, opotrebovaných pneumatík, viacvrstvových kombinovaných materiálov, elektrických a elektronických zariadení, plastov, papiera, skla, vozidiel, kovových obalov. Prostriedky na projekty bolo možné získať formou dotácie a úveru.

Na základe zákona č. 79/2015 Z. z. o odpadoch, došlo 31. decembra 2016 k zrušeniu Recyklačného fondu.

S podporou Recyklačného fondu sa na Slovensku podarilo vybudovať efektívne fungujúci systém komplexného zberu a spracovania starých vozidiel. Fond sa v priebehu svojho pôsobenia významne podieľal na vytváraní nevyhnutných technických i systémových predpokladov pre efektívne spracovanie starých vozidiel.

Medzi najväčšie projekty na spracovanie starých vozidiel podporené z Recyklačného fondu patria projekty spoločnosti KOVOD RECYCLING, s. r. o., Banská Bystrica. Sídlo firmy je v Banskej Bystrici, ale podpora sa týkala projektov realizovaných po celom Slovensku. Nasleduje spoločnosť ŽP EKO QELET, a. s., Martin, ktorá dostala dotácie na spracovanie karosérií a kovového odpadu pre svoje prevádzky v Žiline a Hliníku nad Hronom a firma AUTO - AZ, s. r. o., Zohor. Okrem podpory zberu a spracovania starých vozidiel, poskytol dotáciu Recyklačný fond aj Združeniu automobilového priemyslu (ZAP) SR na realizáciu informačného systému eZAP, ktorý slúži pre potreby verejnosti, spracovateľov starých vozidiel, výrobcov a zástupcov výrobcov vozidiel.

Je potrebné poukázať na to, že niektoré odpadové sektory – opotrebované batérie, elektrozariadenia, kovové, plastové, viacvrstvé a papierové obaly – dotované prostredníctvom Recyklačného fondu zanikli spolu s ním, nakoľko už vtedy fungovali organizácie či systémy, ktoré vedeli zabezpečiť financovanie zberu a recyklácie týchto druhov odpadov.

B. Environmentálny fond

Environmentálny fond bol zriadený zákonom 587/2004 Z.z. o Environmentálnom fonde ako štátny fond na uskutočňovanie štátnej podpory starostlivosti o životné prostredie. Environmentálny fond je samostatnou právnickou osobou so sídlom v Bratislave. Správu fondu vykonáva Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky. Poskytovanie a použitie prostriedkov fondu musí byť v súlade s prioritami a cieľmi stratégie štátnej environmentálnej politiky schválenej vládou Slovenskej republiky.

Žiadať o podporu môže:

- fyzická osoba, ktorá je občanom Slovenskej republiky a má na území Slovenskej republiky trvalý pobyt a ktorá dovŕšila vek 18 rokov a má vlastný pravidelný príjem, alebo
- právnická osoba a fyzická osoba-podnikateľ so sídlom na území Slovenskej republiky.

V súlade s cieľmi a opatreniami Stratégie environmentálnej politiky Slovenskej republiky do roku 2030 Environmentálny fond vyhlásil Špecifikáciu podpory formou dotácie v oblasti rozvoja obehového a odpadového hospodárstva. Oprávnení žiadatelia sa mohli uchádzať o dotáciu do 17. apríla 2023. Oprávnenými žiadateľmi sú samosprávy miest obcí a krajov, združenia obcí, rozpočtové a príspevkové organizácie verejnej správy.

Činnosti, ktoré podporuje táto dotácia, sú rozdelené do troch oblastí. Žiadateľ sa môže uchádzať len o jednu z nich:

- Triedený zber komunálneho odpadu .
- Predchádzanie vzniku biologicky rozložiteľných komunálnych odpadov a zhodnocovanie biologicky rozložiteľných komunálnych odpadov.
- Zavedenie a zlepšovanie triedeného zberu v obciach, budovanie zberných dvorov a priestorov a centier na opätovné použitie.

Je zrejmé, že momentálne nie je možné na financovanie inovačných technológií spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti čerpať finančnú podporu formou dotácie z Environmentálneho fondu. V prípade kvalitných zámerov spĺňajúcich štandard udržateľného podnikania, je možné spolufinancovanie s podporou štrukturálnych fondov, o čom pojednávame v ďalšom texte.

1.10.3 Zdroje z Európskej únie

Slovensko ako nový členský štát EÚ prvýkrát čerpalo *eurofondy* v oblasti politiky súdržnosti v rokoch 2004 – 2006 v tzv. skrátenom programovom období. Programové obdobie 2007 – 2013 bolo pre Slovensko prvým programovým obdobím, v ktorom malo možnosť využívať zdroje z fondov EÚ v priebehu celého jeho trvania. Z väčšej miery boli zdroje pre odpadové hospodárstvo v období od 2007 – 2013 v gescii Ministerstva hospodárstva SR (Operačný program Konkurencieschopnosť a hospodársky rast), no podporu bolo možné získať aj z programov administrovaných Ministerstvom životného prostredia SR (Operačný program Životné prostredie).

Európska komisia schválila dňa 28. októbra 2014 Operačný program Kvalita životného prostredia (OP KŽP), ktorý predstavuje základný strategický dokument na roky 2014 – 2020

prostredníctvom ktorého sú podporované projekty v oblasti ochrany životného prostredia. Hlavným cieľom operačného programu je ochrana životného prostredia, efektívne využívanie prírodných zdrojov, protipovodňová ochrana a prispôsobenie sa klimatickej zmene, ako aj podpora nízkouhlíkového hospodárstva.

Podpora je zameraná na všetky kľúčové oblasti životného prostredia. V oblasti odpadového hospodárstva sa podpora zameriava hlavne na nakladanie, zhodnocovanie a spracovanie odpadov, čím sa prispeje k zníženiu ukladania odpadov na skládky.

Riadiaci orgán pre Operačný program Kvalita životného prostredia je Ministerstvo životného prostredia SR.

Tab. 1.3 Alokácia finančných prostriedkov v OP Kvalita Životného prostredia

Operačný program Kvalita životného prostredia		3 885 811 623,- EUR
Z toho	Kohézny fond	1 861 112 261,- EUR
	Európsky fond regionálneho rozvoja	1 276 787 849,- EUR
	Národné spolufinancovanie	747 911 513,- EUR

Zdroj: Autori podľa údajov z MŽP SR

Z Kohézneho fondu budú podporované aktivity v rámci prioritných osí 1 a 2 v celkovej výške viac ako 1,861 mld. €, čo znamená, že pre takmer 60 % alokácie prostriedkov fondov EÚ v rámci OP KŽP bude oprávneným územím celé územie Slovenskej republiky. Z Európskeho fondu regionálneho rozvoja budú podporované aktivity v rámci prioritných osí (PO) 3, 4 a 5 v celkovej výške takmer 1,277 mld. €, oprávnené je územie Slovenskej republiky okrem Bratislavského kraja. O finančnú pomoc budú môcť žiadať subjekty verejného, ako aj súkromného sektora, a teda nielen obce, vyššie územné celky a orgány štátnej správy, ale aj široké spektrum združení, ako aj neziskových organizácií, pôsobiach v oblastiach podpory operačného programu, ale aj fyzické a právnické osoby, oprávnené na podnikanie vo vymedzených oblastiach.

Prioritná os 1 má 4 investičné priority. INVESTIČNÁ PRIORITA 1 Prioritnej osi 1: 1.1 Investovanie do sektora odpadového hospodárstva s cieľom splniť požiadavky environmentálneho acquis Únie a pokryť potreby, ktoré členské štáty špecifikovali v súvislosti s investíciami nad rámec uvedených požiadaviek.

V oblasti odpadového hospodárstva je OP KŽP zameraný v zmysle hierarchie odpadového hospodárstva na predchádzanie vzniku biologicky rozložiteľných komunálnych odpadov, podporu triedeného zberu komunálnych odpadov a zhodnocovanie so zameraním na prípravu pre opätovné použitie a recykláciu odpadov.

Dňa 28. októbra 2014 bol Európskou komisiou schválený operačný program Výskum a inovácie pre programové obdobie 2014 – 2020. Tento operačný program zastrešuje Ministerstvo hospodárstva SR.

Celková alokácia OP VaI zo zdrojov EÚ predstavuje 2,26 miliardy eur, z toho viac ako tri štvrtiny všetkých finančných prostriedkov sú určené na posilnenie výskumu, technologického rozvoja a inovácií a zvyšná časť je alokovaná na podporu zvýšenia konkurencieschopnosti malých a stredných podnikov. Oprávnené územie je celé územie SR.

Momentálne prebieha programové obdobie 2021 – 2027. O čerpaní pomoci z fondov EÚ pojednáva strategický programový dokument SR Program Slovensko. Celková suma pridelených európskych zdrojov je 12,6 miliardy eur. Riadiacim orgánom Programu Slovensko je Ministerstvo investícií, regionálneho rozvoja a informatizácie Slovenskej republiky. V rámci

nového programového obdobia by na Slovensko malo prísť 6,3 miliardy z Plánu obnovy zameraného na investície a reformy do roku 2026. V období 2021 – 2027 pôjde veľká časť investícií z eurofondov na inovácie, podporu malých a stredných podnikov, digitálne technológie a modernizáciu priemyslu.

Tab. 1.4 Rozdelenie na prioritné osi a prislúchajúce alokácie z EŠIF

Názov prioritnej osi	Alokácia v rámci OP KŽP v eur	Fond
PO 1: Udržateľné využívanie prírodných zdrojov prostredníctvom rozvoja environmentálnej infraštruktúry	1 441 766 000	KF
PO 2: Adaptácia na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy so zameraním na ochranu pred povodňami	419 346 261	KF
PO 3: Podpora riadenia rizík a odolnosti proti katastrofám v súvislosti so zmenou klímy	260 901 369	EFRR
PO 4: Energeticky efektívne nízkouhlíkové hospodárstvo	938 886 480	EFRR
PO 5: Technická pomoc	77 000 000	EFRR
Celková alokácia	3 137 900 110	KF+EFRR

Zdroj: Autori podľa údajov z MŽP SR

Nami skúmaná problematika v tomto operačnom programe spadá pod politický cieľ Zelenšie Slovensko, kde je alokovaných 4,2 miliardy eur. Investície podporia energetickú efektívnosť, znižovanie emisií skleníkových plynov, energiu z obnoviteľných zdrojov a uskladňovanie energie reflektujú aj globálnu situáciu a potrebu znižovania závislosti slovenskej ekonomiky na energetických zdrojoch z Ruska. Taktiež sa podporia investície na adaptáciu na zmenu klímy, prístupu k vode, na posilnenie ochrany prírody, biodiverzity a zelenej infraštruktúry, ako aj udržateľnú mestskú mobilitu. Podstatná časť zdrojov z nových eurofondov pôjde na ochranu prírody a životného prostredia. Na ochranu prírody a biodiverzity je vyčlenených 721 miliónov eur, najmä na podporu chránených častí prírody a krajiny (248 mil. eur) a prieskum, sanáciu a monitorovanie environmentálnych záťaží (239 mil. eur). Pre zdravší život v mestách a obciach budú dôležité investície do udržateľnej mestskej mobility (891 mil. eur), medzi nimi aj investície do ekologickej verejnej dopravy (491 mil. eur) a cyklodopravy (100 mil. eur).

V období rokov 2021 – 2027 bude pokračovať program LIFE - finančný nástroj Európskej únie pre oblasť životného prostredia a ochrany klímy. Od roku 1992 sa vďaka programu LIFE podarilo zrealizovať takmer 5 500 projektov v celej EÚ a v tretích krajinách.

Program LIFE 2021-2027 sa člení nasledovne:

1. oblasť „Životné prostredie“, ktorá zahŕňa:
 - a. podprogram „Príroda a biodiverzita“;
 - b. podprogram „Obehové hospodárstvo a kvalita života“
2. oblasť „Opatrenia v oblasti klímy“, ktorá zahŕňa:
 - a. podprogram „Zmiernenie zmeny klímy a adaptácia na zmenu klímy“;
 - b. podprogram „Prechod na čistú energiu“

Všeobecným cieľom programu LIFE je prispievať k prechodu na udržateľné, obchodné, energeticky efektívne, klimaticky neutrálne hospodárstvo založené na obnoviteľných zdrojoch energie a odolné proti zmene klímy, s cieľom chrániť, obnovovať a zlepšovať kvalitu životného prostredia vrátane vzduchu, vody a pôdy, zastaviť a zvrátiť stratu biodiverzity a bojovať proti degradácii ekosystémov, okrem iného aj prostredníctvom podpory realizácie a riadenia sústavy Natura 2000, čím sa príspeje k udržateľnému rozvoju.

Celkový rozpočet EK pre program LIFE v programovom období 2021 – 2027 predstavuje 5 432 000 000 eur. Miera spolufinancovania projektov zo zdrojov EÚ je vo výške max. 60% pre štandardné projekty (standard action projects SAPs) v rámci podprogramu Príroda a Biodiverzita, Obehové hospodárstvo a kvalita života, Zmiernenie zmeny klímy a adaptácia na zmenu klímy a max. 95% pre koordinačné a podporné aktivity (other action grants - v rámci podprogramu Prechod na čistú energiu).

1.10.4 Inovatívne formy financovania environmentálnych investícií

Na financovanie inovačných projektov, aj pre oblasť odpadového hospodárstva, je možné okrem grantov a štandardných finančných nástrojov využiť aj alternatívne možnosti financovania, vrátane crowdfundingu. Typy crowdfundingového financovania pre inovácie predstavujú:

- a. Peer – to peer consumer lending
- b. Equity – based crowdfunding
- c. Reward – based crowdfunding
- d. Donation – based crowdfunding.

1.11 Zhodnocovanie odpadov a druhotné suroviny v automotive

Je nesporné, že automobilový priemysel patrí k jedným z najdôležitejších a najrýchlejšie rastúcich odvetví na svete. Súčasný trendy v oblasti mobility a environmentálne otázky postupne čoraz viac vyvíjajú tlak na tento priemysel, aby zlepšil svoje technologické procesy a prístupy s cieľom minimalizovať negatívny vplyv na životné prostredie. Jednou z najvýznamnejších oblastí, ktorá si vyžaduje pozornosť, je riadenie odpadov vznikajúcich počas výroby a likvidácie áut.

V rámci automobilového priemyslu sa vytvára veľké množstvo odpadu a to počas celého životného cyklu automobilu. Vzniknutý odpad môže pochádzať z fáz výroby a likvidácie, vrátane výrobných procesov, používania a demontáže vozidiel. Medzi hlavné zdroje odpadu patria napríklad odrezky a odtrhnuté kusy kovu, použité oleje a mazivá, staré pneumatiky, plastové súčiastky, ktoré sa opotrebovávajú počas životného cyklu.

Zhodnotenie jednotlivých prúdov odpadu, ktoré pramenia z automobilového priemyslu je nevyhnutné a pomáha identifikovať škodlivé látky a nebezpečné materiály, ktoré môžu byť prítomné v odpade. Toto je dôležité z hľadiska ochrany životného prostredia, zdravia ľudí a udržateľnosti. Automobilový priemysel sa musí prispôbiť environmentálnym zmenám a flexibilne reagovať na inovatívne riešenia, ktoré zabezpečia vyššiu výkonnosť a znížia negatívne externality na životné prostredie. Automobilový priemysel je jedným z najdôležitejších sektorov slovenskej ekonomiky, prispievajúci k hospodárskemu rastu a zamestnanosti v naprieč celou krajinou. Tento priemysel je hnacou silou pre rozvoj sektora, inovácií a technologického pokroku na Slovensku, zabezpečujúci pracovné miesta pre desaťtisíce obyvateľov.

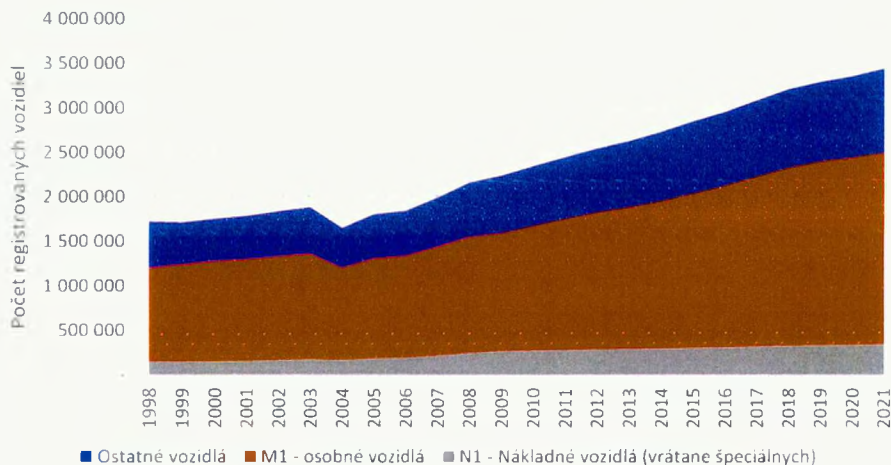
Výroba a export automobilových komponentov a vozidiel prispievajú k obchodnému saldu krajiny a zvyšujú konkurencieschopnosť slovenského hospodárstva. Slovenská republika dlhodobo patrí k najväčším výrobcam automobilov na obyvateľa. Výroba a využívanie

ekologicky efektívnych vozidiel a technológií v automobilovom priemysle pomáha Slovensku plniť spoločné environmentálne ciele v rámci EÚ a znižovať tak emisie skleníkových plynov. Význam automobilového priemyslu pre Slovensko sa prejavuje aj v sociálnej oblasti, keďže výrobné spoločnosti často investujú do spoločensky prospešných projektov, vzdelávania a podpory komunitných aktivít.

1.11.1 Automobilový park na Slovensku

Evidencia vozidiel v Slovenskej republike je povinným procesom, ktorý zabezpečuje presnú evidenciu všetkých registrovaných vozidiel v krajine. Každé vozidlo musí byť registrované a je mu pridelené špecifické evidenčné číslo, ktoré je umiestnené na jeho evidenčnej značke a slúži na jednoznačnú identifikáciu vozidla. Správna evidencia vozidiel je nevyhnutná nielen kvôli správe dopravy, daniam, či poisteniu, ale predovšetkým aj kvôli bezpečnosti cestnej premávky a zabezpečeniu etického prístupu k životnému prostrediu.

Táto činnosť je zodpovednosťou dopravnej polície a je dôležitá pre identifikáciu a sledovanie vozidiel, vrátane ich vlastníkov a aktuálneho stavu registrácie. Štatistický úrad Slovenskej republiky (ďalej len „ŠÚ SR“) zverejňuje databázu o celkovom počte motorových vozidiel v Slovenskej republike. Graf na obr. 1.16 podrobne zobrazuje počet registrovaných vozidiel v Slovenskej republike od roku 1998 až po najaktuálnejšie zverejnený rok 2021. Prehľad vývoja počtu registrovaných vozidiel v Slovenskej republike odhaľuje dynamiku a rast automobilového priemyslu v krajine. V priebehu posledných rokov dochádza k neustálemu zvýšeniu počtu registrovaných vozidiel, čo svedčí o ich neustálej popularite. Výrazný nárast vidíme predovšetkým od roku 2010. Máme za to, že tento rast je spojený s rýchlym hospodárskym rozvojom krajiny, zvyšujúcim sa životným štandardom obyvateľstva a dostupnosťou automobilov na trhu.



Obr. 1.16 Prehľad vývoja počtu registrovaných vozidiel v Slovenskej republike

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov zo ŠÚ SR a MV SR

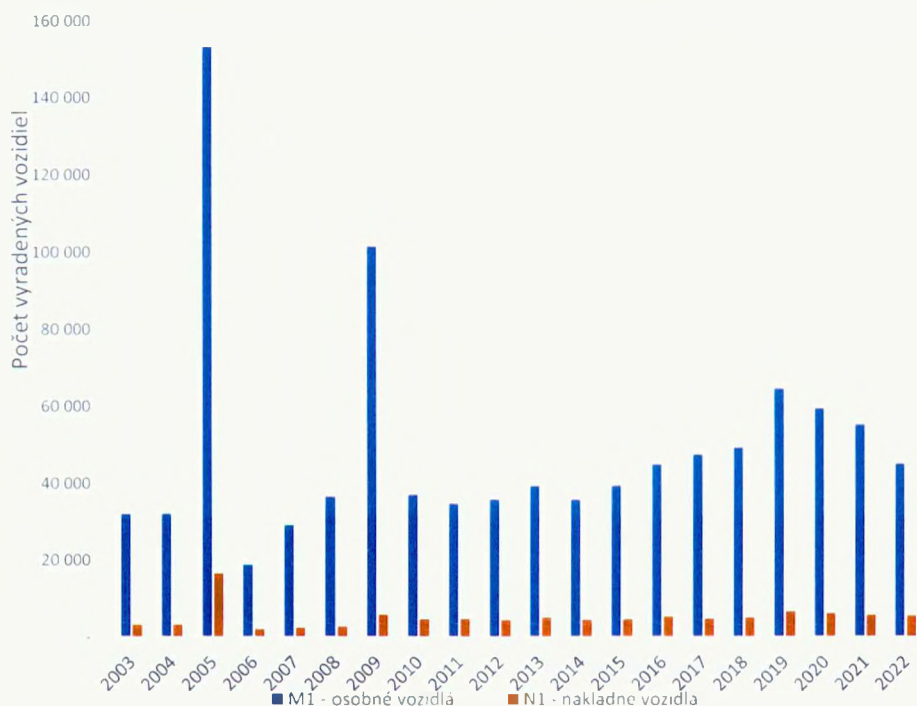
Počas analyzovaného obdobia môžeme pozorovať výraznejší pokles počtu registrovaných len v roku 2004. V tomto roku bola Slovensku zavedená povinnosť platiť daň z motorových vozidiel (Zákon č. 222/2004 Z. z.).

Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky (ďalej len „MV SR“) na svojej webovej stránke pravidelne publikuje údaje aj o počte:

- vyradených vozidiel,
- novoregistrovaných vozidiel,
- individuálne dovezených vozidiel,
- celkovo registrovaných vozidiel.

Graf na obr. 1.17 prezentuje spracované výsledky z databázy MV SR o počte vozidiel vyradených evidencie. Prehľad je vytvorených z údajov dostupných za roky 2003 až 2022. Významné zmeny v počte vyradených vozidiel pozorujeme predovšetkým v roku 2005, kedy bolo z evidencie vyradených až 153 070 vozidiel z kategórie osobných vozidiel do 3,5 tony (M1). Jedným z faktorov, ktoré prispelo k tomuto nárastu patrila zmena legislatíva.

Obyvatelia odložili nákup nového vozidla na ďalšie roky 2006 – 2007 a už stašie existujúce vozidlá boli vo veľkom odstránené z evidencie práve v roku 2005. Deregistrované z evidencie bolo 153 070 vozidiel kategórie M1, čo je doteraz historicky najviac odhlásených vozidiel v jednom roku. Aj v kategórii nákladných vozidiel (N1) došlo k rekordnému počtu odhlásených vozidiel a to v počte 16 493.



Obr. 1.17 Prehľad vývoja počtu vyradených vozidiel v Slovenskej republike

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov z MV SR

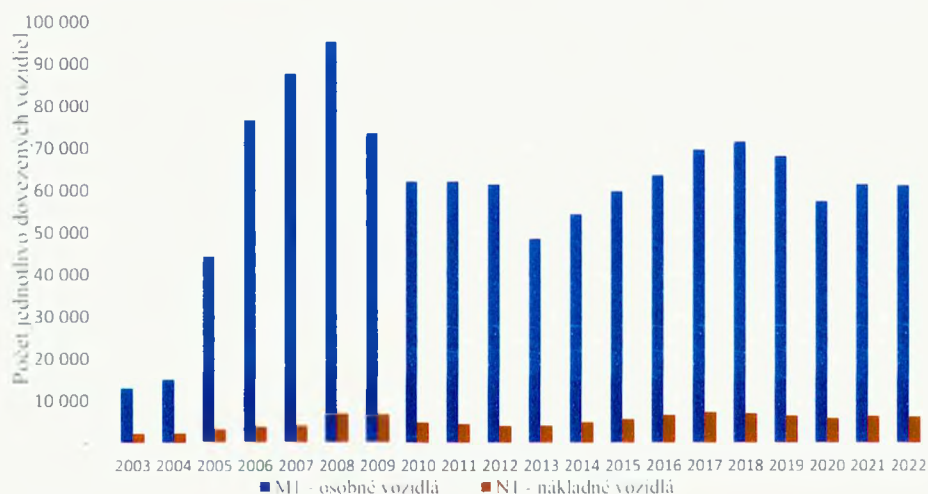
Analyticky dôležitým rokom bol pre automobily aj rok 2009. V roku 2009 na Slovensku nastal nárast počtu áut vyradených z evidencie nielen kvôli ekonomickej recesii spôsobenej hospodárskou krízou. V roku 2009 na Slovensku bolo možné získať dotáciu na kúpu nového vozidla za zošrotovanie starého vozidla. Bolo spustené tzv. „šrotovné“, prostredníctvom predpisu 130/2009 Z. z. Ministerstva hospodárstva Slovenskej republiky.

Výnosom boli ustanovené možnosti poskytnutia dotácie na kúpu nového osobného motorového vozidla, ktoré umožňovali občanom Slovenska získať finančnú dotáciu na nákup nového vozidla za likvidáciu staršieho vozidla. Dotácia sa pohybovala až do výšky 2 000 eur a bola určená na podporu nákupu nových vozidiel, ktoré boli považované za ekologickejšie a energeticky úspornejšie.

Toto opatrenie malo za cieľ podporiť ekonomiku Slovenska, ktorá je z veľkej miery závislá od predaja automobilov, ďalej obnovu vozového parku na Slovensku a zvýšenie podielu ekologickejších vozidiel na cestách. Zákonom boli stanovené podmienky a postupy, ktoré bolo potrebné dodržať pre získanie dotácie, vrátane podania žiadosti, technických parametrov nového vozidla a likvidácie starého vozidla.

Sledovanie vývoja počtu individuálne dovezených vozidiel je dôležité z hľadiska ekonomiky, konkurencieschopnosti, regulácie a životného prostredia pretože poskytuje informácie o trendoch na trhu s vozidlami.

V Slovenskej republike je **jednotlivo dovezené vozidlo** označované ako vozidlo dovážané z iného štátu ako Slovenská republika. Prevádzkovateľ takéhoto vozidla je povinný požiadať schvaľovací orgán o jednotlivé uznanie alebo schválenie jednotlivo dovezeného vozidla, pričom môže ísť o vozidlo dovezené z členského štátu alebo zmluvného štátu alebo tretích krajín. Jednotlivé technické požiadavky, ktoré musí predmetné dovezené vozidlo spĺňať, ustanovuje § 25 vyhlášky č. 132/2018 Z. z.. Počet individuálne dovezených vozidiel v Slovenskej republike za posledné obdobie je zobrazený na obr. 1.18.



Obr. 1.18 Prehľad vývoja počtu jednotlivo dovezených vozidiel v Slovenskej republike

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov z MV SR

Celkový počet bol ovplyvnený viacerými faktormi. Najväčší absolútny pokles u vozidiel z kategórie M1 nastal v roku 2009, kedy bolo v porovnaní s predchádzajúcim rokom dovezených o 21 666 áut menej. Za posledné tri roky sa počet jednotlivo dovezených áut pohyboval pri hranici 60 000. Predpokladáme, že pokles počtu individuálne dovezených vozidiel je následkom oslabenej ekonomickej situácie, ktorú spôsobila pandémia Covid-19, invázia Ruska na Ukrajinu a environmentálne trendy, ktoré sú zamerané na znižovanie emisií.

1.11.2 Vývoj prúdov odpadu z vozidiel po dobe životnosti

Vývoj počtu vozidiel je dôležitým ukazovateľom mobility a transportnej infraštruktúry v krajine, ktoré sú dôležité pre ekonomiku, dopravu a každodenný život obyvateľov. Je dôležité monitorovať a analyzovať tento vývoj s cieľom adekvátne plánovať a riadiť dopravné systémy a riešenia pre budúcnosť. Umožňuje identifikovať hlavné zdroje odpadu a jeho množstvo. To je dôležité pri plánovaní a implementácii odpadového hospodárstva a recyklácie. Tieto informácie poskytujú podklady pre navrhovanie a uplatňovanie efektívnych opatrení na minimalizáciu odpadu a zlepšenie celkovej udržateľnosti priemyslu. V decembri 2019 Európska komisia uviedla Európsky ekologický dohovor, ktorý si stanovil za cieľ dosiahnuť klimatickú neutralitu Európy do roku 2050. Európska únia sa systematicky usiluje o dosiahnutie uhlíkovej neutrality. Medzi jedno z opatrení zaraďujeme aj Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2019/631 zo 17. apríla 2019, ktorým sa stanovujú emisné normy CO₂ pre nové osobné vozidlá a nové ľahké úžitkové vozidlá a ktorým sa zrušujú nariadenia (ES) č. 443/2009 a (EÚ) č. 510/2011.

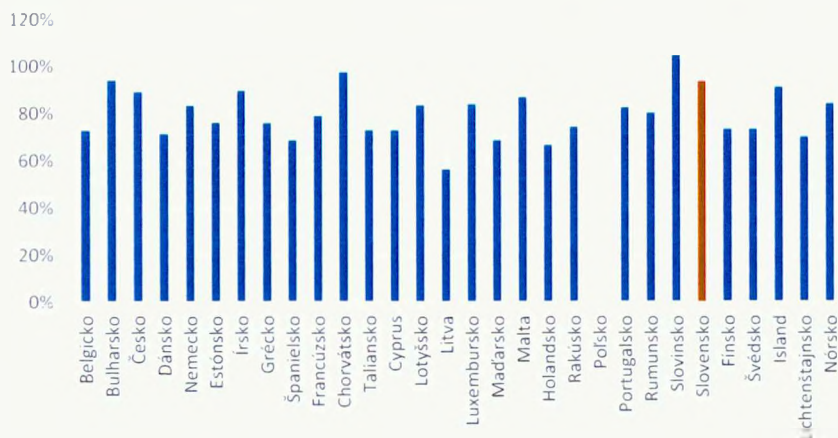
Toto nariadenie stanovuje jasný plán na zníženie emisií CO₂ v odvetví cestnej dopravy s cieľom znížiť emisie skleníkových plynov v celom hospodárstve do roku 2030 v porovnaní s rokom 1990 aspoň o 40 %. V roku 2021 otvorila Európska komisia verejnú diskusiu v nadväznosti na hodnotenie smernice 2000/53/ES o vozidlách po dobe životnosti. Diskusia bola otvorená pre 2 skupiny zainteresovaných strán, a to pre občanov so všeobecným záujmom o oblasť vozidiel po dobe životnosti a iné zainteresované strany, ktoré majú znalosti alebo záujem o vozidlá po dobe životnosti.

Recyklácia vozidiel po dobe životnosti má významný vplyv na udržateľnosť a ochranu životného prostredia. Opätovné využitie vozidiel je významné pre minimalizáciu negatívneho ich dopadu. Využitie a obnovenie materiálov zo starých vozidiel znižuje potrebu ťažby nových surovín. Tým sa šetria prírodné zdroje a znižuje energetická náročnosť výroby nových komponentov. Recyklácia zabezpečuje správne zhodnotenie a zneškodnenie nebezpečných látok, ako sú oleje, palivá, batérie a ďalšie toxické komponenty, ktoré sa nachádzajú v vozidlách. Tým sa minimalizuje riziko ich úniku do prírodných zdrojov akými sú pôda, vody a ovzdušie. Zhodnotenie vozidiel po dobe životnosti prispieva k zníženiu množstva odpadu a jeho skladovaniu na skládkach, čo má pozitívny efekt na životné prostredie a zdravie ľudí. Popri aktuálnych ekonomických trendoch je recyklácia je považovaná za súčasť trvalo udržateľného rozvoja.

Graf na obrázku 1.19 porovnáva podiel recyklovaného odpadu na vygenerovanom odpade vozidiel po dobe životnosti za rok 2020. Podiel porovnáva odpad, ktorý vzniká len z vozidiel kategórie M1 (osobné automobily), N1 (ľahké úžitkové vozidlá) a trojkolesových mopedom. Priemer analyzovaných krajín sa pohybuje na úrovni 80%. V analýze chýba Poľsko ako jediná z krajín EÚ, ktorá v čase písania publikácie nemala dostupné dáta o podiele recyklovaného odpadu z vozidiel po dobe životnosti. Slovensko za rok 2020 recyklovalo 94 % zo vyprodukovaného odpadu z vozidiel po dobe životnosti, čo je nad úroveň priemeru. Najmenší pomer recyklovaného odpadu (56 %) reportovala Litva, najväčší Slovinsko (104 %).

Opad, ktorý vzniká z vozidiel po dobe životnosti osobných automobilov (M1), ľahkých úžitkových vozidiel (N1) a trojkolesových mopedom, je riadený smernicou o likvidácii vozidiel (ELV). Táto smernica stanovuje environmentálne a právne záväzné opatrenia na správne zhodnotenie a zneškodnenie odpadu z týchto vozidiel. Cieľom smernice ELV je minimalizovať negatívny vplyv odpadu z vozidiel na životné prostredie a zdravie ľudí prostredníctvom zavedenia účinných postupov recyklácie a zberu materiálov. V rámci smernice sa stanovujú ciele recyklácie a obnovy materiálov, ako aj zákaz používania nebezpečných látok v nových

vozidlách. Tým sa zabezpečuje správne nakladanie s odpadom z vozidiel, minimalizuje sa ich vplyv na životné prostredie a podporuje sa udržateľný rozvoj v automobilovom priemysle.



Obr. 1.19 Podiel recyklovaného odpadu za rok 2020

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov z Eurostatu

Graf na obrázku 1.20 zobrazuje porovnanie vyprodukovaného odpadu za obdobie od 2007 do 2020 v tonách. Na základe zobrazených údajov vidíme, že najväčší objem vyprodukovaného odpadu z vozidiel po dobe životnosti mala Slovenská republika v roku 2009. Máme za to, že to bolo spôsobené predovšetkým zavedením šrotovaného v roku 2009. Od roku 2016 je na Slovensku kontinuálne recyklovaných viac ako 93 % odpadu z vozidiel po dobe životnosti. Aktívne zhodnocovanie prúdov odpadu z áut je následkom systematických opatrení zo strany štátu, Európskej únie a environmentálnych trendov, ktoré sú sústredené na dosiahnutie uhlíkovej neutrality.



Obr. 1.20 Porovnanie vyprodukovaného a recyklovaného odpadu z vozidiel po dobe životnosti v Slovenskej republike

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov z Eurostatu

Medzi hlavné zdroje odpadu z áut po životnosti patria napríklad batérie, kvapaliny, olejové filtre či iné. Európska únia reportuje na stránke Eurostatu databázu, v ktorej zhromažďuje údaje o vyprodukovanom odpade z áut po životnosti v tonách.

Generovaný odpad zatriedený do nasledovných kategórií:

- opätovné použitie,
- recyklácia,
- energetické zhodnotenie,
- celkové zhodnotenie,
- zneškodňovanie.

V rámci týchto kategórií Európska únia reportuje objem konkrétneho druhu odpadu v tonách. V našej analýze sme sa zamerali na analýzu podielu jednotlivých druhov odpadu, ktoré sú v Slovenskej republike pri autách recyklované.

Tabuľka 1.5 zobrazuje podiel vybraných druhov odpadu, ktoré boli v období rokov 2013 až 2020 recyklované. Na základe údajov konštatujeme, že najviac ton odpadu sa podarilo recyklovať z kategórie železný šrot, a to počas celého nami sledovaného obdobia, nakoľko od roku 2013 až po roku 2020 tvoril, železný šrot viac ako 70% objemu celého recyklovaného odpadu. Druhou významnou kategóriou sú kovové komponenty, ktorých priemerný podiel na celkovej recyklácii sa pohyboval v rámci analyzovaného obdobia na úrovni 9 %.

Tabuľka 1.6 detailne popisuje objem celkového recyklovaného odpadu ako aj jednotlivých druhov odpadu z vozidiel po dobe životnosti uvedený v tonách.

Tab. 1.5 Percentuálny podiel recyklovaných druhov odpadu z vozidiel po dobe životnosti v Slovenskej republike

Kategória	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Pneumatiky	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Kovové komponenty	12%	13%	6%	8%	9%	8%	8%	8%
Veľké plasty	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
Sklo	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	2%
Batérie a akumulátory	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Železný šrot	76%	74%	77%	75%	74%	74%	73%	73%
Neželezné materiály	4%	4%	4%	3%	3%	3%	4%	4%

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe údajov z Eurostatu

Tab. 1.6 Objem recyklovaných druhov odpadu z vozidiel po dobe životnosti v Slovenskej republike v tonách

Kategória	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Recyklovaný odpad	22 917	19 693	32 395	31 065	35 264	49 201	51 356
Odpad z demontáže a odstraňovania znečistenia	4 918	2 739	5 608	5 466	6 216	8 087	9 293
Kvapaliny (okrem paliva)	84	76	100	102	109	170	211
Pneumatiky	422	394	626	568	862	1 047	1 248
Olejové filtre	5	6	8	11	7	7	10
Iné materiály vznikajúce pri odstraňovaní znečistenia (okrem paliva)	102	7	111	75	51	53	224
Kovové komponenty	2 992	1 145	2 730	2 798	2 971	3 762	4 069
Veľké plastové diely	468	442	796	704	863	1 228	1 439
Sklo	312	278	475	409	449	730	913
Iné materiály vznikajúce pri demontáži	364	275	549	484	646	753	739
Batérie a akumulátory	166	110	203	263	234	317	407
Katalyzátory	3	6	10	52	23	21	32
Odpad vznikajúci pri drvení vozidiel	17 998	16 953	26 305	25 111	28 548	40 474	41 143
Železný šrot (ocel') z drvenia	16 928	15 159	24 301	23 108	26 164	35 865	37 522
Neželezné materiály (hliník, meď, zinok, olovo atď.) z drvenia	829	756	997	864	1 085	2 148	2 232
Ľahká frakcia drviča (SLF)	0	821	982	1 065	1 217	1 809	1 143
Ostatné materiály vznikajúce pri drvení	241	217	25	74	81	652	246
Vyvezené vozidlá po dobe životnosti	1	1	482	488	500	639	920

1.12 Záver

Hlavné socioekonomické dopady scenárov prieniku elektromobility v EÚ (štúdie CLEPA) pravdepodobne budú:

- Elektrifikácia ohrozuje zamestnanosť hnacieho ústrojenstva s potenciálnou čistou stratou až -275 tisíc zamestnancov do roku 2040. Ohrozených bude ďalšie 501 tisíc pracovných miest v oblasti výroby motorov s vnútorným spaľovaním (ICE). Tento predpoklad je ale bez započítania nových pracovných príležitostí vytvorených elektrifikáciou.
- Väčšina budúcej pridanej hodnoty v technológiách hnacieho ústrojenstva EV závisí od výroby batérií v EÚ (70 % pridanej hodnoty). Tým európska a národná zamestnanosť bude výrazne závisieť od miestnej výroby batérií.
- Len medzi rokmi 2030 a 2035 VLEPA očakáva čisté zníženie o 291 tisíc pracovných miest: - 359 000 pracovných miest len v doméne ICE, plus kladná transformácia smerom k budúcim potrebám v oblasti softvéru, elektronike, infraštruktúre apod.
- Scenár zmiešanej technológie zmiernuje vplyv na zamestnanosť a vytvára pridanú hodnotu najmä do roku 2040.
- Krajiny západnej Európy budú pravdepodobne najlepšie umiestnené ako bašty vo výrobe elektrických vozidiel (+56,2 mld. EUR pridanej hodnoty do roku 2040). – Krajiny strednej a východnej Európy budú naopak ovplyvňované poklesom výroby vozidiel ICE.

Európa momentálne čelí výzve investovať do veľkovýrobných zariadení na batérie s cieľom uspokojiť narážajúci dopyt a vytvoriť konkurencieschopný európsky batériový ekosystém. Táto stratégia si vyžaduje vychovať skúsených odborníkov, ktorí riadia a pomáhajú realizovať projekty pre výrobu a celý životný cyklus batérie a vychovávať ďalšiu generáciu (generácie) nasledovateľov. Úzkymi miestami sú momentálne rekvalifikácia zamestnancov pracujúcich v odvetviach a oblastiach napojených na výrobu elektromobilov vrátane batérií, ale aj tie, ktoré v budúcnosti zaniknú alebo budú nahradené (napríklad v dôsledku redukcie výroby spaľovacieho motora a ďalších komponentov). Ďalším úzkym miestom z pohľadu konkurencieschopnosti Európy a jej krajín je aj schopnosť domácej vedy a výskumu zapojiť sa do procesu tvorby hodnoty v hodnotovom reťazci pri transformácii krajín na elektromobilitu.

Na základe vlastnej imputácie údajov o zamestnanosti k multi-regionálnej input-output databáze FIGARO 2022 sme preskúmali vývoj automotive sektora vo svete. Hlavným zistením je zmena vo vývoji globálnych hodnotových reťazcov tohto sektora smerom k ich regionalizácii niekedy v rokoch 2014 – 2016. Na základe súčasných otrasov vo svetovej ekonomike môžeme očakávať pretrvávajúci trend smerom k regionalizácii výrobných reťazcov v rámci veľkých regionálnych zoskupení aj v najbližších rokoch.

Tieto zmeny, ktoré už reflektujú a budú reflektovať najmä prienik, scenáre rozvoja a implementácie elektromobility vo svete a v jednotlivých krajinách, zmenia nielen štruktúru dodávateľských klastrov, ale aj zmení sa aj koncentrácia dodávateľských kapacít a komponentov v rámci EÚ. Ukazuje sa, že pripravenosť ľudského potenciálu na štrukturálne zmeny, t.j. vedomosti, zručnosti a flexibilita pracovnej sily, vrátane pripravenosti vzdelávacích, vedeckých, výskumných a školiacich kapacít budú rozhodujúcim faktorom úspechu a využitia šanci, ktoré európske stratégie rozvoja elektromobility poskytujú národným ekonomikám.

Environmentálny aspekt zasahuje celý životný cyklus automobilu, počnúc jeho tvorbou, výrobou, použitím v doprave až po jeho účinnú recykláciu. Aby sa mohli materiály použité pri konštrukcii automobilu znovu použiť a nespôsobovali množstvo odpadu, je potrebné zaoberať sa aspektom ich kvalitnej demontáže pri zachovaní kvalitných druhotných surovín, ktoré sa

môžu vrátiť na opätovné spracovanie. K otázke recyklácie sa dnes pristupuje systematicky už pri konštrukcii automobilu. Každý návrh auta má zohľadnenú ekonomiku recyklácie. Ak v minulosti konštruktéri automobilov riešili skôr dôsledky ako príčiny a zaujímalo ich hlavne to, aby auto vôbec fungovalo, v súčasnosti je snaha vyrobiť auto nielen pohodlné, bezpečné a výkonné, ale aj energeticky úsporné a recyklovateľné.

V článku podávame prehľad možností financovania inováčných technológií pri zhodnocovaní odpadov z vozidiel po dobe životnosti.

Pre financovanie inovácií v odpadovom hospodárstve môžu spoločnosti využiť najmä zdroje zo štrukturálnych a investičných fondov EÚ, programu LIFE, ako i inovatívne formy financovania, napr. crowdfunding

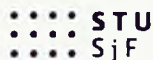
Správne nakladanie s odpadom z áut po dobe životnosti je kľúčové pre udržateľný rozvoj a ochranu životného prostredia. Recyklácia vozidiel a správne zneškodňovanie ich komponentov a látok majú významný vplyv na zníženie environmentálneho zaťaženia a minimalizáciu negatívnych dopadov na prírodu a ľudské zdravie. Praktická aplikácia legislatívnych opatrení a smerníc, ktoré upravujú likvidáciu vozidiel po dobe životnosti, je pre túto oblasť kľúčové a prináša výhody vo forme zníženia ťažby nových surovín, ochrany pred škodlivými látkami a správneho zhodnotenia odpadu. Systematická recyklácia vozidiel poskytuje príležitosti pre ekonomický rozvoj a vytváranie pracovných miest v odvetví recyklácie a spracovania odpadu. Je dôležité, aby sme vytvárali a podporovali trvalo udržateľné opatrenia a iniciatívy na zlepšenie správy odpadu z áut po dobe životnosti a prispievali tak k budovaniu ekologickejšej budúcnosti. Skúmaná oblasť má potenciál pre hlbšie spracovanie predovšetkým v doplnení o kategórie opätovné použitie, energetické zhodnotenie, celkové zhodnotenie a zneškodňovanie a ich predpokladaný vývoj na základe plánovaných legislatívnych opatrení.

Literatúra

- [1] Mitsuo Yamada & Kiyoshi Fujikawa & Yoshito Umeda. 2019. "Scenario input–output analysis on the diffusion of fuel cell vehicles and alternative hydrogen supply systems," *Journal of Economic Structures*. Springer;Pan-Pacific Association of Input-Output Studies (PAPAIOS), vol. 8(1), pages 1-22, December.
- [2] Wellbrock, W., Ludin, D., Röhrle, L. *et al.* Sustainability in the automotive industry, importance of and impact on automobile interior – insights from an empirical survey. *Int J Corporate Soc Responsibility* 5, 10 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40991-020-00057-z>
- [3] Schulze, Anja; et al (2015). Introduction: knowledge generation and innovation diffusion in the global automotive industry–change and stability during turbulent times. *Industrial and Corporate Change*, 24(3):603-611. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dtv015>
- [4] Frank-Martin Belz and Birte Schmidt-Riediger: Business Strategy and the Environment *Bus. Strat. Env.* (2009) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/bse.649.
- [5] Zifan Fang, Wenhui Shu*, Daojia Du, Bingfei Xiang, Qingsong He, Kongde He: Semi-active Suspension of a Full-vehicle Model based on Double-loop Control. 2010 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of Society for Automobile, Power and Energy Engineering.
- [6] Peter Schmidt: The effect of car sharing on car sales. *International Journal of Industrial Organization*, Volume 71, 2020, 102622, ISSN 0167-7187, <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2020.102622>.
- [8] Martin Haluš a Marek Engel': Elektrický pohon dostáva postupne zelenú Porovnanie finančných nákladov nákupu a prevádzky elektromobilov s autami na konvenčný pohon. Komentár 2019/04. https://www.minzp.sk/files/iep/2019_4_elektricky_pohon_dostava_postupne_zelenu.pdf
- [9] George Milev, Astley Hastings, Amin Al-Habaibeh: The environmental and financial implications of expanding the use of electric cars - A Case study of Scotland. *Energy and Built Environment*, Volume 2, Issue 2, 2021, Pages 204-213, ISSN 2666-1233, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.07.005>.
- [10] Casper, R., Sundin, E. Electrification in the automotive industry: effects in remanufacturing. *Jnl Remanufactur* 11, 121–136 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13243-020-00094-8>
- [11] Jean-Paul Skeete, Peter Wells, Xue Dong, Oliver Heidrich, Gavin Harper: Beyond the EVent horizon: Battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition. *Energy Research & Social Science*, Volume 69, 2020, 101581, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101581>.
- [12] Pagliaro M, Meneguzzo F. Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*. 2019 Jun 15;5(6):e01866. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01866. PMID: 31245638; PMCID: PMC6582158.
- [13] Maria Anna Cusenaa, Francesco Guarinoa , Sonia Longoa , Marina Mistrettatb, Maurizio Celluraa: Reuse of electric vehicle batteries in buildings: an integrated load match analysis and life cycle assessment approach. 2019. https://iris.unirc.it/bitstream/20.500.12318/56381/8/Cusenza_2019_EB_Reuse_post.pdf

- [14] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- [15] Dulebová, L. – Varga, J. (2011). Recyklačné technológie v automobilovom priemysle. Dostupné online: <https://www.engineering.sk/clanky2/automobilovy-priemysel/301-recyklacnetechnologievap>
- [16] Koreňová, L. (2022). Odpady z dopravy. Dostupné online: <https://www.enviroportal.sk/indicator/detail?id=903&print=yes>
- [17] MŽP SR (2020). Program odpadového hospodárstva Slovenskej republiky 2021 – 2025. file:///C:/Users/EU/Downloads/02_vlastny_material_poh_-sr_2021_2025_pv-%20(1).pdf
- [18] Sivák, R. – Belanová, K. (2022). Financial Support of Progressive Technologies and Innovations in the Field of Waste Management in Automotive Industry
- [19] In: UNIVNET 2022 – Innovative Machines, Technologies and Materials in Circular Economy Environment : Conference Proceedings. - Košice : Elfa, 2022. - ISBN 978-80-8086-285-5. - Pp. 88-92
- [20] Usmernenie Európskej komisie č. 2000/53/EC
- [21] Zákon č. 79/2015 Z. z. o odpadoch
- [22] Zákon 587/2004 Z.z. o Environmentálnom fonde

Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií – SmartOdpady



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNÍCKA FAKULTA

Riešiteľský kolektív:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Strojnícka fakulta

Hlavný riešiteľ:

prof. Ing. Marcela Pokusová, CSc.

Researchers:

prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.
doc. Ing. Juraj Úradníček, PhD.
doc. Ing. Miloš Matúš, PhD.
doc. Ing. Iveta Čáčková, PhD.
doc. Ing. Juraj Beniák, PhD.
doc. Ing. Peter Križan, PhD.

2 Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií – SmartOdpady

2.1 Úvod

Automobilový priemysel vstúpil do dekády, v ktorej sa očakáva, že zmení svoje produktové portfólio z vozidiel so spaľovacím motorom na elektrické vozidlá, pričom sa do popredia zároveň dostáva požiadavka dlhodobej udržateľnosti. Udržateľnosť v automobilovom priemysle zahŕňa komplexné prehodnotenie priemyselných noriem, zavádzanie a zdokonaľovanie environmentálne a sociálne zodpovedných prevádzok, procesov, produktov a služieb. Trvalo udržateľná výroba znamená implementáciu procesov údržby, kvality a výroby na zníženie odpadu, zlepšenie recyklovateľnosti a opätovné použitie materiálov.

Filozofia platformy „SmartOdpady“ tiež reaguje na požiadavku trvalej udržateľnosti. Je postavená na základných princípoch uplatňovaných v modernom odpadovom hospodárstve, ako sú recyklujúca spoločnosť, uvažovanie v dimenziách životného cyklu, rozšírená zodpovednosť výrobcu, využitie odpadu ako zdroja, hierarchia odpadového hospodárstva, koniec stavu odpadu, obehové hospodárstvo, ktoré sú v platforme reflektované v štruktúre dátového záznamu zariadenia na zhodnocovanie a recykláciu odpadov.

Integrovaná platforma „SmartOdpady“ vychádza z perspektívy vnímania odpadu ako dlhodobého významného zdroja druhotných surovín a energie. Pri jej návrhu bola zohľadnená aj inovačná stratégia SR „Poznatkami k prosperite – Stratégia výskumu a inovácií pre inteligentnú špecializáciu Slovenskej republiky (RIS3)“, ktorá pre automobilový priemysel a strojárstvo identifikovala ako jednu z priorít rozvoj výrobných postupov orientovaných na lepšie využívanie dostupných zdrojov, vyššiu mieru recyklácie a využívanie materiálov priateľských k životnému prostrediu využitím vedecko-technologického rozvoja a inovácií.

V rámci riešenia úlohy projektu UNIVNET zameranej na vývoj integrovanej informačnej a inovačnej platformy „SmartOdpady“ boli v roku 2022 realizované aktivity zamerané na zber údajov pre databázy prevádzkovaných technológií na spracovanie odpadov, testovanie a modernizáciu integrovanej informačnej a inovačnej platformy recyklačných technológií „SmartOdpady“ - www.odpady-az.sk.

2.2 Platforma „SmartOdpady“ a jej potenciál pre trvalú udržateľnosť v oblasti odpadového hospodárstva SR

Vývoj materiálovej štruktúry súčasných automobilov reflektuje stratégiu EÚ vyrábať energeticky úsporné vozidlá vrátane zavádzania inovatívnych technológií vo vozidlách s mimoriadne nízkymi emisiami uhlíka. Požiadavky kladené na súčasné vozidlá si vyžadujú, aby sa v ich konštrukcii uplatňovali komplexné štruktúrované materiály, ktoré sú v mnohých prípadoch problematicky recyklovateľné. Výrazný rast podielu elektroniky a nástup sériovej výroby elektrických vozidiel zo sebou prináša nové výzvy aj v oblasti recyklácie. Surovinová politika EÚ jednoznačne určuje trend zvyšovania podielu druhotných surovín v nových produktoch s dôrazom na zvyšovanie úrovne recyklácie surovín minerálneho pôvodu a efektívneho materiálového či energetického zhodnotenia organických odpadov.

Kvalitné a objektívne informácie sú nevyhnutné pri plánovaní stratégie trvalo udržateľného rozvoja každého odvetvia národného hospodárstva, vrátane sektora odpadového hospodárstva. Je opodstatnené predpokladať, že rozhodnutia o procesoch v odpadovom hospodárstve budú zohľadňovať rôzne toky odpadov, metódy zberu, prepravy a technológie spracovania, aby sa zabezpečila rovnováha medzi metódami zberu a technológiami spracovania z hľadiska

environmentálnej udržateľnosti, nákladovej efektívnosti a spoločenskej prijateľnosti. Vnímanie odpadového hospodárstva v kontexte širších súvislostí a nielen ako procesu zbavovania sa odpadu, vedie k tomu, že nakladanie s odpadmi sa stalo súčasťou globálneho systému riadenia zdrojov a odpady sú významným potenciálnym zdrojom surovín a energie [1 - 3].

Výsledky analýz riešiteľov o kvalite informácií o dostupných technológiách zberu a spracovania odpadov z hľadiska požiadaviek procesov strategického a operatívneho riadenia odpadového hospodárstva na území SR potvrdili opodstatnenosť vytvoriť nástroj – informačnú platformu, ktorý pomôže pri hľadaní vhodných recyklačných technológií a dostupných spracovateľských kapacít resp. upozorní subjekty pôsobiace v sektore odpadového hospodárstva na výskyt takých druhov odpadov, pre ktoré sú obmedzené alebo žiadne možnosti na zhodnocovanie a jedinou voľbou sa stáva zneškodnenie.

Zmena štruktúry hospodárstva SR v zmysle „zeleného hospodárstva (greening the economy)“ nie je možná bez prechodu na tzv. high-tech technológie, ktoré vo významnej miere pracujú s materiálmi na báze tzv. kritických strategických surovín. Je preto potrebné mobilizovať a separovať odpad obsahujúci tieto strategické suroviny, ktorých významným zdrojom je napr. elektroodpad, odpady zo spracovania starých vozidiel a pod. a zároveň podporovať výskum, vývoj a inštaláciu nových, efektívnych technológií na zhodnocovanie odpadov. Surovinová politika SR jednoznačne definuje trend postupného zvyšovania podielu materiálového využívania druhotných surovín, čo bude sprevádzané budovaním nových trhov pre druhotné suroviny [4].

Vývoj spôsobu nakladania s odpadom v SR v rokoch 2018 – 2021 je dokumentovaný v tabuľke 2.1. Porovnanie údajov za roky 2018 a 2021 ukazuje na jednej strane pozitívny trend, keď došlo k zníženiu skládkovania o 7 % a zvýšeniu recyklácie o takmer 9%, ale na druhej strane bol zaznamenaný nárast tzv. iného nakladania s odpadom o približne 7.5 % [5, 6].

Tab. 2.1 Vývoj spôsobu nakladania s odpadom v SR v rokoch 2018 – 2021 [5, 6]

Spôsob nakladania	Spôsob nakladania (%)			
	2018	2019	2020	2021
Skládkovanie	24.8	23.09	17.75	20.3
Spaľovanie	0.34	0.77	0.06	0.14
Iné zneškodnenie	2.38	2.86	1.97	1.7
Energetické zhodnotenie	4.22	3.57	4.64	5.1
Materiálové zhodnotenie (recyklácia)	27.6	28.78	36.53	44.95
Iné zhodnotenie	11.33	7.27	2.21	1.58
Iné nakladanie	29.34	33.66	36.84	26.23

Pod „iné nakladanie“ patria činnosti akými sú zhromažďovanie odpadov (dočasné uloženie odpadov pred ďalším nakladaním s ním), odovzdanie odpadu na využitie v domácnosti, zber, prijatie alebo odovzdanie obchodníkovi či sprostredkovateľovi, či dočasné uloženie odpadu v prekládkovej stanici komunálneho odpadu. Negatívom takéhoto nakladania s odpadom je sťaženie možnosti presnejšie vyhodnotiť skutočný spôsob nakladania s odpadmi.

Prehľad počtu zariadení na spracovanie odpadu sumárne za celé územie SR a v členení podľa krajov v rokoch 2018 a 2020 je uvedený v tabuľkách 2.2 a 2.3 [7]. Z prezentovaných údajov vyplýva, že počet zariadení v absolútnom vyjadrení v roku 2020 klesol o 102 subjektov, čo predstavuje pokles približne o 14 %. Významné zmeny boli zaznamenané pri zariadeniach na energetické zhodnocovanie, kde došlo k úbytku počtu o takmer 50 %, čo hľadiska zmeny objemu

kapacit predstavuje pokles o 25 %. Napriek tomu, že roku 2020 pribudli 2 zariadenia na zneškodňovanie odpadov spaľovaním, celkovo kapacita týchto zariadení klesla o približne 46 %. Podľa údajov Eurostatu, počet zariadení určených na zhodnocovanie odpadov v tomto období v absolútnych číslach klesol o 96 subjektov, čo predstavuje pokles o takmer 15 %.

Tab. 2.2 Prehľad počtu zariadení na spracovanie odpadu v SR (Zdroj: Eurostat)

Nakladanie s odpadom	Počet zariadení		Kapacita (tony/rok)	
	2018	2020	2018	2020
skládkovanie (D1, D5, D12)	109	109		
skládky na NO	10	10		
skládky na NNO	85	85		
skládky na IO	14	14		
spaľovanie (D10)	3	5	78 000	42 000
zhodnocovanie - energetické (R1)	17	9	1 071 000	802 000
zhodnocovanie - recyklácia (R2 - R11)	644	548		
Rozdiel	-102		- 305 000	

Podľa tabuľky 2.3, k najvýraznejšiemu úbytku zariadení na energetické zhodnocovanie (R1) v roku 2020 došlo na západnom a východnom Slovensku. Negatívny vývoj v oblasti dostupnosti kapacít na zhodnocovanie odpadov bol zaznamenaný na strednom Slovensku, pokles o približne 14 %, a na východnom Slovensku, kde zníženie počtu zariadení dosiahlo úroveň 33 % (obr. 2.1).

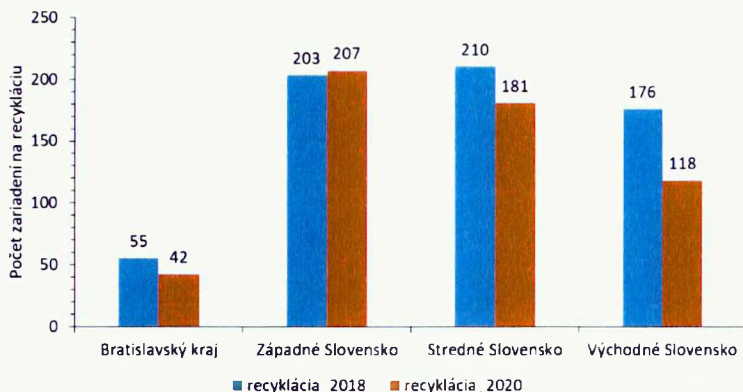
Tab. 2.3 Prehľad počtu zariadení na spracovanie odpadu v SR podľa krajov (Zdroj: Eurostat)

Nakladanie s odpadom	Počet zariadení							
	Bratislavský kraj		Západné Slovensko		Stredné Slovensko		Východné Slovensko	
	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020
skládkovanie (D1, D5, D12)	6	6	39	39	30	30	34	34
spaľovanie (D10)	1	1	0	1	0	3	2	0
zhodnocovanie energetické (R1)	3	2	4	0	2	3	8	4
zhodnocovanie recyklácia	55	42	203	207	210	181	176	118

Dlhodobé oscilovanie objemu produkcie automobilov v SR okolo 1 000 000 kusov/rok znamená aj trvalé významné množstvo vzniku odpadov z výroby automobilov, pričom sa výrazným spôsobom mení ich štruktúra a zloženie. Nové funkčné materiály a štruktúry používané v konštrukciách moderných vozidiel a ich pohonných jednotkách vyvolávajú potrebu vyvíjať nové inovatívne technológie na ich spracovanie po skončení doby životnosti.

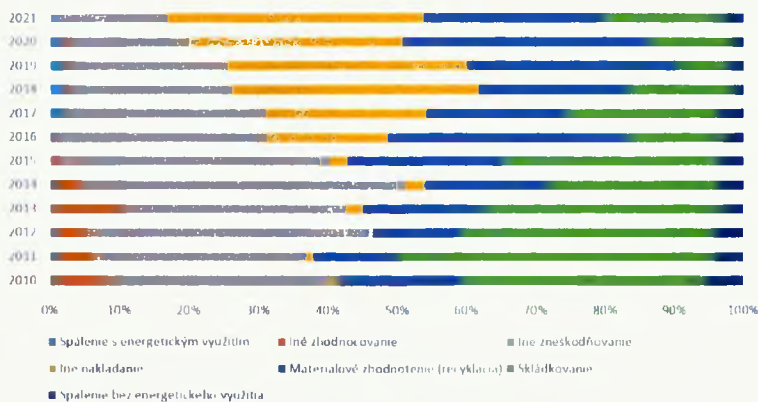
V rámci konzultácií s výrobcami automobilov boli predložené analýzy, z ktorých vyplynulo, že odpadové hospodárstvo SR bude v krátkodobom horizonte čeliť významným problémom s kapacitami na energetické a materiálové zhodnocovanie vybraných priemyselných odpadov, a to najmä nebezpečných (tab. 2.2). Výrobcovia poukazovali na skutočnosť, že problémom nie sú len samotné technológie, ale najmä kapacitné možnosti spracovateľských zariadení, keď dostupné voľné kapacity nie dost' pružne reflektujú potreby rozvíjajúceho sa automobilového priemyslu, ktorý má v oblasti znižovania zaťaženia životného prostredia nastavený ako kľúčový

ukazovateľ hodnotenia výkonnosti množstvo zneškodňovaného odpadu pripadajúce na 1 vyrobené vozidlo.



Obr. 2.1 Počet zariadení na recykláciu podľa krajov SR v období 2018-2020 [vlastné spracovanie]

Názory výrobcov automobilov potvrdzujú aj štatistické údaje o nakladaní s nebezpečnými odpadmi v období rokov 2020 a 2021 (obr. 2.2). V roku 2021 vzniklo na území SR približne 490 699 ton nebezpečných odpadov (vrátane NO, ktorý je súčasťou komunálneho odpadu). V porovnaní s rokom 2020 (436 810 ton) to predstavuje nárast o 12,3 %. Z hľadiska nakladania s nebezpečnými odpadmi je medziročne (2020 - 2021) pozorovaný negatívny trend v nakladaní s nebezpečným odpadom, keď pri skládkovaní bol zaznamenaný nárast o približne 7 % a pri materiálovom zhodnotení (recyklácii) pokles o 10 %. Negatívne možno hodnotiť aj trend trvalého zvyšovania objemu činností nakladania s nebezpečným odpadom vykazovaných ako „iné nakladanie“, pričom v roku 2021 tento spôsob nakladania s nebezpečnými odpadmi predstavoval takmer 37 % [6].



Obr. 2.2 Nakladanie s nebezpečnými odpadmi v SR [6]

Na opačnom konci reťazca životného cyklu automobilu je sieť spracovateľov starých vozidiel. Prieskum medzi spracovateľmi starých vozidiel ukázal, že musia čeliť dvom hlavným problémom. Prvým je ekonomická udržateľnosť modelu podnikania a druhým, nedostatok kapacít alebo úplná absencia vhodných recyklačných technológií na spracovanie odpadov pochádzajúcich zo „starých“ vozidiel. Z celkového množstva odpadov vznikajúcich pri

spracovaní starého vozidla je v súčasnosti možné podľa spracovateľov reálne zhodnotiť resp. zrecyklovať asi 65 % hmotnosti demontovaného vozidla a to kovový šrot, batérie, katalyzátory, sklo a pneumatiky. Pre zvyšnú hmotnosť odpadu, asi 35 %, ktorú tvoria plasty, guma, rôzne tkané materiály, tvrdé a mäkké hmoty na báze polymérov, izolačné materiály a pod. autorizovaní spracovatelia majú problémy nájsť vhodného ďalšieho spracovateľa - recyklátora. V roku 2019 bolo v autorizovaných zariadeniach na území SR spracovaných 41700 starých vozidiel, z ktorých vzniklo približne 4 900 ton odpadu, pre ktorý bolo problém nájsť recyklátora a väčšinou skončil na skládke odpadov. Z uvedeného množstva takmer 34 % tvorili veľké plasty (nárazníky, nádrže, plasty pri motore a plasty z interiéru) a druhú skupinu, viac ako 38 %, tvorili rôzne textilné materiály.

Za jeden z potenciálnych podporných nástrojov, ktorý by umožnil uľahčiť situáciu zainteresovaným stranám pri hľadaní vhodnej technológie nakladania s odpadom, bola označená možnosť vytvoriť platformu, ktorá by poskytovala funkcionality v oblasti pružného poskytovania relevantných informácií v odpadovom hospodárstve. Mal sa vytvoriť komplexný systém pre jednoduché a rýchle vyhľadávanie subjektov zaoberajúcich sa zberom, prepravou a spracovaním odpadu cez katalóg odpadov a ďalšie výberové kritériá, akými sú technológie zhodnocovania, kvalita výstupu, certifikované systémy manažérstva a pod., pričom jeho pridanou hodnotou malo byť využitie výskumných a vývojových kapacít a skúseností univerzít v oblasti technológií spracovania odpadov, aby sa zvýšila miera produkcie a využitia druhotných surovín a znížil podiel zvyškového odpadu zo spracovania odpadu.

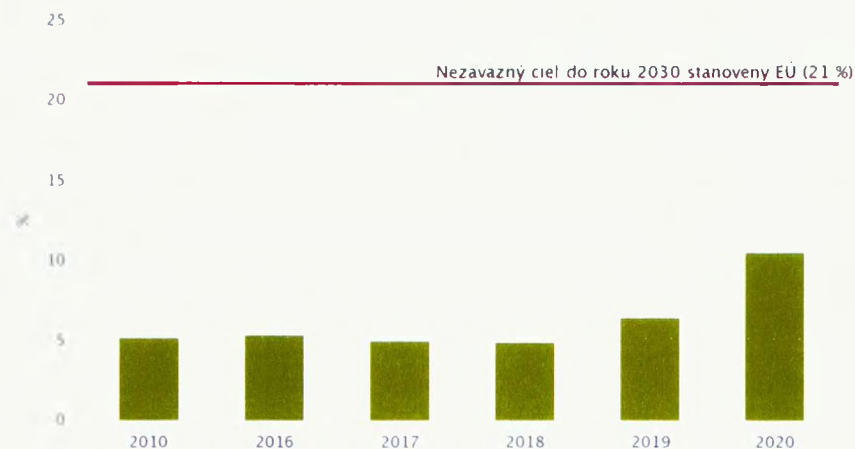
2.3 Obehové hospodárstvo a trhy s druhotnými surovinami v EÚ

Nový akčný plán EÚ pre obehové hospodárstvo prijatý v roku 2020 uvažoval s úpravou pravidiel pre vozidlá po skončení životnosti v tom zmysle, že sa otázky dizajnu produktu prepoja so spracovaním po skončení jeho životnosti, zvýši sa podiel obsahu recyklátov v prípade určitých materiálov, zlepši sa efektívnosť a zvýši kvalita recyklácie [1, 2]. Výzvu pre zvýšenie miery a kvality recyklačných technológií predstavujú špecifické prúdy odpadov akými sú elektrické a elektronické zariadenia, informačné a telekomunikačné zariadenia, plasty a textilie. Recyklácia použitých materiálov zmierňuje riziká spojené s ponukou ako je kolísanie cien surovín, ich dostupnosť alebo závislosť od importu. Platí to najmä pre kritické strategické suroviny využívané pri výrobe širokej škály tovarov a v progresívnych technológiách, ktoré sú kľúčové pre dosiahnutie cieľov v oblasti digitalizácie, vysokej energetickej účinnosti a klimatickej neutrality, napr. akumulátory, batérie a elektrické motory [8 - 10].

Rozvoj trhov s druhotnými surovinami (Second Raw Materials - SRM) je kľúčový pre zabezpečenie obehového hospodárstva, pretože druhotné suroviny umožňujú recyklovateľným materiálom znovu vstúpiť do výrobného hodnotového reťazca, čím sa minimalizuje potreba ťažby a znižuje závislosť od primárnych surovinových zdrojov. V rámci EÚ bolo identifikovaných osem trhov s druhotnými surovinami – hliník, papier a kartón, drevo, sklo, plasty, textil, stavebný odpad a bioodpad, pričom len tri z nich - hliník, papier a sklo - boli označené za dobre fungujúce, medzinárodné a otvorené s významným podielom dodávok na trhu príslušného materiálu. Významne tomu pri hliníku a skle pomáha skutočnosť, že majú v rámci EÚ definovaný stav konca odpadu [11, 12].

Návrat recyklovaného materiálu naspäť do hospodárstva je v EÚ vyhodnocovaný ukazovateľom miery využívania obehových (recyklovaných) materiálov, to znamená, že s narastajúcou mierou využívania obehových materiálov klesá potreba ťažby primárnych surovín, čím sa znižujú aj možné negatívne vplyvy na životné prostredie. Obr. 2.3 dokumentuje, že v období rokov 2010 - 2019 sa miera využívania obehových (recyklovaných) materiálov v SR zvýšila len mierne a

kolísala okolo hodnoty 5 %. Výraznejší nárast bol zaznamenaný medzi rokmi 2019 - 2020, kedy sa tento ukazovateľ zvýšil o 4,1 % [5, 6].



Obr. 2.3 Vývoj miery využívania obehových materiálov v SR [5]

Napriek trvalému tlaku na zvyšovanie miery recyklácie a ponuky recyklátov je ponuka na trhoch s SRM aj v súčasnosti výzvou. Hlavným problémom sú nedostatočné špecifikácie, akými sú kritériá stavu konca odpadu a prítomnosť nebezpečných látok v recyklovaných materiáloch, z čoho pramení na strane dopytu nedostatok dôvery k novým kategóriám druhotných surovín.

Na trhu s plastovými recyklátmi boli identifikované dve zásadné prekážky rozvoja. Jednou je podľa spoločností, ktoré chcú vo zvýšenej miere používať recyklované plasty, najst' dostatočné a stabilné objemy recyklovaných plastov v požadovanej kvalite. Druhou prekážkou je neúplnosť kritérií stavu konca odpadu vzhľadom na heterogenitu vlastností plastového odpadu, čo vytvára nejednoznačnosť, kedy odpad prestáva byť odpadom. Dôsledkom potom je, že fungovanie sekundárneho trhu s plastami sa líši od polyméru k polyméru (tab. 2.4). Napríklad, trh s PET recyklátom funguje relatívne dobre, ale pre väčšinu ostatných polymérov a najmä pre zmiešané plasty/kompozity toto konštatovanie neplatí. Trhy s recyklovaným plastom majú nestabilnú ponuku surovín a ich objem je malý v porovnaní s primárnymi alternatívami. Dopyt po druhotných surovinách v kategórii plastov je stále slabý napriek zvyšujúcej sa ponuke, technická normalizácia nie je na požadovanej úrovni a okrem toho, často existujú aj regulačné prekážky pri používaní tejto kategórie druhotných surovín. Nerozvinuté trhy s recyklátmi sa preto spoliehajú najmä na podporné politiky rozvoja ponuky, napr. prostredníctvom cieľov v oblasti recyklácie odpadu, a dopytu, napr. prostredníctvom požiadaviek na recyklovaný obsah.

Pri vzniku dobre fungujúceho trhu SRM dominujú dva faktory, a to veľkosť trhu a kvalita materiálu z hľadiska priemyselného využitia, ktoré sú dynamicky prepojené. Dobre fungujúci trh dodáva kvalitné druhotné materiály správnym procesom na uzavretie materiálových slučiek, čím sa predchádza environmentálnym, klimatickým, sociálno-ekonomickým problémom a otázkam bezpečnosti dodávok, ktoré súvisia so získavaním primárnych surovín. Takýto trh vysiela správne signály tak na stranu ponuky v podobe podnetov na zlepšenie triedenia odpadu a kvality recyklácie, ako aj na stranu dopytu prostredníctvom stálej ponuky štandardizovaných, kvalitných druhotných surovín dodávaných výrobcom. Je dôležité chápať, že odberatelia druhotnej suroviny sa pri nákupe rozhodujú najmä alebo výlučne na základe ceny suroviny a kvality alebo technických vlastností materiálu.

Tab. 2.4 Plastový odpad ako zdroj druhotnej suroviny [8]

Odpadová surovina	Výrobok po skončení životnosti	Materiálová skupina	Druhotné suroviny
Odpad z obalov	plastové obaly	Termoplasty (PET, HDPE, PVC, LDPE a i.)	zmesové plasty, recyklované monopolymérové vločky, regranuláty, pyrolýzny olej
Odpad z technických plastov	automotive, EEE, stavby a budovy	Termoplasty (ABS, HIPS, PC a i.)	zmesové plasty, recyklované monopolymérové vločky, monoméry, regranuláty, pyrolýzny olej

ABS (acrylonitrile butadiene styrene); EEE (odpad z elektrických a elektronických zariadení); HDPE (high-density polyethylene); HIPS (high-impact polystyrene); LDPE (low-density polyethylene); PC (polycarbonate)

Z pohľadu odberateľa medzi procesmi výroby primárneho a sekundárneho materiálu existuje zásadný rozdiel. Kým v prípade primárneho materiálu je prístup odberateľa pri výbere kvality svojich surovín vysoko selektívny a je určený jeho potrebami, potom v druhom prípade je voľba suroviny na báze odpadu limitovaná zložením, objemami, kvalitou a cenou vyprodukovaných a zhromaždených odpadov. Cena recyklátu často nedokáže konkurovať materiálom vyrobeným z primárnymi surovín. Tu by mal štát pozitívnejšie motivovať recyklátorov, napríklad propagovaním významu značiek EcoLabel, EcoDesign alebo rôznymi formami daňových úľav. Kvalita odpadových surovín vo významnej miere závisí od politik odpadového hospodárstva, ako sú právne záväzné ciele zberu a recyklácie podľa hmotnosti alebo environmentálne a spoločenské záujmy.

Fungovanie hodnotového reťazca odpadu významne ovplyvňujú aj dve fázy materiálového cyklu, ktoré nie sú jeho súčasťou, a to dizajn a výroba produktu a konečný dopyt po výrobkoch obsahujúcich recykláty [13, 14]. Spotrebiteľský odpad pozostáva zo zmesi vyradených produktov na konci životného cyklu, ktoré sú vyrobené z rôznych materiálov, pričom oddelenie jednotlivých materiálov z produktov po skončení životnosti pre potreby recyklácie je možné uľahčiť už vo fáze dizajnu produktu. Odber druhotných surovín v množstvách a kvalite, ktoré umožnia ich využitie vo výrobných odvetviach, sa bude realizovať len vtedy, ak bude trvalý a dostatočný dopyt po výrobkoch výrobcov, ktoré obsahujú vo svojich materiáloch recyklovaný obsah.

Vznik a rozvoj trhov s druhotnými surovinami – recyklátmi ovplyvňuje komplex rôznych prekážok, ktoré sú vo väčšine prípadov vzájomne prepojené. Korektnému fungovaniu trhov s druhotnými surovinami môžu brániť technické prekážky vrátane kvality druhotných surovín. Nedostupnosť alebo nedostatočný prístup k vhodným technológiám v rôznych etapách nakladania s odpadom - od jeho zberu cez recykláciu až po používanie druhotných surovín vo výrobných aplikáciách, vrátane primeraných kontrol kvality v rôznych fázach hodnotového reťazca (obr. 2.4) – od zberu odpadu cez výsledovateľnosť kontaminantov až po štandardizáciu druhotných surovín, môže viesť k tomu, že recykláty nebudú konkurencieschopné s primárnymi materiálmi z dôvodov technickej zameniteľnosti alebo výšky nákladov. Napriek tomu, že ponuka odpadu na recykláciu a dostupnosť druhotných surovín je podporovaná rôznymi politikami a nástrojmi, na mnohých trhoch s novými recyklátmi sa môže v niektorých miestach reťazca vyskytnúť evidentný nedostatok spracovateľskej kapacity. Napríklad nedostatočná kapacita na recykláciu mnohých druhov plastov, ako sú napr. plasty zo starých vozidiel, sťažuje nakladanie s veľkým množstvom plastového odpadu, ktorý vzniká pri separovanom zbere [11].



Obr. 2.4 Hodnotový reťazec tvorby druhotných surovín [8]

Kvalita druhotných surovín závisí výrazným spôsobom od kvality systému zberu. Čím je odpad homogénnejší, tým ľahšie si odpadový materiál po recyklácii zachová svoje technické charakteristiky a vlastnosti počas svojej druhej životnosti. Zber odpadu na recykláciu podporujú aj schémy rozšírenej zodpovednosti výrobcu (EPR – Extended Producer Responsibility) v kombinácii s cieľmi a povinnosťami zberu a recyklácie stanovenými v legislative EÚ. Rozšírená zodpovednosť výrobcu znamená, že firmy nesú plnú zodpovednosť za dopady svojich výrobkov na životné prostredie v celom ich životnom cykle, t. j. od voľby materiálov a dizajnu nových výrobkov, cez výrobný proces, používanie výrobkov a ich opätovné použitie až po ich environmentálne zneškodnenie v okamihu, keď doslúžia [13, 14].

Je však potrebné poznamenať, že súčasné ciele recyklácie sú založené na kvantitatívnych ukazovateľoch, nezameriavajú sa na kvalitu vyzbieraného odpadu a nerozlišujú medzi materiálovými druhmi (okrem obalov).

Vyššie uvedené synergie zohľadnili autori aj pri návrhu koncepcie a vývoji subsystému „zber – preprava – spracovanie“ a subsystému „inovácie“ informačnej a inovačnej platformy „SmartOdpady“, do ktorých sa premietla práve požiadavka zvýšiť kvalitu a rozšíriť možnosti využitia druhotných surovín, podporiť rozvoj trhov s recyklátmi v SR a ich uplatnenie v nových produktoch, a znížiť podiel zvyškového odpadu zo spracovania odpadu.

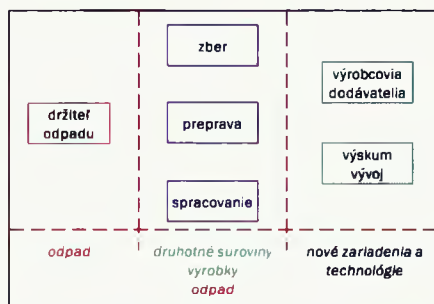
2.3.1 Platforma „SmartOdpady“ ako nástroj na podporu recyklácie a trhu s druhotnými surovinami v SR

Pri triedení odpadu sa cieľové materiály oddeľujú od ostatných materiálov, aby sa vytvorila monomateriálová surovina pre proces recyklácie, ktorý mení formu odpadu na druhotnú surovinu, ktorú je možné použiť pri výrobe nových produktov. Fáza separácie a recyklácie je rozhodujúca, pretože ovplyvňuje množstvo a kvalitu druhotnej suroviny uvedenej na trh. Jej ekonomická hodnota je úzko spojená s mierou obnovených alebo zachovaných funkcií, t. j. s mechanickými, fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami, preto napríklad ocelový šrot triedený v súlade s kritériami stavu konca odpadu sa predáva za vyššie ceny ako zmes šrotu obsahujúca rôzne druhy zliatin. Kľúčovou regulačnou prekážkou rozvoja trhov druhotných surovín je nedostatok kritérií stavu konca odpadu (End-of-Waste criteria - EoW) pre väčšinu z nich na úrovni EÚ, dôsledkom čoho je tvorba rôznych vnútroštátnych klasifikácií, ktoré majú iba regionálnu platnosť. Právna neistota súvisiaca so stavom konca odpadu potom v mnohých prípadoch ovplyvňuje aj investičné rozhodnutia výrobcov a používateľov recyklovaných materiálov [12].

Analýzy realizované riešiteľmi ukázali, že slovenská ekonomika má významný potenciál na zlepšenie využívania existujúcich zdrojov pôvodom z odpadov – druhotných surovín. Jeho plné využitie si však vyžaduje sústrediť pozornosť na podporu výskumu a vývoja moderných recyklačných technológií nielen v oblasti komunálneho, ale aj priemyselného odpadu, ako aj na výstavbu recyklačných kapacít pre tie komodity, kde recyklačné kapacity chýbajú alebo sú nedostatočné.

Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií „SmartOdpady“, vyvinutá v rámci riešenia projektu UNIVNET, bola na základe požiadaviek automobilového priemyslu a spracovateľov odpadov vytvorená ako nástroj, ktorý má aktívne podporiť transformáciu odpadového hospodárstva v súlade s cieľmi obehového hospodárstva, s čím úzko súvisí aj podpora rozvoja trhov s druhotnými surovinami. Primárnym cieľom platformy pri jej aktívnom využívaní je zvýšiť úroveň materiálového zhodnocovania špecifických ťažko spracovateľných odpadov a tiež tzv. kritických strategických surovín, znížiť spotrebu primárnych surovinových a energetických zdrojov, a zároveň minimalizovať zaťaženie životného prostredia obmedzením skládkovania a znečisťovania ostatných zložiek životného prostredia.

Vnútna štruktúra platformy je tvorená dvomi zónami (obr. 2.5), ktoré sú vzájomne prepojené. Prvou zónou je informačný subsystém „zber – preprava – spracovanie“, v ktorom má držiteľ odpadu možnosť vyhľadať environmentálne a ekonomicky najpriateľnejší spôsob spracovania odpadu napr. s ohľadom na výstup aplikovanej technológie, ktorým môže byť odpad, druhotná surovina alebo certifikovaný výrobok.



Obr. 2.5 Konceptia vnútornej štruktúry integrovanej platformy „Smart Odpady“

Pri rozhodovaní o základnej štruktúre dát zhromažďovaných a spracovávaných platformou autori vychádzali z jej primárneho zámeru, ktorým je poskytnúť informácie o technológiách a ich kapacitách prevádzkovaných v systéme nakladania s odpadom a ich lokalizácii s cieľom zjednodušiť informované rozhodovanie subjektov v odpadovom hospodárstve. Zároveň mali byť k dispozícii aj údaje relevantné pre účely identifikovania kritických oblastí spracovania odpadov, plánovania rozvojových aktivít v odpadovom hospodárstve, alebo vytváraní nových podnikateľských príležitostí. Na platforme bolo vytvorených 8 registrov pre subjekty zabezpečujúce základné operácie nakladania s odpadom (obr. 2.6).

REGISTRE	ZDROJOVÉ TABUĽKY (zákon č. 79/2015 Z.z.)
Register zariadení na zber odpadu	Katalóg odpadov
Register zariadení na spracovanie odpadu	Katalóg technológií
Register prepravcov odpadu	Katalóg činností zhodnocovania
Register držiteľov odpadu	Katalóg činností zneškodňovania
Register výskumných organizácií	Katalóg typu zariadení (stacionárne, mobilné)
Register výrobcov/dodávateľov technológií	Katalóg súhlasov
Register výziev na projekty	Katalóg autorizácií
Register projektov	

Obr. 2.6 Registre a zdrojové tabuľky

Pri vytváraní konkrétneho registračného záznamu o subjekte sa niektoré dáta čerpajú zo zdrojových tabuliek t.j. katalógov, ktoré obsahujú predpísané hodnoty v súlade so zákonom č.

79/2015 Z.z. o odpadoch. Jednou zo zdrojových tabuliek (obr. 2.6) je katalóg technológií (tab. 2.5), ktorý obsahuje štruktúrovaný strom technológií vyskytujúcich sa v reťazci nakladania s odpadom. Autori ho vytvorili na základe katalógu odpadov a technickej analýzy dostupných resp. prevádzkovaných technológií na území SR. Strom na najvyššej, prvej úrovni vychádza z etáp nakladania s odpadom resp. hierarchie odpadového hospodárstva – zber, úprava, zhodnocovanie, zneškodňovanie, príprava na opätovné použitie (TKTL_OBLASTI), ktoré sa na druhej úrovni člení do skupín podľa princípu aplikovaných procesov - mechanické úpravy, materiálové zhodnocovanie, skládkovanie a pod. (TKTL_PROCES). Najnižšiu úroveň predstavujú konkrétne v súčasnosti známe alebo aplikované metódy spracovania odpadu (TKTL_NAZOV). Katalóg je navrhnutý ako otvorená databáza, ktorú je možné editovať pridávaním ďalších technológií v závislosti od technického a technologického pokroku v oblasti nakladania s odpadmi, resp. v súlade s novými technológiami s úspešne ukončeným povolovacím procesom resp. procesom posudzovania vplyvov na životné prostredie (EIA).

Tab. 2.5 Štruktúra katalógu technológií nakladania s odpadom

TKTL_KO D	TKTL_NAZOV	TKTL_PROCES	TKTL_OBLAST
1.1.0.	biodegradácia odpadu	biologické procesy	úprava odpadu pred jeho využitím alebo zneškodnením
1.2.0.	dekontaminácia odpadu		
1.3.0.	kompostovanie odpadu		
2.1.0.	bitumenizácia odpadu	fyzikálno- chemické procesy	
2.2.0.	fyzikálno-chemické metódy		
2.3.0.	rafinácia odpadu		
2.4.0.	regenerácia odpadu		
2.5.0.	solidifikácia odpadu		
2.6.0.	vitrifikácia odpadu		
3.1.0.	demontáž odpadu	mechanické úpravy	
3.1.1.	demontáž starého vozidla		
3.1.2.	demontáž elektroodpadu		
3.2.0.	drvenie odpadu		
3.2.1.	drvenie starého vozidla		
3.2.2.	drvenie elektroodpadu		
3.3.0.	paketovanie odpadu		
3.4.0.	triedenie odpadu		
4.1.0.	ako palivo alebo na výrobu energie	energetické zhodnocovanie	zhodnocovanie odpadu
5.1.0.	biologické procesy	materiálové zhodnocovanie	
5.2.0.	recyklácia odpadu		
5.3.0.	regenerácia kyselín a zásad		
5.4.0.	spätné získavanie komponentov používaných pri odstraňovaní znečistenia		
5.5.0.	prečisťovanie oleja alebo jeho iné opätovné použitie		
5.6.0.	využitie odpadu na rekultiváciu		
5.7.0.	využitie odpadu na terénne úpravy		
6.1.0.	biologické procesy	biologické procesy	zneškodňovanie odpadu
7.1.0.	fyzikálno-chemické procesy	fyzikálno- chemické procesy	

TKTL_KO D	TKTL_NAZOV	TKTL_PROCES	TKTL_OBLAST
8.1.0.	inertný odpad	skládkovanie	
8.2.0.	nebezpečný odpad		
8.3.0.	ostatný odpad		
9.1.0.	nebezpečný odpad	spaľovanie	
9.2.0.	ostatný odpad		
10.1.0.	hlbinná injektáž	špecifické ukladanie odpadu	
10.2.0.	ukladanie do povrchových nádrží		
10.3.0.	ukladanie do špeciálne technicky upravených skládok		
10.4.0.	vypúšťanie do vodných telies		
10.5.0.	trvalé uloženie		
11.1.0.		odpad	zber odpadu
11.2.0.		staré vozidlá	
11.3.0.		elektroodpad	
11.4.0.		oleje	
11.5.0.		používané batérie a akumulátory	
12.1.0.	príprava na opätovné použitie	používané batérie a akumulátory	príprava na opätovné použitie
12.2.0.	príprava na opätovné použitie	elektroodpad	

Podpora obehového hospodárstva a rozvoja trhov s druhotnými surovinami sa premietla aj do vnútornej štruktúry individuálneho registračného záznamu zariadenia na spracovanie odpadu. Poskytuje informácie o výstupoch z procesov zhodnocovania v podobe certifikovaných produktov alebo vedľajších produktov a druhotných surovín, ktoré plnia kritériá definované pre stav konca odpadu. Zaradenie týchto informácií do záznamu zariadenia umožnilo vytvorenie novej schémy SNAS pre akreditáciu orgánov certifikujúcich systémy manažérstva stavu konca odpadov podľa ISO 9001 [15], nariadenia Rady (EÚ) č. 333/2011, nariadenia Komisie (EÚ) č. 1179/2012 a nariadenia Komisie (EÚ) č. 715/2013. Výber informácií súvisiacich s obehovým hospodárstvom z registračného záznamu zariadenia je uvedený v tab. 2.6.

Tab. 2.6 Výber informácií zo záznamu zariadenia na spracovanie odpadu

Katalógové číslo odpadu
Kategória odpadu
Kód spôsobu nakladania s odpadom
Certifikované systémy (ISO 9000, 14 000, EMAS, stav konca odpadu QMS EoW)
Technológia spĺňa BAT
Kritické suroviny
Certifikovaný výrobok
Certifikát výrobku
Výstupné parametre produktu
Možnosti využitia produktu (výrobku)

Funkčnosť platformy „SmartOdpady“ bola v roku 2022 úspešne otestovaná. V rámci testovacej prevádzky platformy, riešitelia databázu naplnili informáciami z verejne dostupnej časti informačného systému MŽP SR „ISOH“, ktoré sa týkali držiteľov autorizácií podľa § 89 „Autorizované činnosti a udelenie autorizácie“ v rozsahu druh a časová platnosť udelennej autorizácie, názov a adresa držiteľa.

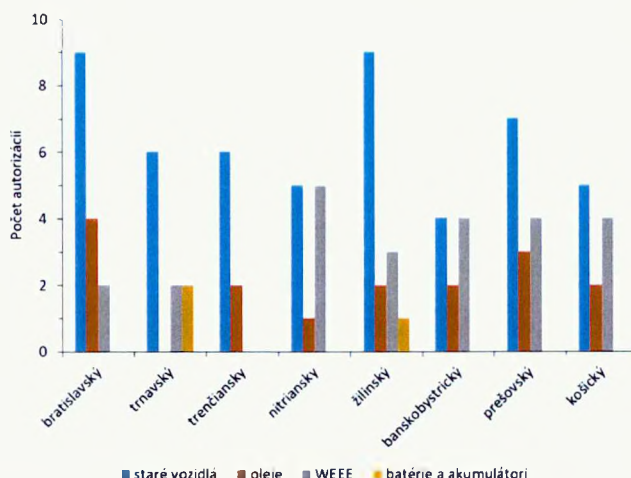
Pre splnenie účelu a cieľov platformy a najmä požiadaviek autorizovaných spracovateľov starých vozidiel bolo potrebné databázu ďalej doplniť najmä o prevádzkovateľov zariadení na spracovanie odpadov so súhlasmi udelenými podľa § 97 s niektorou z činností R1 až R11, čo bola jedna zo zásadných požiadaviek autorizovaných spracovateľov, pre ktorých sú zariadenia so súhlasmi na činnosti zhodnocovania R1 až R11 koncovými recyklačnými zariadeniami. Keďže elektronický register súhlasov podľa zákona č. 79/2015 Z. z. o odpadoch v súčasnosti nie je verejne dostupný, autori hľadali spôsob ako získať kontaktné údaje a osloviť recyklačné zariadenia, aby získali legálny súhlas s východiskovou registráciou zariadenia do platformy vzhľadom na platnosť opatrení podľa GDPR. Súhrnný prehľad zariadení na spracovanie odpadov vrátane zariadení na zber poskytli Programy odpadového hospodárstva na roky 2016 – 2020 vypracované za jednotlivé vyššie územné celky SR, ktoré vo svojich prílohách obsahovali potrebné, aj keď iba čiastočné údaje v rozsahu - kód zhodnocovania alebo zneškodňovania, kódy odpadu resp. základný druh odpadu, kategória odpadu, kapacita zariadenia, rok začatia prevádzky, adresa prevádzkovateľa a IČO [16 - 23].

Z predmetných príloh boli pri spracovaní vylúčené zariadenia, ktorých činnosť bola primárne zameraná na spracovanie biologicky rozložiteľných odpadov resp. dotriedňovanie komunálnych odpadov napr. zberné dvory. Údaje o počtoch zariadení v roku 2015, ktoré autori v zmysle zamerania projektu UNIVNET považovali za relevantné sú spracované v tabuľkách 2.7 až 2.9. Z tabuľky 2.7 a obr. 2.7 vyplýva, že autorizované zariadenia na spracovanie starých vozidiel relatívne rovnomerne pokrývajú celé územie SR, čo vytvára podmienky pre vyhovujúcu dostupnosť odovzdať staré vozidlo na legálne spracovanie, t.j. demontáž starého vozidla vo vzdialenosti do 50 kilometrov.

Tab. 2.7 Prehľad počtu udelených autorizácií podľa zákona č. 79/2015 Z. z. o odpadoch

Kraj		staré vozidlá	odpadové oleje	elektroodpad	batérie a akumulátory
bratislavský	bratislavský	9	4	2	
západné Slovensko	trnavský	6		2	2
	trenčiansky	6	2		
	nitriansky	5	1	5	
stredné Slovensko	žilinský	9	2	3	1
	banskobystrický	4	2	4	
východné Slovensko	prešovský	7	3	4	
	košický	5	2	4	
		51	16	24	3

Odpady vznikajúce z demontáže starého vozidla musí autorizovaný spracovateľ postúpiť do koncového zariadenia na zhodnotenie odpadov niektorou z činností R1 (energetické zhodnotenie) alebo R2 – R11 (recyklácia) alebo na zneškodnenie. Práve v tejto fáze rozhodovania by mu mala platforma „SmartOdpady“ operatívne poskytnúť informácie o dostupných zariadeniach, ich kapacitách a pod. Táto funkcionálna je určená aj pre subjekty z iných priemyselných odvetví, ktoré hľadajú koncové zariadenia pre svoje odpady a v súlade so svojimi environmentálnymi politikami sa zaujímajú aj o úroveň technológie spracovania odpadov alebo hľadajú partnera pre uzavretie obehových slučiek svojich produktov alebo materiálov.

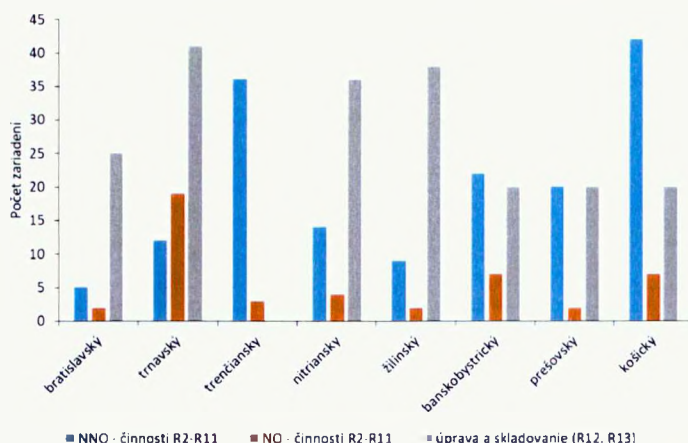


Obr. 2.7 Rozloženie autorizovaných zariadení na území SR v roku 2022 [vlastné spracovanie]

Tabuľky 2.8 a 2.9 poskytujú orientačný prehľad počtu približne 400 zariadení resp. ich kapacít pre materiálové zhodnocovanie nie nebezpečných (NNO) a nebezpečných (NO) odpadov činnosťami R2 až R11 v členení podľa vyšších územných celkov (obr. 2.8 a 2.9), ktoré autori zapracovali do príslušných registrov informačného subsystému platformy podľa obr. 2.6. Samostatne sú uvádzané zariadenia, ktoré sú schopné vykonávať len úpravu a skladovanie odpadov ako medzistupeň pred vlastnou recykláciou.

Tab. 2.8 Prehľad počtu vybraných zariadení na zhodnocovanie odpadu v SR v roku 2015

Kraj		recyklácia NNO (R2 - R11) (počet)	recyklácia NO (R2 - R11) (počet)	úprava a skladovanie (R12, R13) (počet)	zhodnocovanie (počet)
bratislavský	bratislavský	5	2	25	32
západné Slovensko	trnavský	12	19	41	72
	trenčiansky	36	3	n/a	39
	nitriansky	14	4	36	54
stredné Slovensko	žilinský	9	2	38	49
	banskobystrický	22	7	20	49
východné Slovensko	prešovský	20	2	20	42
	košický	42	7	20	69
		160	46	200	406



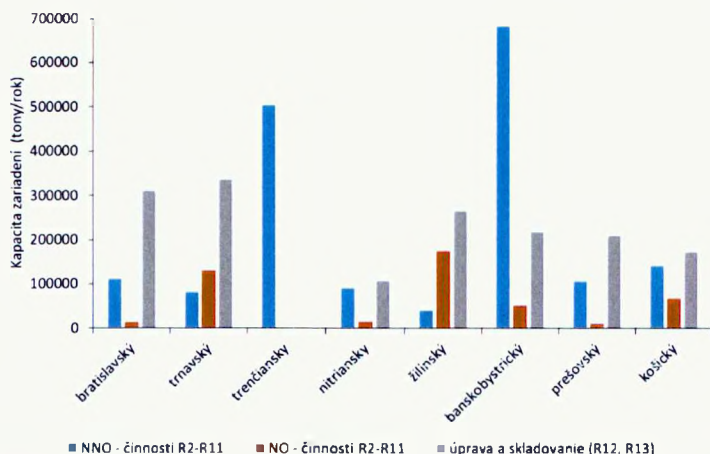
Obr. 2.8 Rozloženie zariadení na zhodnocovanie odpadov na území SR v roku 2015 [vlastné spracovanie]

Z hľadiska všeobecného druhu zhodnocovaného odpadu – plasty, kovy, papier sú v činnostiach zhodnocovania R2 – R11 približne rovnako zastúpené všetky druhy. Pre objektívne posúdenie dostatku kapacít a vyspelosti recyklačných technológií pre rozvoj trhu s druhotnými surovinami resp. získavanie kritických surovín v súčasnosti chýbajú informácie o konkrétnych technológiách a druhoch odpadov vstupujúcich do procesov recyklácie. Tento deficit by mohla eliminovať práve platforma „SmartOdpady“.

Tabuľka 2.9 a obr. 2.9 dokumentujú sumárny prehľad povolených kapacít zariadení na zhodnocovanie odpadov uvedených v tabuľke 2.3. Je zjavné, že napriek relatívne priaznivému rozloženiu zariadení na zhodnocovanie odpadov na území SR z hľadiska početnosti, rozmiestnenie kapacít už také priaznivé nie je a poukazuje skôr na rozširovanie kapacít zariadení na úpravu odpadov ako na systematickú podporu budovania nových recyklačných kapacít.

Tab. 2.9 Prehľad kapacít vybraných zariadení na zhodnocovanie odpadu v SR v roku 2015

Kraj		recyklácia NNO (R2 - R11) (t/rok)	recyklácia NO (R2 - R11) (t/rok)	úprava a skladovanie (R12, R13) (t/rok)	zhodnocovanie (t/rok)
bratislavský	bratislavský	110 000	14 000	310 000	434 000
západné Slovensko	trnavský	80 000	130 000	336 000	546 000
	trenčiansky	503 000	600	n/a	503 600
	nitriansky	89 000	16 000	107 000	212 000
stredné Slovensko	žilinský	39 000	175 000	265 000	479 000
	banskobystrický	681 300	52 000	218 000	1 151 300
východné Slovensko	prešovský	105 000	10 500	210 000	325 500
	košický	140 500	68 000	173 000	381 500
		1 746 739	465 900	1 619 000	



Obr. 2.9 Rozloženie kapacít na zhodnocovanie odpadov na území SR v roku 2015 [vlastné spracovanie]

Opodstatnenosť prevádzkovania takého nástroja akým je platforma „SmartOdpady“, ktorý integruje informačnú aj inovačnú sféru, potvrdzujú aj ostatné Programy odpadového hospodárstva na roky 2021 – 2025. Program odpadového hospodárstva SR na roky 2021 – 2025 v oblasti plnenia cieľov zhodnocovania odpadov (bez komunálnych odpadov) konštatuje priebežné plnenie zásadných cieľov v sledovaných prúdoch odpadov, ale je to aj vrátane tzv. iného zhodnocovania a to na úrovni od 18 % pre sklo až po 43 % pre kovy. Podpora financovania nových kapacít a technológií na spracovanie odpadov s výstupom s vyššou pridanou hodnotou definovaná na úrovni SR sa na úroveň POH vyšších územných celkov premieta skôr v podobe budovania nových zberných dvorov a triedňovacích liniek alebo zariadení na úpravu odpadov ako do podpory inovatívnych technológií.

Filozofia a koncepcia platformy SmartOdpady sa stretla s priaznivým ohlasom aj v zahraničí pri rokovaní o spolupráci v rámci rokovaní o účasti v rôznych rozvojových projektoch Horizon2020 napr. oblasti cezhraničnej recyklácie fotovoltaiických panelov. To autorov motivovalo k tomu, aby začali uvažovať aj o príprave anglickej mutácie platformy.

Vzhľadom na aktuálny vývoj v politikách EÚ venovaných problematike obehovej ekonomiky, budovaniu trhov druhotných surovín a najmä akcelerácii vo vývoji stratégie získavania kritických surovín sa riešitelia rozhodli rozšíriť rozsah záznamu v registri o prevádzkovaných technológiách (tabuľka 2.6) o indikáciu ich vhodnosti pre získavanie kritických surovín napr. z WEEE, batérií a akumulátorov, a pod..

Aby aj informačná a inovačná platforma recyklačných technológií – SmartOdpady spĺňala kritérium obehovej ekonomiky, odporúčajú riešitelia doplniť jej portfólio funkcionalít o možnosť „e-shopu“ ako riešenia ponuky druhotných surovín alebo použitých dielov, ktoré budú výsledkom procesov zhodnocovania odpadov alebo prípravy na opätovné použitie v zmysle obehového hospodárstva a v súlade s legislatívou odpadového hospodárstva.

2.4 Záver

Vývoj v oblasti odpadového hospodárstva v ostatných niekoľkých rokoch ukázal, že základná koncepcia „Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií – SmartOdpady“ bola z dlhodobého hľadiska zvolená správne a jej štruktúra zodpovedá požiadavkám kladeným na moderné systémy podporujúce ekonomickú prosperitu a súčasne orientované na ochranu životného prostredia. Pri koncipovaní platformy „SmartOdpady“ sa autori zamerali na vybudovanie informačného zdroja, ktorý by poskytoval všetkým účastníkom reťazca v odpadovom hospodárstve bez ohľadu na sféru pôsobenia (priemyselná sféra, samospráva, štátna správa) relevantné informácie o inštalovaných a prevádzkovaných technológiách, ich kapacitách a lokalizácii, technických a kvalitatívnych charakteristikách. Zaradenie GPS informácií v rámci vyhľadávania malo prispieť k uplatňovaniu zásady blízkosti pri nakladaní s odpadmi a znižovaniu nákladov na ich prepravu. Vytvorenie platformy „SmartOdpady“ riešitelia vnímali ako príspevok ku skvalitneniu informácií potrebných pre strategické rozhodovanie v oblasti plánovania rozvoja spracovateľských kapacít v odpadovom hospodárstve SR.

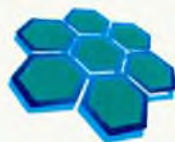
Podakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-19-559 a projektom združenia vysokých škôl UNIVNET, zmluva č. 0201/0082/19.

Literatúra

- [1] Obehové hospodárstvo budúcnosť rozvoja Slovenska - Circular economy future of the development of Slovakia. Bratislava: MŽP SR, 2019, 104 s.
- [2] Oznámenie Komisie Európskemu Parlamentu, Rade, Európskemu hospodárskemu a sociálnemu výboru a Výboru Regiónov COM(2020)98 – Nový akčný plán EÚ pre obehové hospodárstvo „Za čistejšiu a konkurencieschopnejšiu Európu“. Európska komisia, 2020, 20 s.
- [3] Príloha k Oznámeniu Komisie Európskemu Parlamentu, Rade, Európskemu hospodárskemu a sociálnemu výboru a Výboru Regiónov COM(2020)98 – Nový akčný plán EÚ pre obehové hospodárstvo „Za čistejšiu a konkurencieschopnejšiu Európu“. Európska komisia, 2020, 20 s. resource.html (europa.eu)
- [4] Gušťaříková, T., Lieskovská, Z. Slovenská republika smerom k zelenému hospodárstvu - Slovak Republic towards green economy. : Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenská agentúra životného prostredia, 2016, 114 s. ISBN: 978-80-89503-51-3
- [5] Program odpadového hospodárstva SR na roky 2021–2025. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/cia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-slovenskej-republiky-na-roky-2021-2025>)
- [6] Lieskovská, Z., Lényiová, P. Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2021. Bratislava: MŽP, 2023, 211 s. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/uploads/report/11401.pdf>)
- [7] Eurostat: Number and capacity of recovery and disposal facilities. (dostupné: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasfac/default/table?lang=en)
- [8] Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D. *et al.* Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023. doi:10.2760/386650.
- [9] Løvik, A. N., Marmy, Ch., Ljunggren, M., *et al.* Material composition trends in vehicles: critical raw materials and other relevant metals. Preparing a dataset on secondary raw materials for the Raw Materials Information System. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021. ISBN 978-92-76-45213-3, doi:10.2760/351825.
- [10] Birloaga, I., Vegliò, F. An innovative hybrid hydrometallurgical approach for precious metals recovery from secondary resources. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114567.
- [11] Castell-Rudenhausen, M., Wahlström, M., Nelen, D., Dams, Z. Investigating Europe's secondary raw material markets. EEA Report, No. 12/2022. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. 978-92-9480520-1, doi: 10.2800/48962.
- [12] Huisman, J., Leroy, P., Tertre, F. *et al.* Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report, 2017, Brussels, Belgium ISBN: 978-92-808-9061-7, doi:10.13140/RG.2.2.10451.89125
- [13] Gaudillat, P. F.; Antonopoulos I. S.; Dri, M.; Traverso, M.; Canfora, P., Best Environmental Management Practice for the Car Manufacturing Sector, JRC Science for Policy Report EUR 28937 EN, 2017. ISBN 978-92-79-77070-8, doi:10.2760/202143.
- [14] Capgemini Research Institute: Sustainability in Automotive: From Ambition To Action. 2022. (dostupné: https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2022/10/CRI_Sustainability-in-Automotive_web_draft_12052023.pdf)

- [15] MSA-CS/01 - Oblast' a rozsah akreditácie orgánov certifikujúcich systémy manažérstva. Bratislava: SNAS. 2020, 17 s. (dostupné: [http:// www.snas.sk](http://www.snas.sk))
- [16] Program odpadového hospodárstva Žilinského kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.minzp.sk/odpady/poh/poh-sr-2016-2020/>)
- [17] Program odpadového hospodárstva Trnavského kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.minzp.sk/odpady/poh/poh-sr-2016-2020/>)
- [18] Program odpadového hospodárstva Banskobystrického kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-banskobystrickeho-kraja-na-roky-2016-2>)
- [19] Program odpadového hospodárstva Bratislavského kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-bratislavskeho-kraja-na-roky-2016-2020>)
- [20] Program odpadového hospodárstva Košického kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-kosickeho-kraja-na-roky-2016-2020>)
- [21] Program odpadového hospodárstva Nitrianskeho kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-nitrianskeho-kraja-na-roky-2016-2020>).
- [22] Program odpadového hospodárstva Prešovského kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-presovskeho-kraja-na-roky-2016-2020>)
- [23] Program odpadového hospodárstva Trenčianskeho kraja na roky 2016 – 2020. (dostupné: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/program-odpadoveho-hospodarstva-trencianskeho-kraja-na-roky-2016-2020>)



Recyklácia vrstveného skla

Finalizácia výroby modulov a príprava na ich testovanie



**Ústav výrobných systémov,
environmentálnej techniky
a manažmentu kvality**

Riešiteľský kolektív

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Strojnícka fakulta STU

Hlavný riešiteľ:

prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.

Riešitelia:

prof. Ing. Marcela Pokusová, CSc.

Ing. Viliam Čačko, PhD.

Ing. Ondrej Chlebo, PhD.

Ing. Róbert Szabó, PhD.

Ing. Jozef Babics

3 Recyklácia vrstveného skla. Finalizácia výroby modulov a príprava na ich testovanie.

3.1 Úvod

Sklo bolo objavené v Egypte okolo 3000 rokov pred Kristom. Objavená technológia spočiatku neumožňovala výrobu čistého skla. Vyrobené sklo sa používalo hlavne na výrobu malých nádob a ozdôb. Nádobky sa spracovávali omotávaním okolo hlineného jadra, ktoré sa po vychladení skleneného výrobku sa hlinené jadro rozbilo. Sklo vtedy obsahovalo oxid kremičitý, vápnik a sodík. Sklo sa v minulosti používalo len na výrobu úžitkových a dekoratívnych predmetov.

V dnešnom svete si život bez skla nedokážeme predstaviť. Človek potrebuje nápojové sklo, zrkadlá, žiarovkové banky, okuliare, šošovky do fotoaparátov. Sklo vpúšťa do bytu svetlo, moderné dopravné prostriedky potrebujú bezpečnostné sklá, vedec zasa laboratórne náradia.

Súčasnú sklo je homogénna amorfná, izotropná, priehľadná, pevná a krehká látka v metastabilnom stave, vznikajúca ochladzovaním taveniny. Obsahuje najčastejšie kremičitý piesok, sódu, oxidy alkalických kovov, vápenec. Je to biologicky neaktívny materiál. Čisté sklo je transparentné (priehľadné), relatívne pevný materiál, odolný proti opotrebeniu, v podstate inertný a biologicky neaktívny. Môže byť formovaný do rozmanitých tvarov. Sklo je však veľmi krehké a rozbíja sa na ostré črepy. Tieto vlastnosti môžu byť modifikované pridaním zlúčenín (najčastejšie oxidy kovov) do taveniny. Sklo sa dá aj tepelne spracovávať napr. kalíť.

Lepené sklo je vynikajúcim pomocníkom modernej doby. Bezpečnostné lepené sklá slúžia na ochranu osôb a majetku, pred násilným vniknutím alebo hodenými predmetmi. Lepené sklo môžeme nájsť v autách alebo rôznych moderných presklených budovách. Vďaka jeho pevnosti a schopnosti nerozbiť sa na črepy si našlo využitie v rôznych oblastiach priemyslu a hlavne v modernej architektúre. Jeho recyklácia je dôležitá pretože spracovaním odpadového skla šetríme energiu, vodu, životné prostredie a prírodné materiály. Recyklácia lepeného skla je však náročnejšia práve kvôli fólii, moderné technológie nám však umožňujú aj túto špeciálnu recykláciu.

Cieľom predkladanej správy je prezentácia priebehu vyhodnotenia laboratórnych skúšok dekompozície lepeného skla, návrh novej filozofie mechanickej technológie dekompozície, ako aj prezentácia stavu rozpracovania konštrukcie, výroby a návrhu skúšok linky s novou technológiou.

3.2 Lepené sklo

3.2.1 Výroba skla

Pri výrobe skla sa používa čistý kremičitý piesok, oxid vápenatý, uhličitan sodný (draselný), oxid hlinitý a črepy skla (separovaný odpad). Z týchto surovín sa pripraví prášková zmes nazývaná sklársky kmeň, ktorý sa taví v sklárskej peci. Sklo sa taví pri teplote 1450 až 1550 °C, bórato kremičité sklo pri teplote 1630 °C a kremenné sklo okolo 2000 °C, Obr. 1. Taviaci proces je energeticky náročný, najviac energie je potrebnej na tavenie, ale energia je potrebná napríklad aj na chladenie. Sklo vytvarované pri vysokých teplotách nemôžeme prudko ochladiť, pretože by sme mechanicky znehodnotili výrobok. Preto sa výrobky postupne ochladzujú v chladiacich peciach. Do skla sa môžu pridať rôzne prísady, ktoré sklo čistia, zafarbia alebo znepriehľadňujú. Na sfarbenie skla sa používajú chemické ako napríklad sulfid seleničitý – SeS₂ (červené sfarbenie), oxid meďnatý – CuO (modré sfarbenie) alebo fosforečnany a hlinitany (mliečne sfarbenie).

Úžitkové sklo spĺňa predovšetkým požiadavky účelnosti, ale vyhovuje aj estetickým požiadavkám. Úžitkové sklo môžeme rozdeliť do piatich skupín, a to: stolné sklo, varné sklo, obalové sklo, osvetľovacie sklo a zrkadlá.

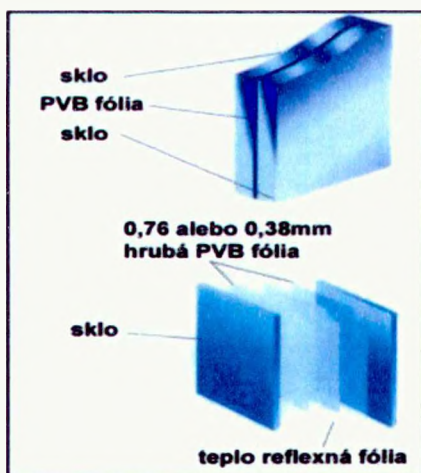
V súčasnosti sa pre svoje výborné vlastnosti uplatňuje sklo aj v stavebníctve, v automobilovom, v chemickom, v elektrotechnickom alebo v textilnom priemysle. Vyrábajú sa z neho celé lepené tabule, aparatúry, potrubia, tehly i tkaniny.



Obr. 3.1 Tavenie skla

3.2.2 Lepené sklo

Toto špeciálne sklo sa skladá z dvoch kusov skla, medzi ktoré je vlepovaná fólia. Pri procese výroby sa aj fólia aj sklo starostlivo a ekologicky umyjú v čistej miestnosti bez prachu. Po tomto procese sa sklo zostaví a pri zvýšenej teplote a tlaku prilepi k sebe. Fólia medzi sklami je z polyvinyl butyralu tzv. **PVB fólia** alebo z etylenvinyl acetátu tzv. EVA fólia. Tieto materiály sa vyznačujú vysokou pevnosťou, elasticitou a adhéziou. Fólia môže byť číra, farebná alebo mliečna.



Obr. 3.2 Zloženie lepeného skla

3.2.3 Lepené sklo v autách

Čelné sklo auta sa skladá z dvoch častí ohýbaného tabuľového skla medzi ktorými je vlepenej fólia kvôli zvýšenej bezpečnosti skla. Okrem nasadzovania PVB fólie sa môže v čelnom skle vozidla nachádzať aj polymetylmetakrylát PMMA, ktorý sa uprednostňuje hlavne pre jeho ľahkosť a vynikajúce optické vlastnosti. Oproti PVB sa však vyznačuje väčšou krehkosťou a preto sa v sériovej výrobe neuplatňuje. PMMA sa však nachádza v závodných športových autách, kde je dôležitá práve nízka hmotnosť. Medzi hlavné výhody lepeného skla patrí: dostatočný výhľad pri prasknutí skla, pohlcovanie energie rozťahnutím fólie, malá možnosť poranenia, absorpcia tepla a ochrana proti slnečnému žiareniu farebnou fóliou. Hlavné nevýhody lepeného skla sú: nákladná výroba, možnosť zarosenia okrajov a obmedzenia výhľadu. Najväčší producenti PVB fólií (Monsanto, Du Pont, Huels Troisdorf, Hoechst AG, Sekisui), uprednostňujú spaľovanie recyklovaného PVB z dôvodu zníženia jeho mechanických vlastností. Napriek tomu sa našli výrobcovia (Česká republika), ktorí používajú recyklovaný PVB aj na úkor zníženia kvality. Je ho možné použiť v zadnom alebo strešnom skle, prípadne na palubných doskách prípadne pod kobercom. Pri nehode a rozbití čelného skla, na rozdiel od klasického skla, zostávajú črepiny na fólii, čím sa predíde rezným alebo bodným poraneniam posádky auta. Do roku 2012 na Slovensku neumožňovali spôsoby likvidácie auto skla práve oddelenie PVB fólie od skla. Kvôli absencii takejto spracovateľskej linky do roku 2012 prakticky neexistovala recyklácia čelného skla áut. Ročne sa na Slovensku recykluje sklo z približne 50 000 automobilov, pričom v jednom automobile sa nachádza približne 33 kg skla, čo predstavuje približne 3 % hmotnosti automobilu, čo predstavuje cca 1650 ton autoskiel od spracovateľov starých vozidiel. K tomu je nutné pripočítať poškodené sklá zo servisov. Celkove na Slovensku vzniká z výroby, zo servisov a zo spracovania starých vozidiel približne 2450 ton odpadu z čelných skiel automobilov.



Obr. 3.3 Čelné sklo automobilu

3.3 Lepené sklo v stavebníctve

Moderné stavebníctvo sa nezaobíde bez skla ako stavebného materiálu. Špeciálne navrhnuté priestrané budovy s prirodzeným svetlom si vyžadujú funkčný sklenený materiál. V stavebníctve sa používa tepelne tvrdené sklo alebo tepelne tvrdené sklá s fóliou PVB, EVA alebo živinicou hrúbky 0,4 alebo 0,8 mm prípadne ich násobkom. Lepené bezpečnostné sklo je možné použiť aj v najnáročnejších architektonických návrhoch pri použití v horizontálnej,

vertikálnej alebo šikmej polohe na zasklievanie otvorov v stavebných konštrukciách, ochranných zábradliach, markízach a pod. Pri rozbití takéhoto skla, podobne ako pri čelnom skle auta, úlomky zostávajú prilepené na fólii, čím sa znižuje alebo úplne vylučuje poranenie osôb a tak isto sa zabráňuje vandalizmu a násilným vniknutiam. Lepené bezpečnostné sklo je vhodné aj ako zvuková izolácia, je použiteľné pri teplotách -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$ a môže sa vyrábať v širokej palete farieb kvôli estetickým efektom, ale aj veľmi účinnou ochranou proti slnečnému UV žiareniu.

Označovanie skiel má vlastný systém. Prvé dve číslice udávajú hrúbku skla v mm a tretia počet spojovacích fólií: 3.3.1., 3.3.2., 4.4.1., 4.4.2., 5.5.1., 5.5.2., 6.6.1., 6.6.2.



Obr. 3.4 Pohľad na stavbu so skleneným opláštením

3.3.1 Recyklácia lepeného skla

Recyklácia skla je technologický proces, ktorým sa už použité sklo vracia späť do výroby. Sklo je surovina, ktorá je mnohonásobne spätne použiteľná a dobre recyklovateľná. Pri recyklácii špeciálnych skiel treba akoby spätne odobrať vlastnosti a látky, ktoré boli pridávané za účelom jeho špeciálnej aplikácie. V prípade lepeného skla je to hlavne fólia, ktorú treba odstrániť. Z technickej stránky sa odpadové sklo naloží do spracovateľskej linky cez nasýpaciu časť nakladačom. Následne je sklo drvené na menšie kusy v priemyselnom drviči. Podrvené sklo sa pomocou pásového dopravníka, vybaveného magnetickým separátorom na odstránenie kovových odpadov, dostáva k zariadeniam pre postupnú úpravu a zbavovanie nežiaducich látok. Mechanicky a fyzikálne sa z črepov odstraňujú nežiaduce prvky. Týmto spôsobom sa oddeli aj fólia a takto pretriedené črepy postupujú do vibračného triediča, v ktorom sa črepy rozdelia podľa veľkosti na dve frakcie. Jemná frakcia postupuje k optickým snímačom, ktoré črepy rozdelia podľa farby. Hrubá frakcia sa vracia späť do procesu drvenia a následne opäť do vibračného triediča. Do procesu patrí aj odsávacie zariadenie, ktoré odsáva na viacerých miestach linky papier, prach, korok, plasty, fóliu a podobné ľahké materiály. Z takto rozdrveného a pretriedeného skla vzniká penové sklo, ktoré sa používa ako vstupná surovina v sklárskom priemysle a nahrádza sklársky piesok. Recyklácia skla redukuje spotrebu prírodných materiálov, zabráňuje mrhaniu zdrojov a redukuje uskladnené odpady.

Miera zhodnotenia vrstveného skleného odpadu tradičnými technológiami sa pohybuje na úrovni 50 až 60 %. Dosiahnutie vyššieho množstva zberu špeciálneho skla zo starých vozidiel a technických skiel z budov je problematické, pretože pre mnohých najmä malých spracovateľov s autorizáciou na spracovanie starých vozidiel je triedený zber relatívne malého množstva odpadového skla ekonomicky nevýhodný a preto tento odpad často končí na skládkach. Na dokonalú separáciu a získanie čistých fáz laminátu sa podľa literárnych prameňov javí ako

jediný použiteľný mokrý spôsob separácie vrstvy skla od PVB fólie. V každom prípade je zhodnotenie skleneného odpadu podmienené ekonomickou efektívnosťou celého procesu.

Auto Glass Recycling, s.r.o., Trnava je prvá firma na Slovensku, ktorá umožňuje recykláciu odpadov zo skla, ktoré sa nedajú bežne recyklovať, čo sú predovšetkým odpadové lepené autosklá, tvrdené sklá, bezpečnostné sklá, sklá z elektroodpadov a iné. Linka na spracovanie tohto druhu odpadov bola otvorená v Šelpiciach 3. apríla 2012 a približná kapacita zariadenia je 20 000 ton skla ročne z čoho je približne 2000-2500 ton autosklo a zvyšok kapacity je voľný pre iný druh skla. Vybudovanie tohto závodu si vyžiadalo celkové investície približne 3,5 mil. EUR, z toho recyklačný fond prispel dotáciou vo výške 1,04 mil. EUR.



Obr. 3.5 Auto Glass Recycling, s.r.o., Trnava

Pri recyklácii vrstvených skiel sa uplatňujú štyri spôsoby, a to **mechanické**, **termodynamické**, **chemické** a ich vzájomná **kombinácia**. V linkách na recykláciu laminovaných skiel prevažuje aplikácia buď samotného mechanického alebo kombinovaného oddelovania v závislosti od požadovaného výsledného produktu a jeho kvality. Z hľadiska pracovných médií prítomných v separačnom procese je možné spôsoby a z nich vyplývajúce technológie zoskupiť do dvoch kategórií, tzv. suché (mechanické alebo termodynamické oddelovanie) a mokré spôsoby (napr. chemická separácia).

Pri aplikácii postupu iba **mechanického oddelovania** je vrstvené sklo podrvené na vstupnej linke vybavenej drvičom schopným rozdrviť sklo pochádzajúce nielen z osobných a nákladných automobilov, z autobusov a zo stavebníctva. Drvina potom ďalej prechádza sústavou dopravníkov a separátorov, kde sa vytriedia kovy a ostatné nečistoty. Drobné časti skla sú transportované cez zónu optických senzorov, kde sa z prechádzajúcej drviny skla oddelia nečistoty, časti autofólie, tesniacej gumy, atď.

Termodynamickým oddelovaním sú pomocou tepelných procesov zmesi spracované tak, aby sa získali suroviny v požadovanej čistote a mohli byť zrecyklované. Tepelné oddelovacie procesy sú operácie s prenosom hmoty, kedy môžu byť oddelené homogénne (jedna fáza) alebo heterogénne (dvoj alebo viacfázové) zmesi. Nevyhnutné hybné sily procesu, koncentračné a teplotné gradienty vznikajú ako dôsledok vstupu pomocnej fázy. Tepelné oddelovanie zmesi prebieha v troch fázach. V prvej fáze sa do systému dodáva energia alebo pridá pomocná látka. Pridaním alebo odobraním energie dochádza k výmene hmoty a tepla medzi jednotlivými fázami zmesi. Proces prebieha až dovtedy, kým sa neoddedia jednotlivé fázy zmesi. Tepelná separácia umožňuje síce získať na výstupe vhodnú surovinu v podobe čistého skla a fólie, avšak za cenu vysokej energetickej náročnosti a nepriaznivej environmentálnej charakteristiky.

Známe **chemické oddel'ovanie** možno klasifikovať ako mokrý spôsob separácie skla a PVB fólie. Proces je založený na využití rozdielov v chemických alebo fyzikálnych vlastnostiach oddel'ovaných materiálov, akými sú veľkosť, tvar, hmotnosť, hustota, ktoré sa používajú na dosiahnutie oddel'ovania. Existuje množstvo charakteristík, podľa ktorých sa oddel'ovanie uskutočňuje napr. rozpustnosť, prchavosť, absorpciu, elektrické a magnetické účinky, atď. Procesy spadajúce tejto kategórie dokážu zaistiť získanie čistého skla alebo fólie v závislosti od aplikovaných reakčných činidiel, ktoré však na druhej strane môžu mať aj negatívny vplyv na životné prostredie. Je omnoho priateľnejší ako mechanické (suché) spôsoby oddel'ovania, pretože napríklad vodné roztoky sú schopné zaistiť výrazne efektívnejšie odplavenie sklenených častíc a so zvyšujúcou sa teplotou vykazuje retardačný efekt na silu vodíkovej väzby, ktorá je zodpovedná za intenzitu adhézneho spoja medzi -OH skupinami na reťazci polyméru a polárnym sklom. Je však potrebné vziať do úvahy tiež fakt, že vyšší obsah vody spôsobuje relatívne veľkú zmenu mechanických, fyzikálnych a chemických vlastností PVB fólie.

Postupy recyklácie vrstveného skla založené na **kombinovanom oddel'ovaní** využívajú viacero spôsobov oddel'ovania v jednom slede, napr. mechanické s chemickým alebo mechanické s termickým, s cieľom zefektívniť separačný proces, dosiahnuť vyššiu kvalitu výsledného produktu alebo eliminovať niektoré nevýhody jednotlivých spôsobov oddel'ovania.

Známe technológie recyklácie nedostatky zo stavu techniky tak, aby z hľadiska recyklovateľnosti týchto materiálov boli splnené základné ohraničujúce podmienky:

- pri recyklácii vrstiev skla sa vyžaduje minimalizácia podielu prachovej frakcie skla po delaminačnom procese,
- možnosť použitia recyklátu PVB fólie je podmienená obsahom zostatkových nalepených častíc skla na fólii, a to do 100 ppm.

Uvedené nedostatky odstraňuje nami navrhnutý spôsob vysoko účinnej dekompozície vrstvených odpadových skiel a stavebnicová linka podľa predloženého vynálezu. Podstata spôsobu vysoko účinnej dekompozície vrstvených odpadových skiel je založená na tom, že pláty odpadového lepeného skla nie sú drvené na malé kusy, ale v celistvosti sú v lámacom module lámané v priečnom aj pozdĺžnom smere medzi dvoma párami lámacích profilových valcov, následne sú takto polámané celistvé sklá v ďalšom module otrepávané medzi vibračným nástrojom s ihlanovými hrotmi v tvare lišty a hladkým odvalujúcim valcovým nástrojom a napokon sú v ďalšom module posledné prichytené úlomky skla k PVB fólii stierané stieracími valcami.

Podstata konštrukcie stavebnicovej linky na vysoko účinnú dekompozíciu vrstvených odpadových skiel spočíva v tom, že pozostáva z viacstupňovej zostavy variabilných modulov, kde na vstupe je zaradený aspoň jeden lámací modul s tvarovým profilovaním dvoch párov lámacích valcov, kde prvý pár lámacích valcov je vertikálne posunutý voči druhému páru lámacích valcov. Stredným modulom zostavy je aspoň jeden vibračný modul s vibračným zariadením s nástrojom s ihlanovými hrotmi v tvare lišty a odvalujúcim sa hladkým valcovým nástrojom. Koncovým modulom zostavy je stierací modul so stieracími valcami s rozdielnou frekvenciou otáčania.

Táto modulová technológia spracovania odpadového vrstveného skla podľa vynálezu môže byť podľa potreby doplnená o proces popraskania odpadového vrstveného skla v prijímacom module popraskania odpadového lepeného skla, ktorý je tvorený dvomi hladkými valcami, alebo podľa potreby môže byť v linke zaradených za sebou aj viac rovnakých modulov.

Táto technológia spracovania odpadového vrstveného skla podľa vynálezu môže byť taktiež doplnená o ofukovanie prachových častíc skla z PVB fólie prúdom vzduchu zo ústavy vzduchových dýz za stieraním posledných prichytených úlomkov skla z PVB fólie.

3.4 Funkčné vibračné skúšky

Výsledky jednotlivých druhov experimentálnych skúšok ukázali že pre ročnú kapacitu 2000-2500 ton spracovaných odpadov z lepených skiel je s ohľadom cenové náklady a komplikovanosť vhodná mechanická technológia spracovania. Absolútnou originalitou nami navrhutej technológie je že sklo nepodrvíme ale len polámeme tak aby ostalo v kuse. Následne polámané sklo oklepávané. Na základe výsledkov laboratórnych skúšok sme následne navrhli funkčný laboratórny modul „oklepávacieho – vibračného“ zariadenia. Experimentálne zariadenie využívajúce na drvenie vzorky vrstveného skla mechanické vibrácie je dokumentované na obr. 3.6 . – obr. 3.7. Funkčnú časť stroja tvoria dve platne. Jedna pevne spojená so základom, na druhej pružne spojenej je umiestnený vibračný elektromotor. Na stykových stranách obidvoch platní sú umiestnené tvarové profily z uholníkov alebo roxorov.



Obr. 3.6 Vibračný stend



Obr. 3.7 Vzorka I pred začatím testov

Vlastné merania sa uskutočnili na 3 neporušených testovacích vzorkách, ktoré mali rovnaké rozmery. Každá vzorka vrstveného autoskla bola drvená 3-krát z každej strany. Na vzorkách bola zisťovaná ich hmotnosť po jednotlivých drveniach a hmotnosť jednotlivých frakcií skla po meraní. Vzorka (ďalej len vzorka I) mala rozmery 400x295 mm a hmotnosť 1300 g pred testovaním. Namerané hmotnosti vzorky I po šiestich cykloch vibrácií, t.j. 3 cykly z každej strany vrstveného skla, sú uvedené na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Jednotlivé frakcie skla vzorky I po sitovej skúške

Rovnaký postup a podmienky priebehu experimentu boli aplikované aj pri ďalších dvoch vzorkách z vrstveného skla. Vo všetkých prípadoch výsledky meraní potvrdili najvyššiu hmotnosť frakcie II. s časticami skla s veľkosťou 2 – 4 mm. Podrobnosti o výsledkoch laboratórnych skúškach sú uvedené s správou UNIVNET za rok 2022,

Ďalší test experimentálnych laboratórnych skúšok bol zameraný na skúmanie možnosti odstraňovania zvyškových sklenených úlomkov z fólie PVB po vibráciách (obr. 3.9a). Pôsobením tepla a vodného roztoku CaCl_2 (700ml H_2O , 280g CaCl_2) zohriateho v zásobníku na teplotu 50 až 70°C. Fólia PVB bola ponorená do roztoku na dobu 5 minút a potom ručne premytá. Sklené prachové fragmenty sa z fólie vplyvom teplého roztoku a šmyku oddelili. Kvalita čistoty povrchu a súvislosti recyklovanej fólie PVB je dokumentovaná na obr. 3.9b. Priemerný úbytok hmotnosti skúmaných vzoriek po vypratí a vysušení bol 3,8 g a teda ich priemerná hmotnosť 97,2 g. Pri porovnaní hmotnosti čistej fólie a priemernej hmotnosti skúmaných vzoriek môžeme konštatovať, že bola dosiahnutá 97,5 % účinnosť vyčistenia.



a) po 6 cykloch vibrácií



b) po vypratí

Obr. 3.9 Jednotlivé frakcie skla vzorky 1 po sitovej skúške

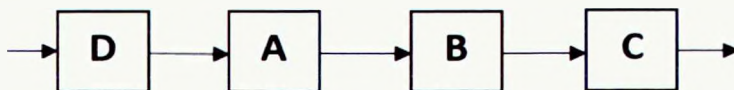
Na obr. 3.10 – 3.13 sú v blokovej schéme znázornené zariadenie na spracovania odpadového vrstveného skla.

V minimálnej konfigurácii (Obr. 3.9) linka pozostáva zostava z jedného lámacieho modulu (obr. 3.25), v ktorom je sklo lámané v priečnom aj pozdĺžnom smere medzi dvoma párami lámacích profilových valcov. Druhým modulom linky je vibračný modul (obr. 3.14), kde sú polámané ale celistvé sklá oklepávané medzi vibračným nástrojom s ihlanovými hrotmi. Koncovým modulom takejto minimálnej zostavy je stierací modul v ktorom, na základe rôznych frekvencií otáčania stieracích valcov, dochádza k mechanickému vyčisteniu PVB fólie. V niektorých prípadoch môže byť do systému zaradený aj modul prania (obr. 3.12).



A-lámací modul, B – vibračný modul, C - stierací modul

Obr. 3.10 Minimálna konfigurácia linky



D-vyrovňavací modul, A-lámací modul, B – vibračný modul, C – stierací modul

Obr. 3.11 Základná konfigurácia linky



D-vyrovnávací modul, A-lámací modul, B – vibračný modul, C - stierací modul, E –modul prania

Obr. 3.12 Maximálna konfigurácia linky

Pri hrubých a viacnásobne vrstvených sklách je možné niektoré moduly zaradiť aj viac krát, obr. 3.13. Za účelom zvýšenia výkonu spracovania a čistoty získanej fólie je konfigurácia linky doplnená aj prijímací stôl a prací modul, kde dochádza k vypratíu PVB fólie v teplom vodnom roztoku.



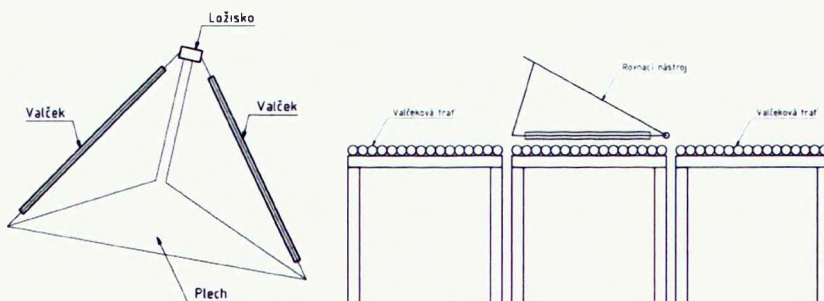
D-prijímací modul, A-lámací modul, B – vibračný modul, C - stierací modul, E-modul prania

Obr. 3.13 Príklad širokej konfigurácie linky s viacerými rovnakými modulmi

3.5 Návrh nástrojov jednotlivých modulov

3.5.1 Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre rovnací modul

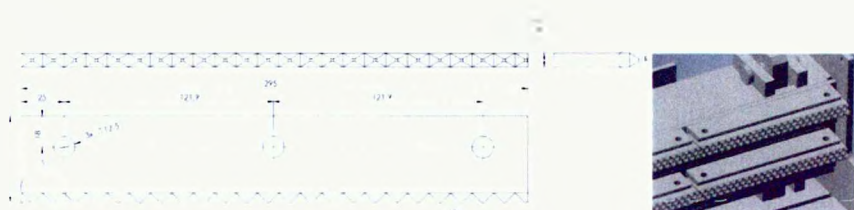
Rovnáci modul zabezpečuje vyrovnanie priestorovo deformovaných autoskiel pre ďalšie spracovanie. Ak si to technológia vyžaduje, tak je zaradený vždy ako prvý stupeň pred vstupom viacstupňovej zostavy variabilných modulov. Nástroj rovnacieho modulu je vlastne konštrukčne priestorovo usporiadaný systém rovnacích plechov a valčiekov. Cieľom tohto nástroja je vyrovnanie deformovaného odpadového skla. Toto odpadové sklo vstupuje do linky na valččkovej trati ale pred samotným spracovaním sa niekedy musí vyrovnať. Ináč by sme ho nevedeli vôbec spracovať. Nástroj – vyrovnávací ihlan je znázornený na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Rovnáci nástroj

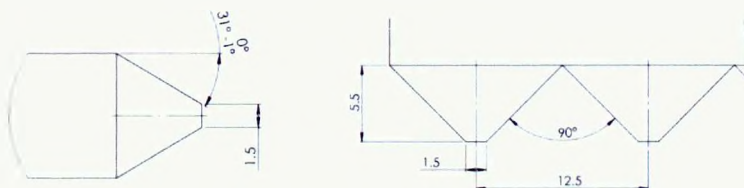
3.5.2 Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre vibračný modul

Nástroj na vibračný modul (obr. 3.15), bol navrhnutý zo zreteľom na celkový koncept vibračného modulu, v podstate je to výpalok z plechu. Na pracovnej strane nástroje sú vyrobené hroty znázornené na obrázku 3.15 , aby dochádzalo k čo najlepšiemu styku skla a nástroja, a zároveň bola dosiahnutá aj vysoká efektívnosť oklepávania skla.



Obr. 3.15 Nástroj vibračného modulu

Vibračné nástroje – platne sú navrhnuté aj s ohľadom na jednoduchú výmenu a údržbu nakoľko z podstaty vibračného modulu je možné predpokladať aj opotrebenie oklepávacích nástrojov. Celkovo je vo vibračnom module osadených 30 nástrojov v radení po 3 kusy v 10 jednotlivých blokoch.



Obr. 3.16 Hrot nástroja pre oklepávací modul

Na nástroj oklepávacieho modulu bol použitý materiál HARDOX 500 , ktorý sa vyznačuje vysokou pevnosťou a oteru vzdornosťou.

3.5.3 Technologický a konštrukčný návrh nástroja pre stierací modul

Nástroj pre stierací modul bol navrhnutý tak, aby zapadol do celkového kontextu linky na spracovanie odpadového skla. Pri návrhu samotného stieracieho nástroja bolo potrebné zohľadniť aspekty ako sú:

- Vyrábiteľnosť
- Ekonomickosť
- Jednoduchá údržba / výmena pri opotrebení
- Dostatočné stieranie skla z fólie

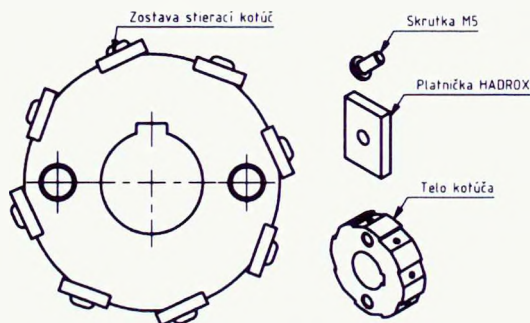
Z pohľadu **vyrábiteľnosti** nástroja pre stierací modul, bol samotný nástroj navrhnutý z troch základných komponentov, nosnú časť tvorí frézované telo stieracieho kotúča, na ktoré je upevnené pomocou skrutky vymeniteľné platničky. Telo kotúča je vyrobené z ocele S235 JRH a vymeniteľná platnička je vyrobená zo špeciálneho oteru vzdorného materiálu HARDOX 500. Tento materiál sa okrem dobrých oteru vzdorných vlastností vyznačuje aj vysokou pevnosťou, čo má z podstaty použitia kotúča tiež veľký význam. Prenos krútiaceho momentu s hnacieho hriadeľa na stierací kotúč je zabezpečená perom.

Samotná **ekonomickosť** výroby bola zohľadnená už v konštrukcii stieracieho nástroja. Telo kotúča je frézované a platnička je jednoduchý výpalok s HARDOXU, ktorý je priskrutkovaný

o telo stieracieho kotúča. Telo kotúča je vyrobené z cenovo dostupného materiálu čo má významný vplyv na výslednú cenu kompletného kotúča. Naproti tomu HARDROX použitý na výrobu samotných platničiek je síce drahý ale jeho potreba je menšia ako 10 % z celkovej hmotnosti kompletného kotúča, hmotnosť platničky je konkrétne 0,02 kg.

Dôležitý je aj **aspekt údržby**. Voľba takéhoto typu konštrukcie umožňuje jednoduchú výmenu platničky v prípade či už poškodenia alebo opotrebenia platničky. Pri poškodení jednej platničky nie je treba demontovať jednotlivé hriadele a následne všetky kotúče z hriadeľov ale poškodená platnička sa jednoducho odskrutkuje a vymení za novú.

Celá zmontovaná zostava stieracieho kotúča je na obrázku 3.17.

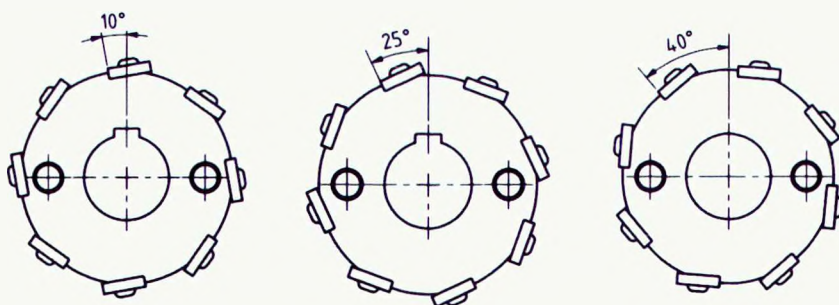


Obr. 3.17 zostava stieracieho kotúča

Z celkového kontextu stieracieho modulu bolo veľmi dôležité navrhnuť kotúče tak, aby bolo v maximálnej možnej miere dosiahnuť čo najväčšie stieranie (očistenie) skla zo stredovej fólie. V konečnom dôsledku bolo preto potrebné navrhnuť 3 typy stieracích kotúčov za účelom dosiahnutia špirálového efektu stierania.

Navrhnuté 3 druhy stieracích kotúčov:

- Stierací kotúč 10 ° na obrázku 18 a
- Stierací kotúč 25 ° na obrázku 18b
- Stierací kotúč 40 ° na obrázku 18c



Obr. 3.18 Stieracie kotúče a, b, c

3.6 Popis modulov

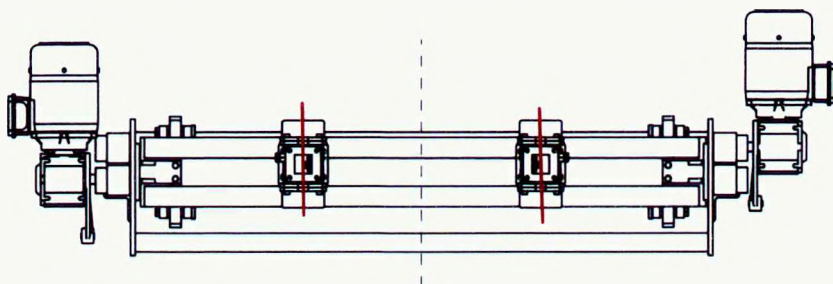
3.6.1 Vibračný modul a možnosti radenia elektrických vibrátorov

Vibračný modul technologicky nadväzuje na predupravené polámané sklo z predchádzajúceho lámacieho modulu. Princíp jeho práce spočíva vo vibračnom obíjaní skla medzi nástrojmi s ihlanovými hroťmi a odvaľujúcimi sa hladkými valcovými nástrojmi, ktoré zabezpečujú plynulý a rovnomerný pohyb spracovávaného skla. Modul môže obsahovať napríklad nástroje v dvoch radoch nad sebou. Hladké valce sú poháňané frekvenčne riadenými pohonmi. Samotný proces obíjania, otrepávania skla z fólie zabezpečujú ihlanovité nástroje pohybujúce sa priamočiarym vratným pohybom kolmým na posúvanie skla, ktorý je zabezpečovaný priemyselným vibrátorom.

Samotnou podstatou vibračného modulu sú vibrátory v počte 2 ks. Okrem výkonu vibrátorov sme pri návrhu modulu uvažovali aj s vhodným umiestnením vibrátorov. Predpokladáme že aj poloha vibrátorov bude mať vplyv na stupeň očistenia lepeného skla. Pri finalizácii vibračného modulu sme uvažovali s nasledovnými polohami vibrátorov:

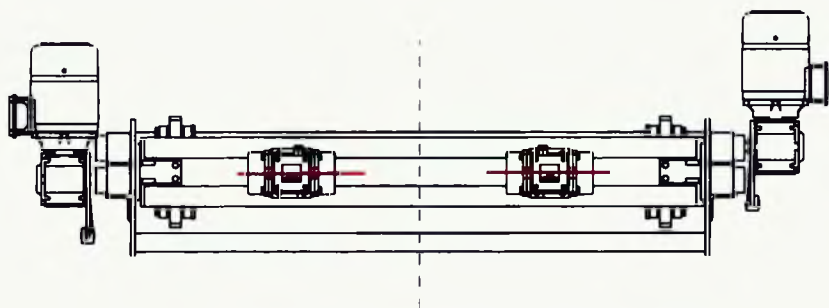
- Vibrátory zvisle (obr. 3.19)
- Vibrátory vodorovne (obr. 3.20)
- Vibrátory pod uhlom (obr. 3.21)

Poloha zvisle zabezpečí potrebné a najlepšie kompenzácie nežiadúcich smerov budenia, avšak veľkou nevýhodou tohto usporiadania je vzájomná synchronizácia budičov vibrácií. Motory pri tejto koncepcii usporiadania vibrátorov sa otáčajú v proti bežnom smere.



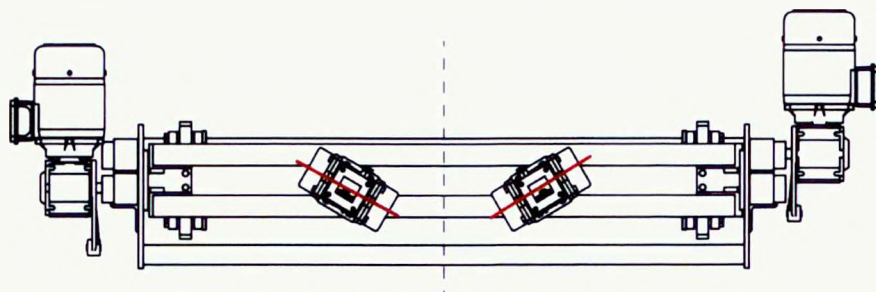
Obr. 3.19 vibrátory uložené vo zvislej polohe

Poloha vodorovne zabezpečí potrebnú synchronizáciu a aj potrebný smer budenia. Motory pri tejto koncepcii usporiadania vibrátorov sa otáčajú v rovnakom smere, aby sa predišlo tzv. chaotickému kmitaniu. Oklepávací nástroj sa bude, pri takomto usporiadaní vibrátorov, aj naklápať s smerom kolmým na spracovávané lepené sklo.



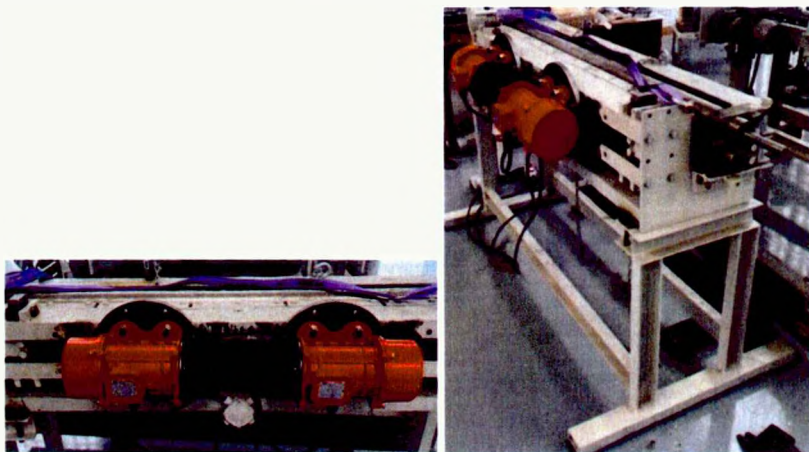
Obr. 3.20 vibrátory uložené vo vodorovnej polohe

Poloha vodorovne zabezpečí potrebnú synchronizáciu a aj potrebný smer buďenia. Motory sa pri tejto koncepcii usporiadania vibrátorov otáčajú v rovnakom smere, aby sa predišlo tzv. chaotickému kmitaniu. Oklepávací nástroj bude, pri takomto usporiadaní vibrátorov vykonávať iba lineárny pohyb s smerom kolmom na spracovávané lepené sklo.



Obr. 3.21 Vibrátory uložené pod uhlom

Fotografie po celkovej montáži vibračného modulu



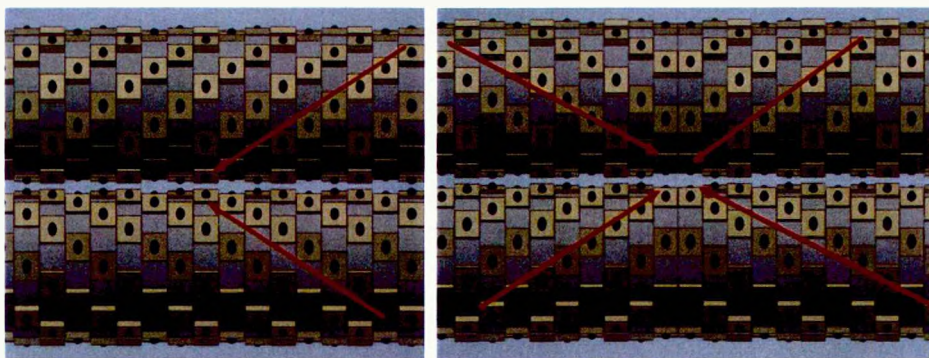
Obr. 3.22 Skompletizovaný oklepávací modul

3.6.2 Stierací modul a možnosti radenia stieracích nástrojov

Úlohou zaradeného **stieracieho modulu** je „zotrieť“ zvyškové sklenené črepiny, ktoré ešte zostali nalepené na PVB fólii. Toto dosiahneme jednak tvarom stieracích kotúčov a jednak rôznou frekvenciou otáčania valcov, na ktorých sú stieracie kotúče. Rôzne obvodové rýchlosti na spolu zaberajúcich valcoch spôsobujú, že medzi vzniká šmykové trenie, ktoré zabezpečí odtrhnutie aj posledných čriepkov nalepených na fólii. Efektívnosť oddelenia črepek a fólie je až 96 %.

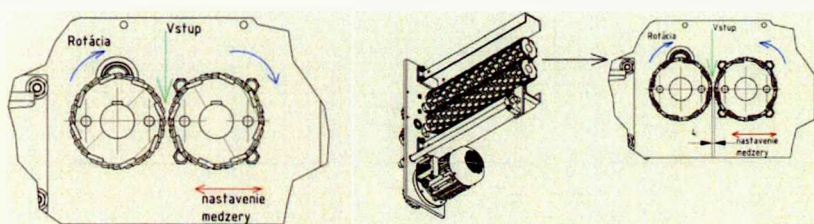
Pre stierací modul bolo zvolené špirálové radenie stieracích kotúčov, ktoré zabezpečuje vysokú úroveň samotného procesu stierania skla z fólie. Taktiež možno uložiť kotúče aj tak aby sa zbíjali v jednom bode.

Na obrázku 3.23 sú znázornené možnosti radenia stieracích kotúčov. Obr. 3.23a - špirála tvorená z kotúčov, obr. 3.23b - kotúče so zbíhaním k sebe do stredu.



Obr. 3.23 a - špirála tvorená z kotúčov b - kotúče so zbíhaním k sebe na stred

Takéto špirálové radenie kotúčov v kombinácii s proti sebe rotujúcim hriadel'mi vytvárajú celkovo vhodný stierací priestor (obr. 3.24), tak aby dochádzalo s správne mu stieraniu skla z fólie.



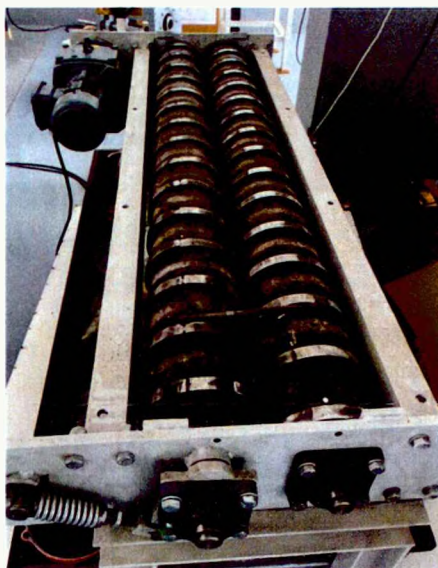
Obr. 3.24 Detail stieracieho priestoru

Po samotnej montáži jednotlivých konštrukčných dielov bol vytvorený kompletný stierací modul ako jeden z celkovej linky na dekompozíciu odpadového skla. Návrh kombinatoriky riešenia pre experimentálne skúšky:

- Vplyv usporiadania kotúčov:
 - radenie skrutkovicové
 - radenie šípovité
- Vplyv zmyslu otáčania stieracích valcov:
 - rovnaký zmysel
 - opačný zmysel
- Vplyv frekvencií otáčania jednotlivých stieracích valcov:
 - rovnaké frekvencie otáčania
 - rôzne frekvencie otáčania

V aktuálnom prevedení stieracieho modulu (obr. 3.25) je možné pri experimentálnych skúškach vytvárať rôzne kombinácie vyššie uvedených parametrov, za účelom dosiahnutia čo najlepšieho stupňa očistenia lepeného skla. Pri experimentálnom skúmaní budú vytvárané kombinácie zo zvolených parametrov ako napr.

- Radenie skrutkovicové - zabezpečené mechanicky
- Rovnaký zmysel otáčania - zabezpečené elektronicky
- Rovnaká frekvencia otáčania - zabezpečené elektronicky



Obr. 3.26 Lámací modul

Postup merania fázy A

Každá vzorka bude vložená do lámacieho modulu jeden krát a otáčkach 20, 40 a 60 ot / min následne po každom cykle bude opticky analyzované polámanie skla. Pre jednotlivé hodnoty otáčok bude 6 ks vzoriek.

Výsledok skúmania fázy A

Výsledkom tejto fázy je určenie optimálnych otáčok lámacích valcov tak, aby bol dosiahnutý čo najväčší efekt deštrukcie jednotlivých vzoriek.

Tab. 3.2 Tabuľka nameraných údajov pre experiment **FÁZA A**

Číslo vzorky / mv vzorky	Frekvencie otáčania ot/min	Zhodnotenie deštrukcie vzorky
V1	20	
V2	20	
V3	20	
V4	20	
V5	20	
V6	20	
V1	40	
V2	40	
V3	40	
V4	40	
V5	40	
V6	40	
V1	60	
V2	60	
V3	60	
V4	60	
V5	60	
V6	60	

Tab. 3.3 Tabuľka nameraných údajov pre experiment **FÁZA B**

Číslo vzorky / mv vzorky	mv ₁ (g)	mv ₂ (g)	mv ₃ (g)	mv ₄ (g)	mv ₅ (g)
V1					
V2					
V3					
V4					
V5					
V6					

Fáza B sa bude opakovať pre každé usporiadanie vibrátorov v 3 polohách a to :

- Vibrátory zvislo
- Vibrátory vodorovne
- Vibrátory pod uhlom

Parametrom hodnotenia

Úbytok hmotnosti skúmaných vzoriek po jednotlivých meraniach

Hypotéza pre fázu B - Skúšky vibračného modulu

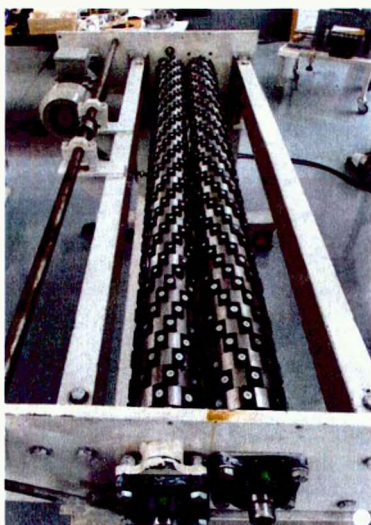
Hypotézou je predpoklad, že k najlepšiemu úbytku lepeného skla dôjde pri prvých 2 až 3 prechodoch lepeného skla cez samotný vibračný modul.

3.7.3 Skúšky stieracieho modulu- Fáza C

Nastavenie stieracieho modulu sa bude meniť, a to konkrétne sa budú meniť frekvencie otáčania oboch valcov v troch úrovniach, ale štrbina medzi valcami zostane konštantná a to tak aby bola nastavená čo najmenšia medzera medzi valcami.

Základné parametre fázy C

- Medzera medzi valcami bude konštantná
- Vzorka skla (30 x 30 cm) – v počte 6 kusov - ale každá vzorka bude pred lámaná – to znamená že každá vzorka prejde jeden krát cez vibračný modul - vzorka bude výsledok FÁZY B
- Vstupná hmotnosť vzorky bude konštantná
- Frekvencie otáčania valcov sa budú meniť v hodnotách 120 ot/ min, 200 ot/min, 280 ot/ min



Obr. 3.28 Stierací modul

Postup merania fázy C

Každá vzorka bude pri konštantnej medzere a otáčkach 120, 200 a 280 ot./min bude vložená do stieracieho modulu 1 krát, po každom cykle bude každá vzorka odvážená za účelom zistenia úbytku skla. Pre jednotlivé hodnoty otáčok bude 6 ks vzoriek.

Výsledok skúmania fázy C

Výsledkom tejto fázy je určenie optimálnych otáčok stieracích valcov tak, aby bol dosiahnutý čo najväčší úbytok skla, jednoducho povedané pri akých otáčkach dochádza k najväčšiemu úbytku hmotnosti skla.

Tab. 3.4 Tabuľka nameraných údajov pre experiment **FÁZA C**

Číslo vzorky / mv vzorky	Frekvencie otáčania ot/min	mv (g)
V1	120	
V2	120	
V3	120	
V4	120	
V5	120	
V6	120	
V1	200	
V2	200	
V3	200	
V4	200	
V5	200	
V6	200	

V3	280	
V4	280	
V5	280	
V6	280	

Hypotéza pre fázu C - Skúšky stieracieho modulu

Hypotézou je predpoklad, že k najlepšiemu úbytku lepeného skla dôjde pri vyšších otáčkach stieracích valcov.

3.7.4 Fáza D – skúšky rôznych kombinácií jednotlivých modulov

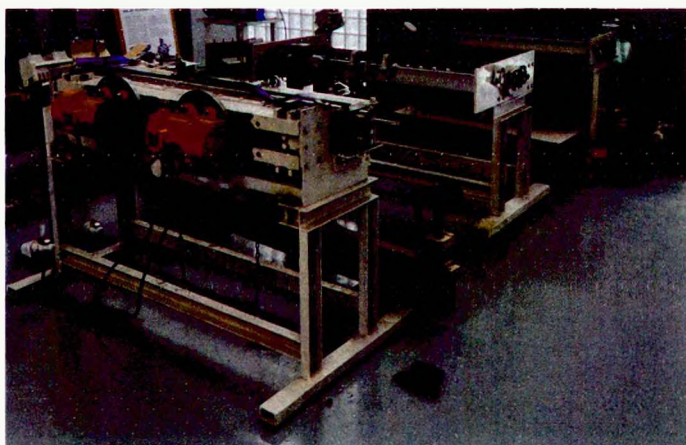
Táto fáza je zameraná na verifikačné experimenty linky na spracovanie odpadového skla. Nosným cieľom týchto experimentov bude vhodné usporiadanie jednotlivých modulov linky tak, aby sme dosiahli čo najväčšie očistenie fólie odpadového skla resp. čo najväčšie množstvo oddeleného skla.

Základné parametre fázy D

- Prvý bude vždy lámací modul – vychádzame s poznatkov, že v prvej fáze je vždy potrebné sklo rozlámať, resp. porušiť jeho štruktúru
- Nastavenie stieracieho modulu bude určené na základe výsledkov výskumu FÁZY B – skúšky stieracieho modulu
- Nastavenie vibračného modulu bude určené na základe výsledkov FÁZY C – skúšky vibračného modulu
- Vzorka skla (30 x 30 cm) – v počte 6 kusov pre jedno experimentálne meranie
- Premenné v experimente bude poradie stieracieho a vibračného modulu.

Tab. 3.5 Tabuľka umiestnenia modulov pre experiment FÁZA D

Poradie modulov	1	2	3
FÁZA D 1	Lámací modul	Stierací modul	Otrepávací modul
FÁZA D 2	Lámací modul	Vibračný modul	Stierací modul



Obr. 3.29 Linka na spracovanie odpadového lepeného skla

Postup merania fázy D

Parametre modulov budú nastavené na základe výskumu FÁZA A, FÁZA B a FÁZA C. Meniť sa bude iba poradie modulov. Experiment prebehne na 6 ks vzoriek, a teda bude vykonaných 6 replikácií. Po každom cykle (priebeh cez všetky moduly) bude meraný úbytok hmotnosti vzorky.

Výsledok skúmania fázy D

Výsledkom experimentálneho skúmania v tejto časti bude navrhnutie optimálneho rozmiestnenia linky, za účelom dosadenia čo najväčšieho úbytku odpadového skla resp. dosiahnutie čo najčistejšej fólie.

Tab. 3.6 Tabuľka nameraných údajov pre experiment FÁZA D1 a FÁZA D2

Číslo vzorky	mv (g) hmotnosť na výstupe z linky
V1	
V2	
V3	
V4	
V5	
V6	

Hypotéza pre fázu D - skúšky rôznych kombinácií jednotlivých modulov

Hypotézou je predpoklad, že k najlepšiemu úbytku lepeného skla dôjde, ak jednotlivé moduly budú usporiadané nasledovne :

Lámací modul – vibračný modul – stierací modul

Ciele výskumu

Fázy výskumu A, B a C majú jasne stanovený cieľ a to optimalizovať nastavenia jednotlivých modulov samostatne a teda nezávisle na iných moduloch. Výskumom vo fázach D1 a D2 je nosnou úlohou experimentálne určiť poradie modulov, ale už ako komplexnej linky, a teda v tejto fáze výskumu už jednotlivé moduly na seba vplyvajú. Na základe takto komplexného výskumu jednotlivých fáz bude možné linku na spracovanie odpadového lepeného skla optimálne nastaviť a taktiež optimálne technologicky usporiadať.

3.8 Stavba linky- SWOT analýza variantných konfigurácií v rámci riešenia

Cieľom SWOT analýzy je ozrejmiť a vyhodnotiť variantné konfigurácie linky na spracovanie odpadového lepeného skla s rôznymi modulmi v horizontálnom líniovom usporiadaní, resp. horizontálnom usporiadaní modulov čiastočne nad sebou z hľadiska silných a slabých stránok, príležitostí a ohrození, ktoré by mohli spočívať v danom projekte v záujme budúcej realizácie. Súčasne v rámci manažérskeho rozhodovania naznačiť možné alternatívy budúceho vývoja, možnosti na ich využitie, prípadne ich riešenie.

3.8.1 Variantné riešenia usporiadania linky

Konštrukcia navrhovaného technologického zariadenia na spracovanie vrstveného skla vychádza z toho, že pozostáva z viacsťupňovej zostavy variabilných modulov. Vďaka tejto dôležitej vlastnosti je možné na jednom zariadení spracovávať sklo rôznych hrúbok, rozmerov

alebo aj viacvrstvové vrstvené sklo. Takto je možné vytvoriť novú variabilnú konfiguráciu pre špecifické požiadavky jednotlivých zákazníkov.

Popísané moduly sú schopné pracovať samostatne aj spoločne s plynulým tokom technológie. Vzájomné pohyby a súčinnosť je možné prepojiť vďaka frekvenčne riadeným pohonom jednotlivých valcov ako aj frekvencii aplikovaného priemyselného vibrátora.

Silnou stránkou navrhovanej technológie je:

- konštrukčné riešenie linky je navrhnuté s veľkým dôrazom na modularitu,
- jednotliví zákazníci si môžu nechať svoje zariadenie vyrobiť na mieru.

Príležitosti

- modulová konštrukcia umožňuje široké uplatnenie týchto strojových zariadení pri spracovaní odpadového vrstveného skla v rôznych odvetviach, najmä v stavebníctve a automobilovom priemysle.

V rámci stavby linky vďaka tejto dôležitej modulárnej vlastnosti linky, je možné na jednom zariadení spracovávať sklo rôznych hrúbok, rozmerov alebo aj viacvrstvové vrstvené sklo.

Jednotlivé moduly môžu byť usporiadané jeden po druhom, viackrát. Tam, kde sú hrubé a viacvrstvové vrstvené tabule skla, je možné použiť niekoľko lámacích modulov usporiadaných za sebou, aby sa dosiahlo rovnomerné, husté, horizontálne drvenie skla a aby sa výrazne znížila pevnosť a adhézne sily medzi sklom a sklom fólie.

Podľa typu vrstveného skla je možné usporiadať niekoľko vibračných modulov za sebou. V prevádzke by mali byť usporiadané vibračné moduly proti sebe v pároch aby sa dosiahlo oddelenie skla od fólie na oboch stranách iba jedným prechodom skla strojovým zariadením. V prípade hrubšieho skla a skla s väčším počtom vrstiev je vhodnejšie usporiadať niekoľko párov vibračných modulov za sebou, aby sa zvýšila účinnosť separácie skla a dosiahla lepšia čistota fólie.

3.8.2 Minimálna konfigurácia linky A-B-C

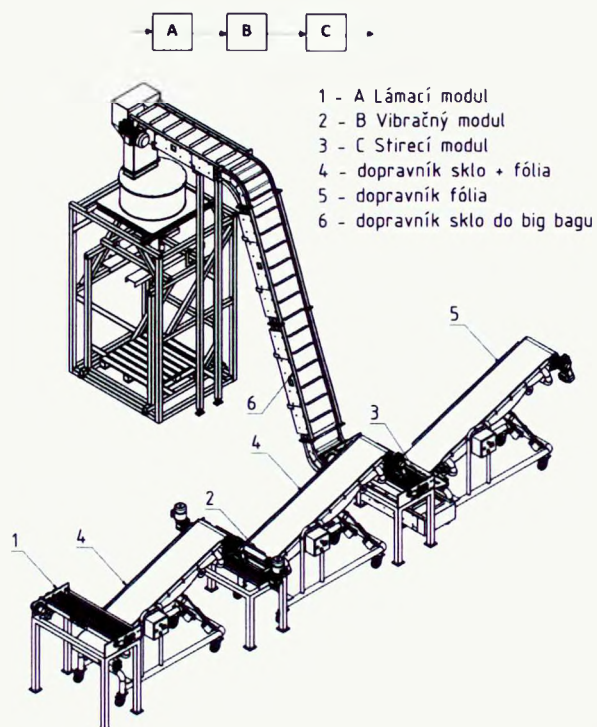
V minimálnej konfigurácii linky (obr. 3.30) linka pozostáva z jedného lámacieho modulu **A**, kde je sklo rozbíjané v priečnom a pozdĺžnom smere medzi dvoma párami lámacích profilových valcov. Druhý modul linky je modul **B**, kde sa rozbité a ešte nerozdelené tabule skla oklepávajú medzi vibračným nástrojom s hrotmi. Posledným nástrojom tejto minimálnej konfigurácie je stierací modul **C**, kde sa PVB fólia mechanicky očistí pôsobením rôznych frekvencií otáčania stieracieho valca.

Výhodou tohto horizontálneho usporiadania linky je:

- Jednoduchá výmena alebo pridávanie jednotlivých modulov.
- Nie je potrebné stavať celkovú nosnú konštrukciu linky.
- Jednoduchá údržba.

Nevýhodou tohto horizontálneho usporiadania linky je:

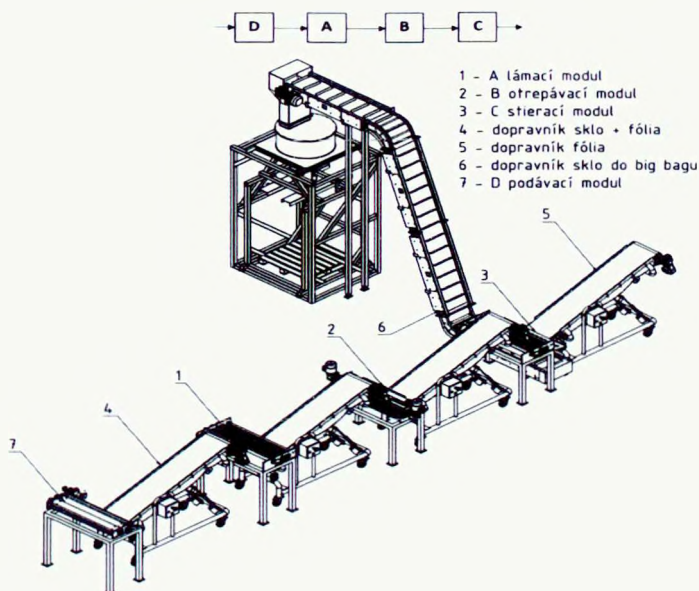
- Vyššie nároky na priestor.
- Usporiadanie linky vo vzťahu k typu vrstveného skla.



Obr. 3.30 Konfigurácia A-B-C linky na spracovanie odpadového lepeného skla

3.8.3 Konfigurácia horizontálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s jedným vibračným modulom

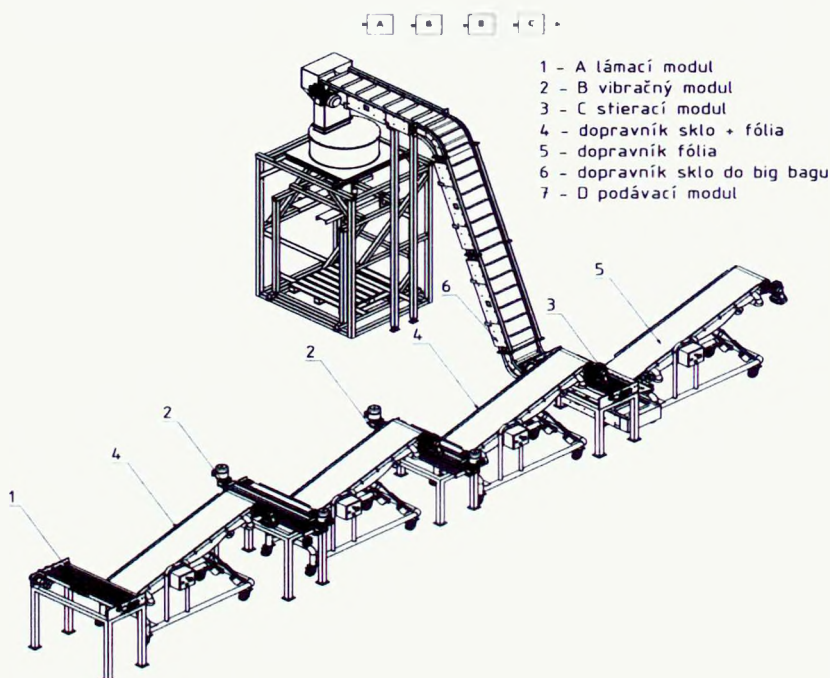
Prínosom doplnenia základnej konfigurácie napr. s podávacím modulom (vyrovnávacím) **D** (obr. 3.31) je skutočnosť, že spracované odpadové vrstvené sklo v tejto konfigurácii je priestorovo orientované a dokonca čiastočne sploštené. Keď sklo prechádza týmto modulom je už tiež do určitej miery dostatočne rozbité.



Obr. 3.31 Konfigurácia horizontálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s podávacím modulom

3.8.4 Konfigurácia horizontálnej linky s dvoma vibračnými modulmi A-B-B-C linka

V rámci tejto konfigurácie (obr. 3.32) sú uplatnené dva vibračné moduly. Cieľom tejto konfigurácie je zvýšiť efektívnosť čistenia fólie. **Predpokladom na dosiahnutie požadovanej čistoty je dostatočný priestor a do určitej miery aj výkon celej linky.**



Obr. 3.32 Konfigurácia horizontálneho usporiadania A-B-B-C linky na spracovanie odpadového lepeného skla s dvoma vibračnými modulmi

3.8.5 Konfigurácia vertikálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s jedným vibračným modulom

V rámci tejto konfigurácie (obr. 3.33) ide o vertikálne usporiadanie minimálnej konfigurácie linky s doplneným podávacím (vyrovnávacím) modulom D.

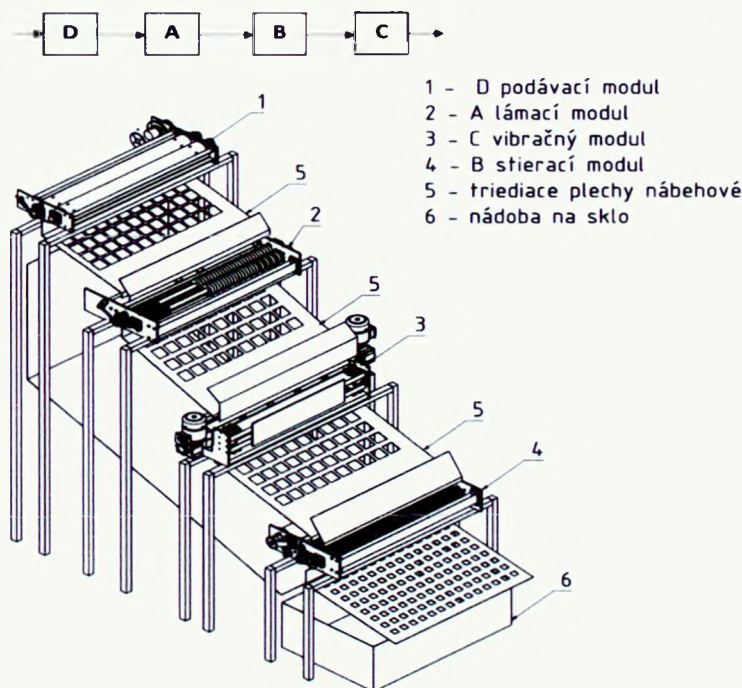
Výhodou vertikálneho usporiadania linky je:

- Znížené priestorové požiadavky (dĺžka šírka), moduly sú usporiadané čiastočne nad sebou.
- Lepšie odstraňovanie črepov prepadávaním do kontajnerového koša.
- Nižšia energetická náročnosť - pohyb odpadového skla medzi modulmi je zabezpečený gravitáciou bez akýkoľvek poháňaných dopravníkov.

Nevýhody tejto konfigurácie zahŕňujú:

- Nutnosť vyššej výšky haly, nakoľko hala musí zohľadňovať priestorové usporiadanie modulov.
- Nutnosť vybudovania nosnej konštrukcie pre priestorové usporiadanie modulov.

- Vysoké vstupy na realizáciu z pohľadu nákladovosti realizácie.
- Predpoklad vyššej prašnosti pracovného prostredia rozptylom sklených prachových častíc.
- Náročnosť zásahu operátora pri havarijných situáciách a service



Obr. 3.33 Konfigurácia vertikálneho usporiadania linky D- A-B-C na spracovanie odpadového lepeného skla s jedným vibračným modulom

POĎAKOVANIE

Táto publikácia bola realizovaná s podporou projektu APVV-18-0505 „Vývoj originálnej konštrukcie zhutňovacieho lisu s obrátenou kinematikou“ a s podporou projektu KEGA 030STU-4/2022 s názvom RORESA - Aplikácia rozšírenej reality v procese vzdelávania obrábacích strojov a výrobných systémov podporovaného Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR a projektom UNIVNET, zmluva č. 0201/0082/19.

Literatúra

- [1] Hlaváč J.: Základy technológie silikátů, SNTL- nakladatelství technické literatury, Praha 1981.
- [2] <http://www.sklarskauniverzita.sk/2013/12/triedeny-zber-a-zhodnocovanie-odpadoveho-skla-v-slovenskej-republike-a-v-zahranici/>
- [3] <http://www.odpady-portal.sk/Dokument/101062/v-trnave-spustili-linku-na-spracovanie-specialnych-odpadovych-skiel.aspx>
- [4] <http://www.sklenenyshop.cz/>
- [5] <http://kosit.sk/mnozstvo-spracovaneho-odpadoveho-skla-v-sr-nekleslo/>
- [6] <http://www.engineering.sk/clanky2/automobilovy-priemysel/301-recyklacnetechnologievap>
- [7] <http://www.windowglass.sk/index.php?flink=velkoobchod-bezpecnostne&blink=v-velkoobchod&vvisible=1>
- [8] <http://www.artmex.sk/tipy-a-rady/125-druhy-skla-pouzivane-v-stavebnictve>
- [9] <http://agr.sk/>
- [10] <http://www.minv.sk/>
- [11] <http://www.infoweby.sk/>
- [12] <https://sk.wikipedia.org/wiki/Sklo>
- [13] <http://www.oskole.sk/>
- [14] ŠOOŠ, Ľubomír - POKUSOVÁ, Marcela - BLECHA, Petr - MATÚŠ, Miloš - ONDRUŠKA, Juraj - ČAČKO, Viliam - BÁBICS, Jozef.: PP 107-2019 Spôsob vysoko účinnej dekompozície vrstvených odpadových skiel a stavebnicová linka, 08.10.2019, Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2019
- [15] ŠOOŠ, Ľubomír - POKUSOVÁ, Marcela - BLECHA, Petr - MATÚŠ, Miloš - ONDRUŠKA, Juraj - ČAČKO, Viliam - BÁBICS, Jozef.: Spôsob efektívneho zhodnocovania odpadových lepených skiel a modulová konštrukcia zariadenia úžitkový vzor č. 8786. Banská Bystrica Úrad priemyselného vlastníctva SR 2020. 5 s.
- [16] ŠOOŠ, Ľubomír- POKUSOVÁ, Marcela- MATÚŠ, Miloš- ONDEROVÁ, Iveta- ONDRUŠKA, Juraj- ČAČKO, Viliam- BABICS, Jozef. Recyklácia vrstveného skla: Návrh progresívnej technológie dekompozície viacvrstvových lepených skiel. In Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 84-119. ISBN 978-80-553-3867-5.
- [17] ŠOOŠ, Ľubomír - POKUSOVÁ, Marcela - MATÚŠ, Miloš - KRIŽAN, Peter - ČAČKO, Viliam. Design of a modular technological line for the recycling of laminated car glass. In Analysis of the state, forecasts and new technologies of waste recovery in the automotive industry. 1. vyd. Ludenscheid : RAM-Verlag, 2021, s. 68 - 91. ISBN 978-3-96595-008-5.
- [18] ŠOOŠ, Ľubomír - POKUSOVÁ, Marcela - MATÚŠ, Miloš - BENIAK, Juraj - ONDEROVÁ, Iveta - BABICS, Jozef. SmartOdpady II. : Integrovaná informačná a inovačná platforma recyklačných technológií. In Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, s. 66 - 83. ISBN 978-80-553-3867-5.
- [19] ŠOOŠ, Ľubomír - MATÚŠ, Miloš - POKUSOVÁ, Marcela - ČAČKO, Viliam - BÁBICS, Jozef. The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies. In Recycling. Vol. 6, iss. 2 (2021), s. 26. ISSN 2313-4321 (2020: 0.569 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85105488852

Získavanie cenných zložiek z vyradených lítium iónových automobilových akumulátorov cestou materiálovej recyklácie



Riešiteľ'ský kolektív:

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie
Ústav recyklačných technológií

Hlavný riešiteľ:

prof. Ing. Tomáš Havlik, DrSc

Riešitelia:

doc. Ing. Dušan Oráč, CSc.
Ing. Jakub Klimko, PhD.

4 Získavanie cenných zložiek z vyradených lítium iónových automobilových akumulátorov cestou materiálovej recyklácie

Vzhľadom na veľmi vážne hrozby v oblasti klimatických zmien a globálneho otepľovania sa presadzujú vo všetkých oblastiach ľudskej činnosti nízkouhlíkaté technológie. V najdynamickejšom segmente ľudských aktivít, v automobilizme, sa to prejavilo v snahe o celosvetovú aplikáciu elektromobility, čiže namiesto spaľovacích motorov sa ako jednotky pohonu používajú elektromotory, ktoré sú v súčasnosti napájané lítium iónovými trakčnými akumulátormi (LiA). Samozrejme, nemožno očakávať, že LiA majú nekonečnú životnosť, preto ruka v ruku s nástupom elektromobility prichádza na pretras aj otázka ich spracovania po uplynutí ich životnosti. V rámci dynamicky sa rozvíjajúceho sektoru elektrických vozidiel je jednou z najvýznamnejších výziev odpadového priemyslu nakladanie s vyradenými trakčnými LiA. Tieto sú potenciálne veľmi nebezpečným odpadom, ale na druhej strane sú zdrojom veľmi významných materiálov, ktoré je nutné recyklovať vzhľadom na ich cenu a nedostatok. Nezanedbateľným faktom je, že niektoré zložky, ako kobalt, grafit, lítium, titán a najnovšie [52] aj mangán, meď a nikel, obsiahnuté v LiA, patria medzi kritické suroviny pre Európsku úniu. Recyklácia LiA je významnou cestou k získavaniu týchto kritických surovín, ale na druhej strane je to komplikovaný a náročný proces, keďže sa jedná o komplexný kompozitný materiál a jeho charakter, ako aj elektrické a chemické vlastnosti sú vážnym rizikom z hľadiska bezpečnosti a ochrany zdravia.

4.1 Úvod

Výsledkom súčasnej oficiálnej doktríny je, že zem globálne prechádza klimatickými zmenami, ktoré sú spôsobené predovšetkým spôsobené ľudskou činnosťou a to tvorbou skleníkových plynov ako oxid uhličitý, metán, oxid dusný a fluórované uhľovodíky, ktoré sa uvoľňujú zo spaľovania fosílnych palív, poľnohospodárskou činnosťou, priemyselnou produkciou a ďalšími ľudskými aktivitami.

Globálne otepľovanie je jeden z najvýznamnejších javov súvisiacich s klimatickými zmenami, čo má významné negatívne vplyvy na životné prostredie a ľudskú spoločnosť. Preto je v súčasnosti vyvíjaný veľký tlak na zníženie emisií skleníkových plynov a prechod na čistejšie a udržateľnejšie obnoviteľné zdroje energie. Ďalšie kroky zahŕňajú napríklad zlepšenie energetickej efektivity, podporu nízkouhlíkatej dopravy a poľnohospodárstva, znižovanie množstva odpadov a podobne.

Najdynamickejšie sa rozvíjajúci sektor priemyselných aktivít je automobilový priemysel. V zmysle vyššie uvedeného je v poslednom období vyvíjaný veľký politický tlak na obmedzenie spaľovacích motorov a ich náhradu za alternatívne elektrické pohony. V rámci Európskej únie v júni 2023 podporili europoslanci návrh zákazu po roku 2035 predávať nové autá so spaľovacím motorom. Znamená to, že od tohto dátumu budú nové osobné a ľahké úžitkové autá musieť spĺňať kritérium nulových emisií CO₂. Rada ministrov životného prostredia sa dohodla tiež na bližšom ciele zníženia týchto emisií o 55 %, resp. 50 % od roku 2030. Opatrenie v praxi znamená zákaz predaja benzínových a naftových automobilov a prechod na elektromobily.

Zdrojom energie pre elektromobily (EV) a hybridné vozidlá (HEV) sú v súčasnosti lítium iónové trakčné akumulátory. Tieto majú pochopiteľne obmedzenú životnosť. Súčasný akumulátor v elektromobiloch vydrží od 1500 do 3000 nabíjajúcich cyklov, po čom sa predpokladá pokles ich kapacity o cca 30 % a LiA sa repasuje. Repasovanie LiA elektromobilu je nákladovo

efektívnejším riešením ako okamžitá recyklácia. Výrobcovia odhadujú, že regenerovaná batéria má životnosť ďalších 10 až 15 rokov, čo dramaticky predlžuje užitočnosť batérií a znižuje ich celkovú uhlíkovú stopu. LiA môžu poskytnúť ďalších 5 – 8 rokov služby napríklad ako energetické úložisko pre potreby distribučnej sústavy.

V každom prípade po istom relatívne dlhom čase dôjde k nutnosti vyradené LiA recyklovať. Tento dlhší čas poskytuje istú výhodu, keďže materiálová recyklácia LiA je v podstate nový fenomén a je potrebné dôkladne preštudovať, overiť a vybudovať recyklačné kapacity na spracovanie LiA [1, 2]. Recyklácia vyradených LiA je očakávaným a nevyhnutným procesom vzhľadom na obsah cenných zložiek, ako aj nebezpečný charakter vyradených LiA.

Od prvotného objavu LiA v 70. rokoch 20. storočia cez udelenie Nobelovej ceny v roku 2019 za ich objav, sa využitie LiA v globálnom meradle exponenciálne zvyšuje [3-6]. V závislosti od čoraz väčšieho využívania sa ich výroba a recyklácia či zneškodnenie stávajú predmetom politických tlakov, ale aj obáv o ohrozenie životného prostredia [7, 8].

Svetové zásoby kovov, bez ktorých LiA nemôžu existovať, ako lítium, kobalt, nikel a iné kovy, sú obmedzené a nerovnomerne rozložené, pričom ich ťažba je energeticky a výrobné náročná a zároveň znečisťuje životné prostredie [9, 10]. Viac ako 70 % svetovej ťažby kobaltu pochádza z Konga [11], pričom žiadna iná krajina neprodukuje viac ako 5 %. Čína a Mozambik produkujú 70 % svetovej produkcie prírodného grafitu, dôležitého materiálu pre anódy LiA [12].

Na dostupnosť a využiteľnosť prírodných zdrojov vplyvajú viaceré, často nepredvídateľné a neovplyvniteľné vplyvy, ako prírodné katastrofy, vojny alebo rozhodnutia o alokácii zdrojov a vlastnícke vzťahy. V prípade LiA je to obzvlášť citelné, najmä z pohľadu lítia, kobaltu a grafitu. Toto je aj dôvod, prečo spomenuté suroviny boli zaradené do zoznamu kritických surovín pre Európsku úniu [13]. To sa týka aj súčasného vojenského konfliktu na Ukrajine. Ukrajina je vo všeobecnosti vnímaná ako obilnica Európy, ale na Ukrajine sa nachádzajú jedny z najväčších zásob titánu a železnej rudy na svete, ako aj dosiaľ nedotknuté ložiská lítia a rozsiahle ložiská uhlia. Celková hodnota surovín sa pohybuje v rádoch desiatok miliárd dolárov. Aj tu treba hľadať veľký záujem zúčastnených strán a ich spojencov v tomto konflikte

Nedostatok zdrojov a zásobovanie sú obzvlášť dôležité vzhľadom na relatívne krátku životnosť zariadení, či už ide o fyzickú a/alebo morálnu amortizáciu, snaha o neustály zisk výrobcov cestou „upgradovania“ na novšie modely zariadení, alebo pomerne časté rýchle ukončenie životnosti LiA. Realita v súčasnosti ukazuje, že väčšina vyradených LiA sa nakoniec ukladá na skládku, keďže ešte stále neexistujú ekonomicky výhodné spôsoby spracovania vyradených LiA.

Vo februári 2019 bolo celosvetovo zaregistrovaných viac ako 5,6 milióna elektrických vozidiel (EV, HEV), čo je 64 % nárast od roku 2018 [14]. Do roku 2040 sa predpokladá celosvetový predaj všetkých EV, HEV na úrovni 58 % [15]. Na Slovensku je v súčasnosti registrovaných približne 9500 elektromobilov [16], čo je len tretina očakávaného počtu. Na druhej strane ak vstúpi do reálnej platnosti zákaz predaja áut so spaľovacím motorom po roku 2035 v Európskej únii a budú sa predávať len elektrické a hybridné vozidlá, tlak na ich zneškodnenie po uplynutí doby ich životnosti vzrastie. Osobitná pozornosť musí byť venovaná spracovaniu trakčných LiA vzhľadom na obsah cenných zložiek, ako aj nebezpečný charakter.

V súčasnosti sa v Európskej únii na recykláciu LiA vzťahuje smernica 2006/66/ES. Táto smernica vyžaduje recykláciu päťdesiatich percent priemernej hmotnosti použitých batérií vrátane použitých LiA [17]. Podľa tejto smernice sú elektrické články s obsahom lítia považované za ostatný odpad. Táto je však už prekonaná, najmä vzhľadom na elektrické články s obsahom lítia, keďže v roku 2006 sa LiA prakticky nepoužívali.

18. januára 2023 bol Radou EÚ s konečnou platnosťou schválený text nariadenia o batériách a akumulátoroch a text tejto smernice bude v ďalšom schvaľovaný Európskym parlamentom [18]. V tejto budúcej smernici je významne diskutovaný a upravovaný postup spracovania vyradených LiA, pričom jedna z najdôležitejších zmien spočíva v tom, že oproti smernici 2006/66/ES budú vyradené LiA považované za nebezpečný odpad, čo významne mení prístup recyklátorov k tejto komodite.

Materiálová recyklácia LiA je náročným procesom, keďže LiA má komplikovanú konštrukciu, ktorá obsahuje katódu, anódu, elektrolyt, separátor a prúdové kolektory spolu s obalovými materiálmi a nutnou elektronikou. Podľa Medzinárodnej agentúry pre energiu obsahujú EV-HEV vyrobené v roku 2019 až 500 000 ton odpadu LiA a celkové množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2040 by mohlo byť až 8 miliónov ton [19].

Táto agentúra so sídlom v Paríži zverejnila správu o roli kritických materiálov pri prechode na čistú energiu. V nej sa uvádza, že na typický elektromobil je potrebné šesťkrát viac minerálnych vstupov ako na bežné vozidlo. Na vybudovanie veternej elektrárne je potrebný deväťnásobok minerálov ako pre plynovú elektrárňu. Ak má starý kontinent dosiahnuť ciele Parížskej dohody, znamená to štvornásobné zvýšenie požiadaviek na minerály na výrobu čistej energie už do roku 2040. Takýto vysoký dopyt vytvára oprávnené otázky o dostupnosti a udržateľnosti ponuky a produkcie surovín. Podľa odhadov Svetovej banky bude do roku 2050 nutné vyťažiť tri miliardy ton minerálov a kovov, na čo bude treba otvoriť 50 nových litiových baní, 60 niklových a 17 kobaltových baní. Uvádza sa, že prechod k čistým palivám je viac komoditným ako energetickým prechodom. Vzhľadom na obrovský dopyt a krátky čas realizácie pôjde o veľmi turbulentné obdobie. Všetko to smeruje jednoznačne k tomu, že recyklácia vyradených LiA je nevyhnutnou požiadavkou veľmi vysokej priority [19].

Činnosť združenia Univerzitná a priemyselná výskumno-edukačná platforma recyklujúcej spoločnosti UNIVNET je zameraná na stav a vízie zhodnocovania vybraných druhov odpadov najmä z automobilového priemyslu Slovenskej republiky. Hlavným cieľom združenia sú prognostické a výskumno-vývojové aktivity pri hľadaní nových technológií a techník maximálne efektívneho zhodnocovania odpadov najmä v automobilovom priemysle a s cieľom minimalizovať negatívne dopady na životné prostredie a šetriť primárne energetické a surovinové zdroje.

Keďže jednou z najvýznamnejších výziev odpadového priemyslu je v rámci dynamicky sa rozvíjajúceho sektoru elektrických vozidiel nakladanie s vyradenými trakčnými LiA. Tieto sú potenciálne veľmi nebezpečným odpadom, ale na druhej strane sú zdrojom veľmi významných materiálov, ktoré je nutné recyklovať vzhľadom na ich cenu a nedostatok. Nezanedbateľným faktom je, že niektoré zložky, ako kobalt, grafit, lítium, obsiahnuté v LiA patria medzi kritické suroviny pre Európsku úniu. Recyklácia LiA je významnou cestou k získaniu týchto kritických surovín, ale na druhej strane je to komplikovaný a náročný proces, keďže sa jedná o komplexný kompozitný materiál a jeho charakter, ako aj elektrické a chemické vlastnosti sú vážnym rizikom z hľadiska bezpečnosti a ochrany zdravia.

V rámci činnosti združenia UNIVNET sa tejto problematike venuje Ústav recyklačných technológií, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Technická univerzita v Košiciach. Projekt sa riešil v období 2019 – 2022 a v tomto príspevku sú zhrnuté výsledky riešenia hlavne za rok 2022.

Pre riešenie možnosti materiálovej recyklácie vyradených LiA sa pre celú dobu riešenia postupne navrhol ideový postup materiálovej recyklácie vyradených automobilových LiA s jednotlivými etapami riešenia tak, ako je uvedené v tab. 4.1.

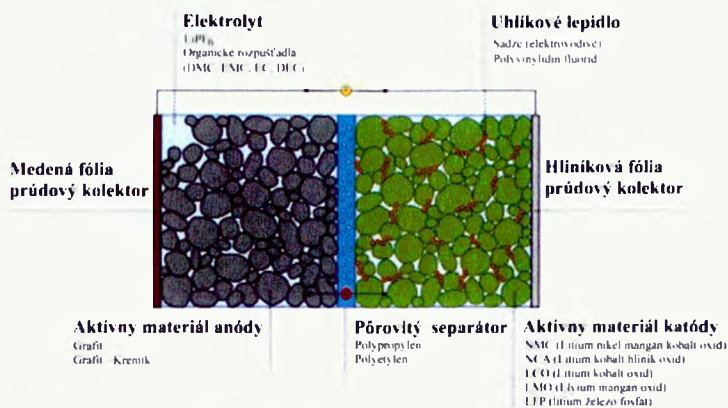
Tab. 4.1 Postup riešenia za celú dobu projektu

	2019	2020	2021	2022
Štúdium relevantnej literatúry	X	X	X	X
Analýza publikovaných výsledkov	X	X	X	X
Prehľad jestvujúcich postupov, ich analýza a možná aplikácia na slovenské pomery	X			
Teoretická ekonomická analýza materiálovej recyklácie	X			
Materiálová a konštrukčná analýza automobilových LiA	X	X		
Vybíjanie zvyškových elektrických napätí	X	X	X	
Možnosti fyzikálno – mechanického spracovania		X	X	X
Rozvaha a experimentálne určenie principiálneho spôsobu spracovania vyradených LiA		X		
Možnosti oddelenia a získania Cu, Al, Fe		X	X	X
Možnosti oddelenia a získania anódovej hmoty		X	X	X
Možnosti oddelenia a získania katódovej hmoty			X	X
Možnosti oddelenia a získania plastov			X	X
Možnosti oddelenia a získania kovov z roztoku, najmä Li, Ni, Co			X	X
Menežment vzniknutých odpadov			X	X
Poloprevádzkové experimentovanie			X	X
Vyjednávanie o praktickej aplikácii		X	X	X
Návrh schémy praktickej aplikácie				X
Aktívna spolupráca na EIA, odborné posudky, stavba zariadenia				X

Výsledky riešenia jednotlivých etáp sú postupne zverejnené v literatúre 20-23. Tento dokument obsahuje prevažne výsledky, získané v roku 2022 a zhrnutie výsledkov za celú dobu riešenia.

4.1.1 Vývoj poznatkov o problematike recyklácie LiA

Litiový akumulátor je pomerne zložitý komplexný systém vytvorený rôznymi materiálmi a fungujúci v rozličných úrovniach ako zobrazuje obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schématický pohľad na hlavné zložky LiA [24]

Základnou jednotkou LiA je teleso pozostávajúce z medenej fólie, reprezentujúcej prúdový kolektor, na ktorej je umiestnený pórovitý anódový materiál tvorený grafitovými, prípadne kremíkovými časticami upevnenými spojivom. Priestor medzi anódou a katódou je oddelený polypropylénovým alebo polyetylénovým separátorom. Pórovitá katóda je tvorená aktívnym materiálom zmiešaným s vodivým uhlíkom a polymerickým spojivom polyvinyliden fluoridom PVDF. Katódický vodivý kolektor je tvorený hliníkovou fóliou.

Pórovité elektródy a separátor sú nasiaknuté elektrolytom, tvoreným soľou LiPF_6 rozpustenou v zmesi organických rozpúšťadiel ako dimetylkarbonát DMC, etylmetylkarbonát EMC, etylénkarbonát EC, cyklohexylbenzén CHB, dietylkarbonát DEC [25]. Uvedené materiály sú vrstvené do vrstiev o hrúbke stoviek mikrónov a menej, mnohokrát poprekladané a uložené v ocelovom resp. hliníkovom obale alebo v pružnom púzdre obalenom pohlinikovanou fóliou [26, 27].

Zloženie anódy je v podstate jednotné a je tvorené grafitom umožňujúcim interkaláciu lítia. [28]. Aktívny materiál anódy je previazaný spojivom PVDF, umožňujúcim dobrú príľnavosť k fólii prúdového kolektora [29].

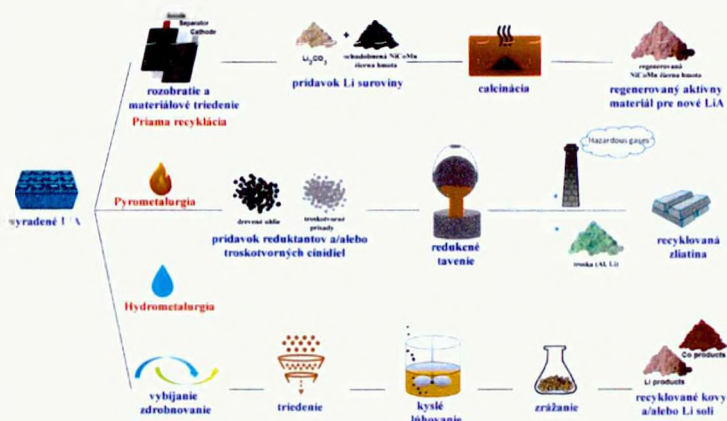
Na rozdiel od anódy je zloženie katódy viac komplikované vzhľadom na vodivé zložky ako sadza a spojivo PVDF, rozdielne chemické zloženie katódového aktívneho materiálu, čo je zapríčinené výrobnými postupmi a materiálmi jednotlivých výrobcov. Ako katódové aktívne materiály sa používajú lítiumkobalt oxid LiCoO_2 (LCO), lítiummangan oxid LiMn_2O_4 (LMO), lítiumnikelmangánkobalt oxid $\text{LiNi}_x\text{MnyCo}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC), lítiumnikelkobaltaluminium oxid $\text{LiNixCoyAl}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NCA) a lítiumželezofosfát LiFePO_4 (LFP) [30]. Tieto rozdiely sú dané zvyčajne použitím jednotlivých článkov do jednotlivých zariadení, ako smartfóny, laptopy, kamery, atď., z čoho aj vyplývajú ich vlastnosti a spätné výrobné náklady.

Pre EV a HEV segment sú zvyčajne určené NMC katódy. Mávajú rôznu stechiometriu, pohybujúcu sa v rozmedzí $\text{LiNi}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{O}_2$ a $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.3}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ až $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ a $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ s cieľom dosiahnuť rôzne vlastnosti LiA [31].

Zloženie LiA naznačuje možnosti získania cenných zložiek recykláciou tejto druhotnej suroviny. Recyklácia umožňuje získať cenné nedostatkové kovy, čím sa šetria primárne suroviny [32, 33].

Na základe publikovaných experimentálnych štúdií sa ukazuje, že recyklačné procesy vyradených LiA začínajú predspracovaním pomocou fyzikálno – mechanických úpravárenských postupov. Tieto zahŕňajú vybijanie zvyškových napätí, demontáž, zdrobňovanie a triedenie najmä čistých zložiek, ktoré sa v LiA nachádzajú ako súčasti kompozitnej konštrukcie. Ďalším krokom je aplikácia fyzikálno – chemických alebo chemických procesov ako tepelné alebo hydrometalurgické postupy [34, 35].

Obr. 4.2 schematicky zobrazuje obecnú postupnosť priemyselného spracovania vyradených LiA, realizovanú v súčasnosti v spoločnostiach OnTo, Umicore a Recupyl v ich recyklačných procesoch [36].

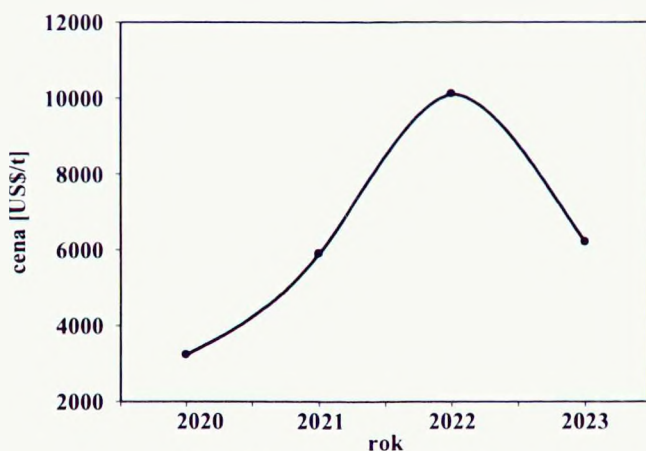


Obr. 4.2 Priemyselné spracovanie vyradených LiA v súčasnosti [36]

Historicky sa recyklačné metódy LiA vyvíjali sprvu cestou mechanického spracovania, kde vo výsledky bola snaha získať elementárnu meď, elementárny hliník a prípadne plasty. Z tohto hľadiska sa jednalo o pomerne jednoduché procesy s koncovkou, v ktorej sa meď a hliník získali vysokoteplotnými taviacimi procesmi. Bolo však jasné, že je potrebné získať aj obzvlášť cenné zložky, ako lítium, kobalt, nikel, najmä preto, že ich cena dramaticky rastie, tak, ako to zobrazuje tab. 4.2, z ktorej vyplýva, že ceny kovov v poslednom období dramaticky stúpili, v priemere až o 100, prípadne aj viac percent voči roku 2020 [37]. Uvedené údaje reflektujú vzrast sledovaných komodít, najmä kovov, čo bolo dané celosvetovou recesiou a ekonomickou krízou a v roku 2022 dosiahla cena LiA odpadu, prepočítaná na čisté kovy viac, ako trojnásobnú cenu ako v roku 2020. Nepochybne, to bola zaujímavá motivácia pre potenciálnych recyklátorov. V súčasnosti (apríl 2023) ceny klesajú a dostali sa na úroveň roku 2021, čo však je stále zaujímavá cenová úroveň. Obrázok 4.3 graficky zobrazuje priebeh cien LiA odpadu za posledné obdobie.

Tab. 4.2 Materiálové zloženie LiA z hľadiska cien jednotlivých zložiek

Zložka	Zastúpenie zložky [%]	2020		2021		2022		2023	
		Cena zložky [US\$/t]	Cena zložky v LiA [US\$/t]	Cena zložky [US\$/t]	Cena zložky v LiA [US\$/t]	Cena zložky [US\$/t]	Cena zložky v LiA [US\$/t]	Cena zložky [US\$/t]	Cena zložky v LiA [US\$/t]
lítium (Li_2CO_3)	1(5.32)	8000	426	24800	1319	80250	4269	49100	2455
kobalt	3	33965	1019	55755	1673	82000	2460	34500	1035
meď	9	6810	613	9860	887	10200	918	9080	817
hliník	35	1744	610	3076	1077	3214	1125	2356	825
nikel	3	14554	437	19825	595	32445	973	24165	725
mangán	3	1667	50	7520	226	7039	211	6440	193
grafit	8	500	40	970	78	1310	105	1400	112
ocel	9	295	27	445	40	510	46	418	38
plasty	11								
prchavé zložky	8								
elektronika	3								
kabeláž	2								
	spolu		3222		5895		10107		6200



Obr. 4.3 Vývoj ceny odpadu LiA

Vzhľadom na neustály dynamický vývoj v konštrukcii a zložení LiA sa recyklačné metódy pre spracovanie LiA optimalizujú pomerne obtiažne. Preto sa neustále skúma na možnostiach pyrometalurgickej, ako aj hydrometalurgickej recyklácie LiA v laboratórnom, ako aj poloprevádzkovom a priemyselnom meradle [38 – 40]. V oboch prípadoch sa zaraduje do procesu fyzikálno-mechanická predúprava vyradených LiA [39].

Hoci sú vyradené LiA formálne zaradené v Katalógu odpadov [41] medzi ostatný odpad, potenciálne predstavujú nebezpečný odpad kvôli výbušnosti, horľavosti, malým rozmerom častíc a toxicite ich niektorých zložiek. V súčasnosti je procese tvorby a schvaľovania nové

Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady o o batériách a použitých batériách, o zrušení smernice 2006/66/ES a o zmene nariadenia (EÚ) 2019/1020 [42], ktoré by malo riešiť niektoré sporné otázky.

V každom prípade je recyklácia vyradených LiA potenciálne environmentálne nebezpečný ako aj finančne nákladný proces [43].

4.2 Experimentálna časť

Pred samotným postupom recyklácie je nutné vziať do úvahy fakt, že samotné elektrické články v EV alebo HEV automobile sú konštrukčne riešené v troch skupinách ako samotný elektrický článok, akumulátorový modul a akumulátorová jednotka tak, ako to popisuje tab. 4.3.

Tab. 4.3 Členenie akumulátorov do automobilovej hnacej jednotky

Klasifikácia	Definícia	Pohl'ad
akumulátorový článok [44]	Základná jednotka LiA, vyvíjajúca elektrickú energiu nabíjaním a vybíjaním. Vyrobená je z katódy, anódy, separátorov a elektrolytu vložených do obdĺžnikového hliníkového puzdra.	
akumulátorový modul [45]	Akumulátorový komplet vložený do rámu v presne stanovenom množstve z dôvodov ochrany článkov pred vonkajšími otrasmí, vibráciami, alebo tepelnými šokmi	
akumulátorová jednotka [46]	Koncový tvar akumulátorového systému inštalovaného do EV/HEV. Je zložená z modulov a rôznych riadiacich a ochranných systémov zahrňujúcich elektronickú kontrolu, chladenie a pod. Zvyčajne obsahuje 8 modulov po 12 článkoch v jednom akumulátore	

Zastúpenie jednotlivých materiálov v jednotlivých akumulátorových segmentoch je týmto rôzne, keďže čím je jednotlivý segment mohutnejší, tým viac obsahuje ďalších zariadení. Rozdielne množstvá zložiek v LiA vyplývajú z toho, že samotné články sú umiestnené do puzdier, obalov a pod. a zároveň sú prítomné ďalšie elektronické riadiace a ochranné zariadenia.

Uvedená skutočnosť významne ovplyvňuje ekonomické kalkulácie recyklátorov jednak z hľadiska investičných a prevádzkových nákladov vzhľadom na veľkosť spracovávaných jednotiek a jednak z hľadiska predpokladaných výťažností a účinnosti recyklačných procesov.

Z tohto hľadiska sa v obecnosti využívajú nasledovné postupy spracovania vyradených LiA, resp. ich kombinácia:

- fyzikálne – mechanická predúprava
- pyrometalurgické spracovanie
- pyro – hydrometalurgické spracovanie
- hydrometalurgické spracovanie

Toto poradie platí aj historicky – spočiatku bol záujem získať čisté kovy meď, hliník, železo a keďže tieto sa nachádzajú v LiA v elementárnej forme, stačilo aplikovať fyzikálne – mechanické úpravnicke postupy a následne čisté kovy po miernej úprave (lisovanie, briketovanie) pretaviť. Zvyšok sa však strácal do odpadu. Tento zvyšok však obsahuje veľmi cenné zložky (Li, Co, Cr, atď.), ktoré sú väčšinou vzhľadom na formu ich prítomnosti aj nebezpečného charakteru. Preto sa postupne ruka v ruku s postupom vedeckého výskumu začali uplatňovať viac sofistikované pyro-hydrometalurgické a hydrometalurgické metódy ich spracovania, resp. spracovania zvyškov po fyzikálno-mechanickej úprave s cieľom získať tieto cenné zložky.

Tab. 4.1 dokumentuje chronologický vývoj skúmania možnosti materiálovej recyklácie vyradených LiA pre celú dobu riešenia tohto projektu s jednotlivými etapami riešenia. Okruhy riešenia v časovej osi projektu sa zaoberali s teoretickým štúdiom, materiálovou analýzou, vybijaním zvyškových napätí, laboratórnym a poloprevádzkovým riešením materiálovej recyklácie LiA. V prvej fáze sa riešili možnosti recyklácie a získavania užitočných zložiek, najmä kovov hliníku, medi, železa v elementárnej forme a tiež aktívnej čiernej hmoty a plastov, obsiahnutých v LiA. Tieto kovy sa v LiA vyskytujú v istom množstve, tab. 4.2, čo na základe bežnej ekonomickej analýzy evokuje možný zisk. Tieto sa recyklujú na báze relatívne jednoduchých recyklačných postupov.

Vyradené LiA však obsahujú aj cenné kovové zložky v podobe ich komplexných zlúčenín v katódovej, anódovej hmoty alebo elektrolytu. Sú to najmä lítium, kobalt, nikel, mangan, ale tiež grafit. Cena týchto zložiek v čistej forme preyšuje ceny medi, hliníku, železa, atď. a preto je nutné ich recyklovať a získať.

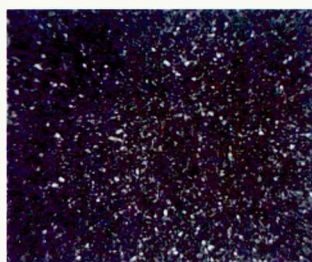
Preto bolo hlavným zameraním riešenia tohto projektu v poslednom roku riešenia zameranie sa na spracovanie čiernej hmoty, ale hlavne návrh komplexného spracovania vyradených LiA v slovenských podmienkach.

Po vybití zvyškových napätí sa vyradené LiA rozdrvili a vzniknutá zmes sa podrobila sitovaniu. Jednotlivé získané zmitostné frakcie boli aj na prvý pohľad rozdielne. Aj prostým okom možno v zmesi rozpoznať prítomnosť medených a hliníkových častíc, ako aj plastov a čiernej hmoty. Pri podrobnejšom skúmaní optickou mikroskopiou, obr. 4.4, môže vyplývať prítomnosť zlatočervených častíc, ktoré sú reprezentované meďou, sivých až čiernych častíc, ktoré sú reprezentované buď hliníkom, alebo plastom zo separátorov, oboje znečistené čiernou hmotou a samotnej čiernej hmoty, ktorá je koncentrovaná do drobných zmitostí. Zároveň vidno distribúciu týchto častíc do jednotlivých zmitostných tried. Meď sa prevažne koncentrovala do

zrnitostnej triedy +1 –2 mm, hliník do triedy +2 –4 mm a separátory do triedy +4 mm. Hliník a separátory sú však pravdepodobne premiešané a smerom k väčším časticiam je v zmesi viac separátorov.

Najjemnejšie častice sú tvorené opticky čiernou hmotou a nebolo možné zjavne určiť ich formu. Preto sa podrobili difrakčnej fázovej analýze.

Rtg difrakčná fázová analýza preukázala prítomnosť grafitu a LiNiO_2 , čo vlastne reprezentuje anódovú a katódovú čiernu hmotu, obr. 4.5. Ukázalo sa, že “čierna hmota” nie je jednotný materiál. Fázová analýza poukázala na prítomnosť fáz uhlíku, LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , resp. komplexného LiNiMn oxidu.



-0.125 +0 mm



-0.25 +0.125 mm



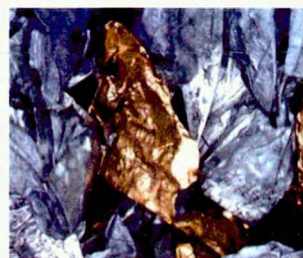
-0.5 +0.25 mm



-1.0 +0.5 mm



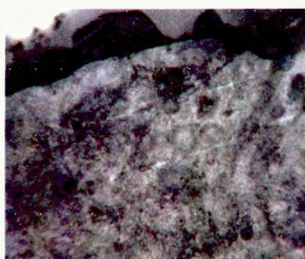
-2 +1 mm



-4 +2 mm

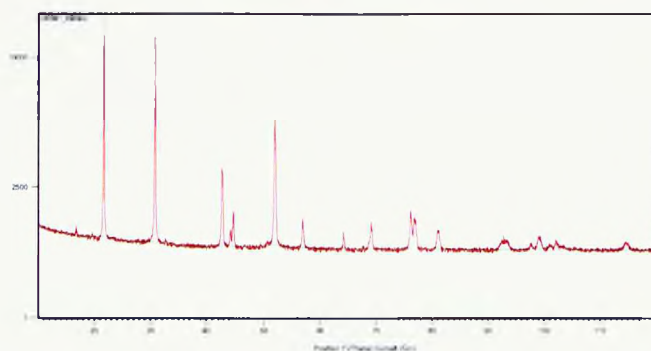


-6.3 +4 mm



+6.3 mm

Obr. 4.4 Detailný pohľad na zrnitostné frakcie pri zväčšení 50x



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula
01-088-1606	Lithium Nickel Oxide	Li _{0.65} Ni _{1.08} O ₂
00-041-1487	Carbon	C
01-082-0322	Lithium Manganese Oxide	Li _{0.82} (Mn _{1.7} Li _{0.3}) O ₄
96-153-3789	Li ((Mn _{1.5} (Ni _{0.44} Li _{0.06})) O ₄)	Ni _{3.48} Mn _{12.00} Li _{8.52} O _{32.00}

Obr. 4.5 Rtg difrakčná fázová analýza čiernej hmoty

Na základe rozdielnych memných hmotností základných zložiek medi, hliníku, čiernej hmoty a plastových separátorov sa experimentálne pomocou gravitačného triedenia tieto od seba oddelili. Relatívne ľahký hliník sa koncentruje do ľahkej frakcie a ťažšia meď do ťažších frakcií. Vzájomné oddelenie hliníka a medi možno dosiahnuť s vysokou účinnosťou. Separátory sú veľmi ľahké a oddelili sa do najľahších frakcií.

Aktívna čierna hmota je dvoch druhov, anódová a katódová. Počas rozdrúžovania sa ukázalo, že anódová hmota, reprezentovaná grafitom, sa oddeľuje od kovového nosiča ľahko, kdežto katódová hmota, reprezentovaná komplexnými oxidmi lítia, sa na hliníkovej katóde drží veľmi pevne a oddeľuje sa veľmi ťažko, alebo vôbec.

Celkový pohľad na všetky produkty triedenia drviny LiA gravitačným rozdrúžovaním sú zobrazené na obr. 4.6.



Cu koncentrát



Al koncentrát



čierna aktívna hmota



separátory

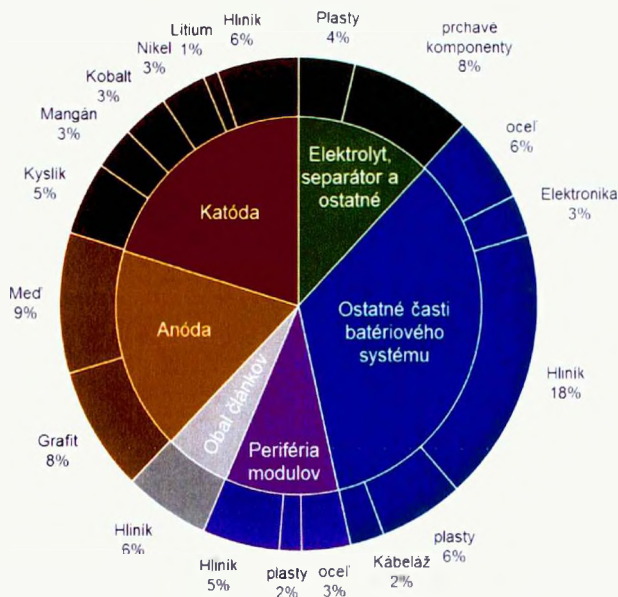
Obr. 4.6 Produkty experimentálneho triedenia drviny LiA

Popísanými postupmi sa získali kovové zložky LiA, reprezentované hliníkom a meďou v kovovej forme, plastu zo separátorov a čierna hmota o pomerne vysokej čistote.

Získané materiály, kovová meď, kovový hliník, plast a čierna hmota sú z hľadiska funkcionality konštrukčnými materiálmi v LiA, plniace úlohu prúdových zberačov, separátorov a samotných elektród anódy a katódy. Avšak prvkové a fázové zloženie LiA, obr. 4.7, poukazuje na prítomnosť ďalších prvkov v podobe zlúčenín ako nikel, kobalt, mangán, ale tiež titán, kremík, cín, uhlík a možné iné, ktorých prítomnosť v LiA je nutná z hľadiska priebehu vyžadovaných chemických reakcií. Táto rozmanitosť je daná viacerými vplyvmi. V prvom rade je to zapríčinené dynamickým vývojom, kedy sa skúmali a skúmajú rôzne materiály aby sa našlo čo možno najvýhodnejšie zloženie z hľadiska funkčnosti LiA a z tohto hľadiska je modernizácia s cieľom dosiahnutia vyššej úrovne proces veľmi rýchly reprezentovaný rýchlou obmenou LiA v zariadeniach.

Ďalším dôvodom je stále vysoká cena LiA a v snahe podriadiť sa komerčným požiadavkám sa zamieňajú materiály za lacnejšie, avšak to súvisí s nižším výkonom, nižšou elektrickou kapacitou, nižšou životnosťou a aj často aj nižšou bezpečnosťou.

Iným hľadiskom je koncové určenie LiA. Z tohto hľadiska sa LiA líšia, pokiaľ sa uvažujú pre použitie v EV, alebo v HEV, prípadne v mobilných telefónoch, laptopoch, fotoaparátach, t.j. celkovo v spotrebnej elektronike.



Obr. 4.7 Materiálové zloženie automobilového LiA

Jednotlivé zlúčeniny, resp. soli sú súčasťou katódovej a anódovej hmoty, prípadne elektrolytu. tab. 4.4.

Tab. 4.4 Najčastejšie chemické látky obsiahnuté v LiA

	sol'
katóda	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, LiNiCoAlO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiCoO_2
anóda	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, grafit, tvrdý uhlík, Sn-C zliatina, Si-C

Tieto zlúčeniny sú v LiA prítomné v rôznych množstvách a aj v rôznej forme. V čistej forme majú rôzne, seba typické vlastnosti, ako body odparovania, topenia a tavenia, reaktivitu, rozpustnosť v rôznych rozpúšťadlách a podobne. Ich získanie prostými mechanickými alebo fyzikálnymi metódami nie je možné. Dokonca lítium, alebo fosfor sú v elementárnej forme na vzduchu nestabilné a extrémne reaktívne.

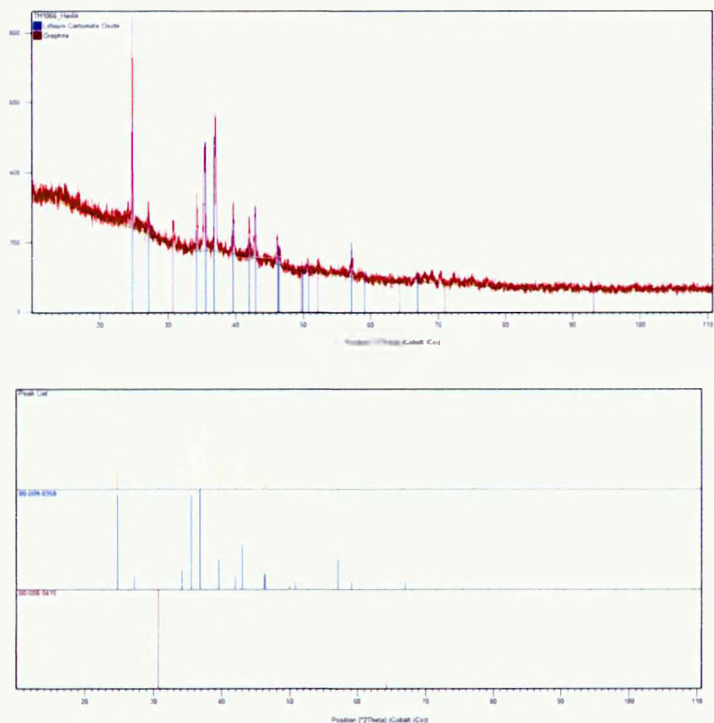
Preto sa v poslednej etape projektu skúmali možnosti získania najmä lítia, kobaltu, niklu a tiež uhlíka pre opätovné komerčné použitie.

V predchádzajúcich prácach sa študovali možnosti fyzikálno-mechanického spracovania vyradených LiA, pričom v navrhutej schéme spracovania bol zaradený krok drvenia LiA, pričom drvina priamo padala do vody, aby sa zabránilo vzplanutiu a horeniu. Pomerne prekvapivým bolo zistenie, že táto voda vykazovala vysoké hodnoty pH na úrovni $\text{pH} = 13$ a viac. To znamenalo, že časť litných solí bolo ľahko rozpustných vo vode a prešlo do disociovaného stavu. Zjednodušený zápis reakcií je nasledovný



Filtrát sa odfiltroval a homogénny priezračný roztok sa odparil a zahustil. Po zahutnení a odparení alkalického roztoku ostal tuhý zvyšok, ktorý sa podrobil rtg difrakčnej fázovej analýze, obr. 4.8.

Výsledkom je zistenie, že tuhý zvyšok je tvorený uhličitanom lítnym s malou prímесou uhlíka s čiernej hmoty. Keďže hydroxid, ale aj oxid lítny, sú veľmi relatívne látky, po odstránení vody prebehla okamžite reakcia so vzdušným oxidom uhličitým za vzniku uhličitanu lítneho



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula
00-009-0359	Lithium Carbonate	Li_2CO_3
00-008-0415	Oxide Carbon	C

Obr. 4.8 Výsledok rtg difrakčnej fázovej analýzy tuhého zvyšku po odparení vody

Lítium však do vodného roztoku neprechádza kvantitatívne, pravdepodobne sa vylúhuje len časť lítia z nestechiometrických zlúčenín lítia v LiA. Toto je premenlivé množstvo a závisí od stavu nabitia/vybitia v aktuálnom elektrickom článku. Zvyšok nerozpustného lítia ostáva v čiernej hmote a je potrebné získať ho inou cestou.

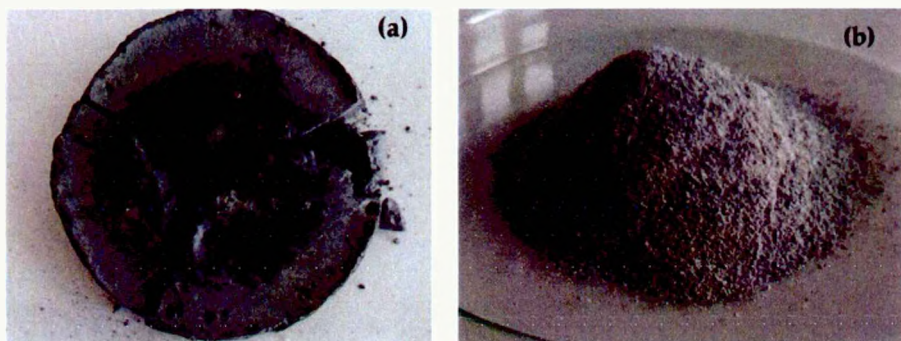
Tab. 4.6 Chemická analýza trosky z jednotlivých pokusov tavenia v EOP

experiment číslo	zloženie [hm%]								
	Li	Cu	Co	Ni	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₄
	analytické metódy: ICP-OES, spaľovanie, XRF								
1	5.53	0.23	0.09	0.01	0.029	56.2	22.0	0.52	2.25
2	5.18	1.4	1.44	0.05	0.035	53.4	20.2	2.25	2.23
3	5.84	0.39	0.41	0.05	0.120	49.7	27.1	0.67	1.69
4	6.24	0.40	0.25	0.03	0.285	46.5	30.2	0.22	0.84
5	6.77	0.35	0.07	0.01	0.238	43.1	32.2	0.31	2.12
6	7.40	0.10	0.06	0.01	0.184	41.8	33.4	0.14	0.70

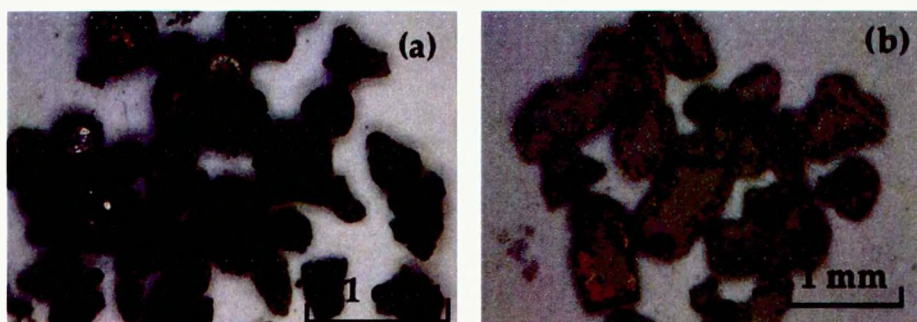
Tab. 4.7 Chemická analýza zliatiny z tavenia v EOP

prvok [hm%]	Cu	Co	Ni	Fe	Mn	Si	Li
	66.1- 65.0	20.2- 19.9	2.83- 2.68	8.05- 7.69	0.58- 0.55	3.18- 3.10	0.074- 0.070

Získaná troska po tavení v EOP sa podrivila a pomlela, obr. 4.9. Pomletá vzorka sa podrobila magnetickému triedeniu s cieľom zníženia obsahu kovových nečistôt s obsahom kobaltu, medi, niklu a železa v Li troske, obr. 4.10.



Obr. 4.9 Li troska z EOP: a) pred mechanickou predúpravou, b) po mechanickej predúprave (drvenie, mletie, magnetické triedenie, preosievanie)



Obr. 4.10 Kovové zložky získané magnetickým triedením Li trosky a) po drvení, b) po mletí

Chemické zloženie Li trosky a trosky po mechanickej predúprave je uvedené v tab. 4.8.

Tab. 4.8 Chemické zloženie Li trosky a trosky po mechanickej predúprave

	Li	Co	Cu	Al	Fe	Si	Ca	Ni	Mn
Li troska	6.8	1.17	1.53	16.52	0.51	48.62	1.16	0.15	0.65
demetalizovaná Li troska	6.96	0	0.11	16.40	0.20	51.10	1.26	0.01	0.88

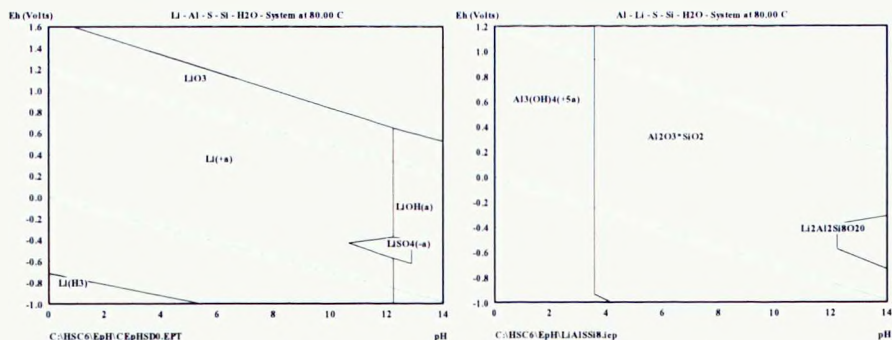
Rtg difrakčná fázová analýza tejto trosky preukázala prítomnosť fáz LiAlSiO_4 and Li_2SiO_3 . Ďalšie fázy s obsahom SiO_2 neboli identifikované difrakčnou analýzou, čo znamená, že nadmerné množstvo SiO_2 v troske je prítomné v amorfnej forme ako $\text{SiO}_{2(\text{am})}$.

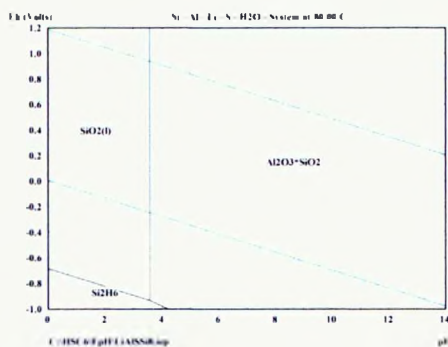
Tab. 4.9 zobrazuje potenciálne možné reakcie identifikovaných Li fáz pri reakcii s kyselinou sirovou a hodnoty zmien štandardnej Gibbsovej energie pri teplote 20°C a 80°C , t.j. teploty okolia a teploty lúhovania. Z výsledkov jednoznačne vyplýva, že tieto reakcie sú termodynamicky možné, pričom najväčšiu pravdepodobnosť vykazujú reakcie (5),(6).

Tab. 4.9 Potenciálne lúhovacie reakcie troskovej fázy v H_2SO_4 a hodnoty zmien štandardnej Gibbsovej energie [48].

reakcia		$\Delta G_{293.15}^\circ$ [kJ]	$\Delta G_{353.15}^\circ$ [kJ]
4	$2 \text{LiAlSiO}_4 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_4\text{SiO}_4$	-274.727	-267.444
5	$2 \text{LiAlSiO}_4 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_2\text{SiO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-300.098	-295.187
6	$2 \text{LiAlSiO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-302.950	-295.722
7	$2 \text{LiAlSi}_2\text{O}_6 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4 + 4 \text{H}_2\text{O} = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4$	-216.581	-211.165
8	$\text{Li}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3$	-151.744	-141.622
9	$\text{Li}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$	-152.092	-142.666

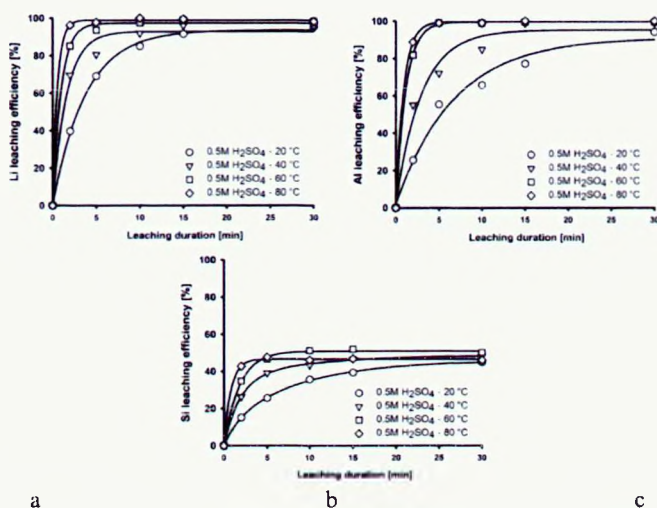
Na obr. 4.11 sú zobrazené E-pH diagramy pre systémy Li-Al-S-Si-H₂O, Al-Li-S-Si-H₂O a Si-Al-Li-S-H₂O. Termodynamická analýza potvrdila prítomnosť lítia ako Li^+ iónu pri kyslom lúhovaní. Hliník a kremík sú termodynamicky stabilné aj v iónovej forme hodnotách $\text{pH} > 4$. $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ pri 80°C precipituje. Podľa reakcií (4), (5) a (6) sú prítomné vo výluhu tri kremíkové fázy (SiO_2 , H_2SiO_3 a H_4SiO_4) a termodynamicky najstabilnejšia je fáza H_4SiO_4 .





Obr. 4.11 E-pH diagramy pre systémy Li-Al-S-Si-H₂O, Al-Li-S-Si-H₂O a Si-Al-Li-S-H₂O pri 80 °C

Pre hydrometalurgické spracovanie sa na základe predbežných úvah a systémovej analýzy zvolilo priame kyslé lúhovanie vo vodnom roztoku kyseliny sírovej pri zvolených podmienkach koncentrácie kyseliny, teploty a doby. Obr. 4.12 zobrazuje typický priebeh kinetických lúhovacích kriviek v roztoku kyseliny sírovej.



a

b

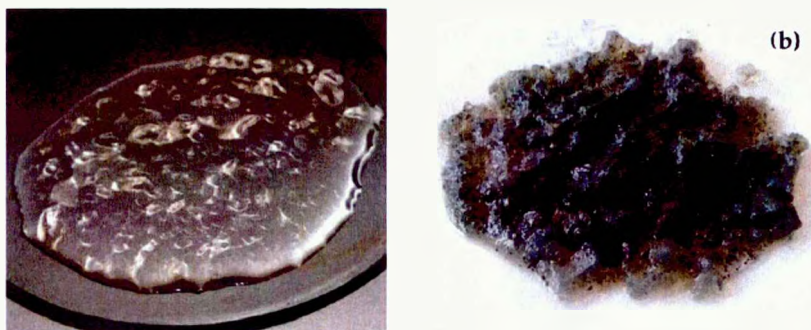
c

Obr. 4.12 Kinetické krivky vylúhovania a) lítia, b) hliníka, c) kremíka v 0.5 M H₂SO₄ v teplotnom rozsahu 20 – 80 °C

Lítium je najžiadanejším prvkom z recyklácie LiA. Z tohto hľadiska sa dosiahla vysoká účinnosť vylúhovania lítia, takmer 100 %, už po 30 minútach lúhovania dokonca aj pri teplote okolia, pričom koncentrácia H₂SO₄ nevyplýva na tento proces. So zvyšovaním teploty lúhovania sa proces urýchľuje a teda doba sa znižuje.

Okrem lítia sa študovalo aj vylúhovanie hliníka a kremíka, keďže sú prítomné v pomerne vysokom množstve a v spoločných fázach s lítiom. Z hľadiska hliníka sa mierne zvyšuje jeho výtlačnosť so zvyšovaním koncentrácie kyseliny, ale aj so zvyšovaním teploty. Kremík sa lúhuje s účinnosťou až 50 %. To zodpovedá stechiometrickým výpočtom, podľa ktorých približne 50 % kremíka je prítomných vo fáze LiAlSiO₄, ktorá je vylúhovateľná v H₂SO₄, a približne 50 % v SiO₂ fáze, ktorá sa ale H₂SO₄ nelúhuje. Z termodynamického hľadiska najpravdepodobnejšie

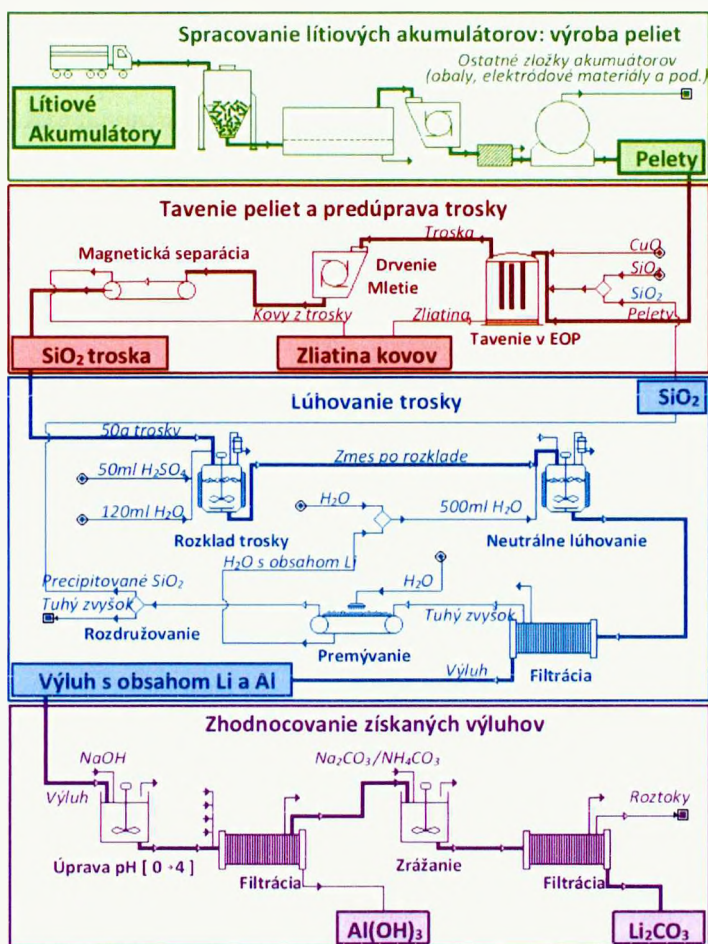
dochádza k lúhovaniu podľa rovníc (4) a (9) za vzniku kyseliny ortokremičitej H_4SiO_4 . Pri zmene teploty lúhovania sa mení vylúhovateľnosť Si, čo môže súvisieť s tým, že okrem reakcie (4) prebieha aj reakcia (6) v ktorom namiesto H_4SiO_4 vzniká tuhý SiO_2 a H_2O . Prakticky to znamená, že technicky vzniká vo výsledku v podstate tuhá gélovitá látka, obr. 4.13, čím sa proces zastavil, znemožnil sa odber vzorky a experiment skrachoval.



Obr. 4.13 Gélové agregáty prítomné v roztokoch po priamom vylúhovaní Li trosky: (a) vytvorené po filtrácii lúhovacieho zvyšku; b) vytvorené pred filtráciou so zachytenými zvyškami lúhovania

Z tohto dôvodu sa namiesto klasického kyslého lúhovania v kyseline sírovej zvolil spôsob v ktorom sa troska chemicky rozložila a následne neutrálne lúhovala vo vode. K chemickému rozkladu sa použilo 50 g trosky a koncentrovaná H_2SO_4 . Následne sa pridala destilovaná voda, čo spôsobí prudkú exotermickú reakciu, rozklad prítomných fáz a precipitáciu vylúhovaného kremika zo vzniknutej kyseliny kremičitej vo forme $SiO_{2(am)}$. Po rozklade sa zmes lúhovala vo vode za stáleho miešania bez nutnosti ohrevu. Uvedeným spôsobom sa získal roztok s vysokým obsahom litia s účinnosťou lúhovania Li nad 90 % a hliníka s účinnosťou lúhovania Al nad 70% a s nízkym obsahom kremika s účinnosťou lúhovania Si do 10 %. Po prefiltrovaní a oddelení roztoku sa tuhý zvyšok premyl vo vode, pričom sa do roztoku previedlo ďalších 8 % litia. Lúhovaním a následným premývaním tuhého zvyšku je teda možné z trosky vylúhovať 98 % litia. Roztok z premývania trosky sa opätovne použije v ďalšom neutrálnom lúhovaní. Vyzrážaný SiO_2 je možné gravitačne oddeliť od tuhého zvyšku po lúhovaní a možno ho samostatne zhodnotiť. Tuhý zvyšok po neutrálnom lúhovaní, premývaní a rozdrúžovaní by mal spĺňať podmienky pre jeho využitie v stavebníctve. Zo získaného roztoku sa odstráni hliník zrážaním s $NaOH$ pri $pH = 1 - 4$. Zrážanie hydroxidu lítneho sa realizuje až pri hodnotách $pH > 12$. Z toho dôvodu sa do roztoku pridáva uhličitan sodný alebo amónny, čo spôsobí zrážanie litia vo forme Li_2CO_3 . Následnou filtráciou a sušením sa získajú komerčné produkty $Al(OH)_3$ a Li_2CO_3 .

Na obr. 4.14 je zobrazená bloková schéma pyrometalurgického spracovania vyraďených LiA, resp. pyrometalurgického spracovania čiernej hmoty [49].



Obr. 4.14 Bloková schéma kombinovaného spôsobu spracovania čiernej hmoty

Iné cenné zložky obsiahnuté v LiA sú najmä kobalt a nikel. Tieto sa pri pyrometalurgickom spracovaní čiernej hmoty koncentrujú do kovovej zliatiny, tab. 4.7, obr. 4.10. Z hľadiska metalurgického tieto kovy aj spolu s meďou, prípadne železom, tvoria v zásade neobmedzené zliatiny, čo prakticky vylučuje pyrometalurgické rozdeľovanie na základe nejakých individuálnych vlastností týchto kovov. Možnými postupmi, prebratými s reálnej oblasti hutníctva neželezných kovov, sú hydrometalurgicko – elektrometalurgické postupy. Prakticky to znamená prevod zložiek danej zliatiny vylúhovaním jednotlivých kovov do roztoku za špecifických podmienok a ich následné selektívne získanie niektorým zo známych postupov, ako elektrolýza, kvapalinová extrakcia, iónová výmena, kryštalizácia a podobne.

Tieto postupy sú veľmi náročné a v podstate vyžadujú sofistikované metalurgické procesy a na to, aby boli ekonomicky prijateľné, je potrebné spracovávať veľké množstvá materiálov, čo recyklácia vyradených LiA nespĺňa.

Preto sa za účelom možného získania kobaltu, niklu a aj lítia v tomto prípade zvolilo priame lúhovanie čiernej hmoty [50].

Na základe termodynamického štúdia sa v tomto prípade určili hodnoty zmien štandardnej Gibbsovej energie ΔG° a vypočítali sa E-pH diagramy s cieľom určiť oblasti stability zlúčenín kobaltu a lítia v systémoch Co–S–H₂O a Li–S–H₂O. Hodnoty ΔG° sa počítali pre teplotu lúhovania rovnú 353 K, čiže 80 °C. Uvažovali sa nasledovné chemické rovnice vybraných zlúčenín kobaltu a lítia v kyseline sírovej.

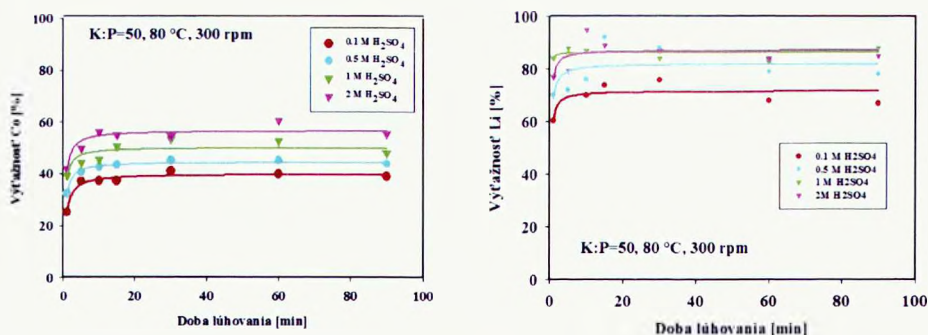
Tab. 4.10 Lúhovacie reakcie zložiek Co a Li v čiernej hmoty v H₂SO₄ a hodnoty zmien štandardnej Gibbsovej energie [48].

reakcia		$\Delta G^\circ_{353.15} \text{ [kJ]}$
10	$4 \text{ LiCoO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{SO}_4 = 2 \text{ Li}_2\text{SO}_4 + 4 \text{ CoSO}_4 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{O}_2$	-608.96
11	$\text{Li}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-306.69
12	$2 \text{ Co}_3\text{O}_4 + 6 \text{ H}_2\text{SO}_4 = 6 \text{ CoSO}_4 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{O}_2$	-188.42
13	$\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	-126.61
14	$\text{CoO} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CoSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-114.12
15	$2 \text{ Co}_2\text{O}_3 + 4 \text{ H}_2\text{SO}_4 = 4 \text{ CoSO}_4 + 4 \text{ H}_2\text{O} + \text{O}_2$	-94.17

Záporné hodnoty ΔG° určujú priebeh chemických reakcií zľava do prava. Čím je hodnota zápornejšia, tým je pravdepodobnosť priebehu tej ktorej reakcie vyššia.

Lúhovacie experimenty sa realizovali v laboratórnych podmienkach za použitia roztokov kyseliny sírovej o koncentráciách 0,1, 0,5, 1 a 2 M H₂SO₄ pri teplotách 20, 40, 60 a 80 °C, pričom najefektívnejšie výsledky sa dosiahli práve pri vyšších teplotách počas 90 minút lúhovania.

Dosiahnuté výsledky sú graficky znázornené na obr. 4.15. Výsledky ukazujú, že výťažnosť kobaltu pri lúhovaní v H₂SO₄ je nižšia, na úrovni 50–60 % a to v relatívne krátkom čase do 15 minút. Na rozdiel od kobaltu prebieha vylúhovanie lítia relatívne progresívne s vyššími extrakciami. Množstvo kobaltu prechádzajúceho do roztoku závisí od teploty a/alebo koncentrácie lúhovacieho činidla, ale po 15 minútach sa proces výrazne spomalil alebo zastavil. V prípade lítia sa dosiahli relatívne vysoké výťažnosti.



Obr. 4.15 Kinetické krivky vylúhovania kobaltu (vľavo) a lítia (vpravo) pri teplote lúhovania 80 °C a jednotlivé koncentrácie kyseliny sírovej

Ukázalo sa, že výťažnosť kobaltu do roztoku kyseliny sírovej je na nižšej úrovni, ako bola očakávaná. Z toho dôvodu sa pre nasledovné aktivity navrhlo využiť iné lúhovadlá, napr. roztok

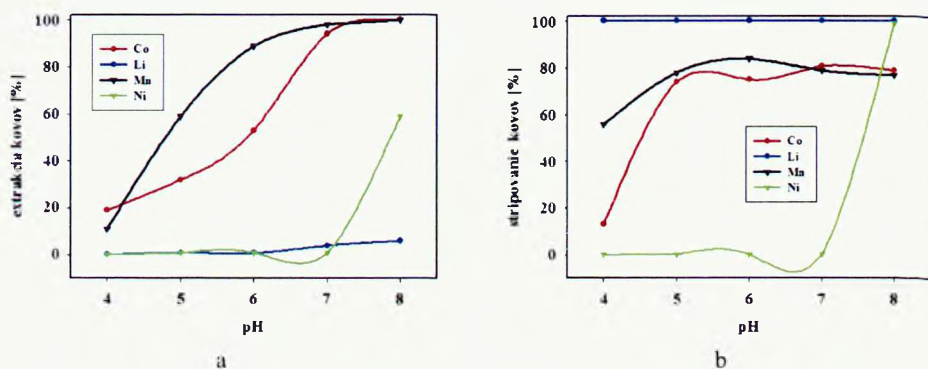
kyseliny chlorovodíkovej HCl. Zároveň existuje predpoklad, že s ďalším zvyšovaním teploty na úroveň blízko do bodu varu bude proces postupovať oveľa rýchlejšie.

Ďalším logickým krokom v postupe spracovania LiA je získanie kovov z roztoku pokiaľ možno selektívne. Ako už bolo spomenuté, kovy a teda aj kobalt a nikel možno selektívne získať z roztoku niektorým z postupov, ako elektrolýza, kvapalinová extrakcia, iónová výmena, kryštalizácia a podobne. Výber vhodného postupu závisí od samotných vlastností chcených kovov a ich vzájomnej príbuznosti, ich koncentrácie v roztoku, ceny a podobne. V tomto prípade sa zvolila cesta kvapalinovej extrakcie.

Práca sa zameriava na získavanie kobaltu z roztoku po lúhovaní čiernej hmoty z vyradených LiA v roztoku kyseliny sírovej metódou kvapalinovej extrakcie. Študoval sa vplyv pH na extrakciu, zrážanie a na pomer anorganickej ku organickej fáze. Zároveň sa študoval vplyv pomeru anorganickej ku organickej fáze pri extrakcii a pomer organickej ku anorganickej fáze pri stripovaní z roztoku boli študované.

Extrakcia sa realizovala pomocou 0.1 M roztoku extrakčného činidla Cyanex 272 pri 20 °C počas 15 minút pri pomere A:O=0.5. Stripovanie sa realizovalo do 2M roztoku H₂SO₄ pri 20 °C počas 10 minút pri pomere O:A=2

Typické výsledky extrakčných a stripovacích kriviek sú zobrazené na obr. 4.16.



Obr. 4.16 Vplyv pH na účinnosť a) extrakcie a b) stripovania Co, Li, Mn a Ni

Z výsledkov vyplývajú nasledovné skutočnosti [51]:

Účinnosť extrakcie a stripovania Co nie je rovnaká pri rovnakom pH. Preto je potrebné extrahovať pri pH = 7-8 a po úprave pH vykonať stripovanie pri pH = 6-7, čo poskytne efektívnejšie výsledky.

Ďalšou možnosťou je použitie koncentrovanejšieho stripovacieho činidla vyššie 2 M H₂SO₄. Nevýhodou však bude následné riedenie roztoku.

Z lúhovacieho roztoku spolu s kobaltom sa bude koextrahovať aj Mn, Ni a Li v závislosti od pH. Nikel ostane vo vodnom roztoku do pH < 8. Preto je optimálna hodnota pH = 7, pri ktorej sú účinnosti extrakcie Co = 90 % a Ni = 0 %.

Selektívna extrakcia Co z lúhovacieho roztoku po vylúhovaní čiernej hmoty LiA pomocou Cyanexu 272 je limitovaná prítomnosťou Mn, ktorý sa koextrahuje pri určitom pH spolu s Co a jeho extrakcia je dokonca vyššia ako extrakcia Co. Účinnosť extrakcie lítia je 0 - 10 %, takže pri vhodne zvolených podmienkach možno dosiahnuť selektívnu extrakciu Co a Li.

Pred samotnou extrakciou nie je nutné odstraňovať Ni a zároveň sa z roztoku Ni selektívne nestripuje, keďže extrakcia Ni je prakticky nulová do hodnôt pH = 8.

4.3 Záver

Problematika materiálovej recyklácie vyradených LiA je v súčasnosti zameraná dvoma smermi, ktoré sú určené najmä ekonomickými a tiež technologickými aspektmi. Výsledkom je filozofia, podľa ktorej sa cestou najmenšieho odporu zamerali recyklačné aktivity na získavanie kovovej medi, kovového hliníku, kovového železa, plastov a čiernej hmoty cestou fyzikálno – mechanickej recyklácie.

Vyradené LiA však obsahujú aj ďalšie zložky, najmä kovy v podobe zlúčenín, najmä Li, Co, Ni, Mn, Ti, grafit a pod., ktoré sú často nedostatkové a ich cena je vysoká, tab. 4.2, obr. 4.7. Preto sa záujem výskumníkov a recyklátorov postupne zameriava aj týmto smerom.

V rámci projektu UNIVNET bolo riešenie zamerané v rokoch 2019 – 2021 zamerané hlavne na fyzikálno – mechanickú recykláciu s cieľom získať Cu, Al, čiernu hmotu a plasty. Tieto postupy boli publikované vo výskumných správach za predošlé roky 2020 až 2023.

V roku 2022 sa riešenie zameralo hlavne na fyzikálno – chemické procesy spracovania čiernej hmoty s cieľom získania cenné zložky LiA z ich chemických zlúčenín takých ako Li, Co, Ni, Mn atď.

Spôsobov recyklácie je viacero a závisia od celkového kontextu problematiky. V tomto prípade sa riešila problematika cestou pyrometalurgického spracovania čiernej hmoty s následným hydrometalurgickým spracovaním trosky. Pri pyrolýze sa kovy Co, Ni, Cu, Fe skoncentrujú do zliatiny, kdežto lítium sa nakoncentruje do trosky. Troska sa lúhuje a jednotlivými krokmi sa získa finálny komerčný produkt Li_2CO_3 , obr. 4.14.

Ostatné záujmové kovy Co, Ni, Mn možno získať hydrometalurgickou cestou lúhovaním čiernej hmoty a následným selektívnym získavaním kovov z roztoku pomocou kvapalinovej extrakcie, čo sa potvrdilo experimentálne.

Pre budúcnosť sa otvára cesta riešenia získavania jednotlivých zložiek s vysokou pridanou hodnotou najmä cestou optimalizácie jednotlivých procesov a to v rámci základného výskumu, ako aj cestou aplikovaného výskumu.

V základnom výskume je potrebné zamerať sa na zvýšenie výťažnosti žiadaných kovov do roztoku cestou využitia ďalších lúhovacích médií. Vhodnými kandidátmi je najmä použitie oxidačných médií v prostredí kyseliny sírovej, alebo použitie roztokov kyseliny chlorovodíkovej a podobne. V rámci tohto okruhu je potrebné optimalizovať aj koncentračný rozsah navrhovaných médií.

Samostatnú kapitolu tvorí použitie aj zásaditých lúhovacích médií, ktoré doteraz v podstate vôbec nie sú diskutované ani v publikovaných výsledkoch. Prítom konkrétne kovy ako hliník a všeobecne ťažké kovy, teda aj meď, kobalt, nikel a podobne sú v zásadách dobre rozpustné.

Samozrejme, na to nadväzuje štúdium možností spracovania konkrétneho lúhovacieho roztoku, konkrétne optimalizáciou extrahentov, elektrolýzy a podobne.

V rámci aplikovaného výskumu je potom potrebné optimalizované výsledky základného výskumu otestovať v poloprevádzkovom a neskôr v prevádzkovom meradle. V takomto prípade je rozhodujúcim faktorom ekonomická analýza zahrňujúca najmä faktor investičných a prevádzkových nákladov a ich návratnosti. Je jasné, že aj základné rozhodovanie medzi základným smerovaním do pyrometalurgického, hydrometalurgického alebo kombinovaného spôsobu tvrdo závisí od infraštruktúry, energetických potrieb, logistiky, environmentálnych aspektov a podobne navrhnutých procesov.

Literatúra

- [1] <https://www.lithium-battery-factory.com/sk/automotive-lithium-ion-batteries/>
- [2] <https://www.mojelektromobil.sk/elektromobil-baterie-nie-je-ekologicky/>
- [3] Ekberg, C.; Guyomard, D.; Lestriez, B.; Novák, P.; Petranikova, M.; Porcher, W.; Trabesinger, S.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Zhang, H. Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. *J. Power Sources* 2020, 479, 228708
- [4] Kim, T.; Song, W.; Son, D.-Y.; Ono, L. K.; Qi, Y. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A* 2019, 7 (7), 2942–2964
- [5] The Nobel Prize. The Nobel Prize in Chemistry 2019 <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/summary/> (November 21, 2021).
- [6] Xie, J.; Lu, Y.-C. A retrospective on lithium-ion batteries. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1), 2499
- [7] Philippot, M.; Alvarez, G.; Ayerbe, E.; Van Mierlo, J.; Messagie, M. Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs. *Batteries* 2019, 5 (1), 23
- [8] Notter, D. A.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Stamp, A.; Zah, R.; Althaus, H.-J. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44 (17), 6550–6556
- [9] Farjana, S. H.; Huda, N.; Mahmud, M. A. P. Life cycle assessment of cobalt extraction process. *Journal of Sustainable Mining* 2019, 18 (3), 150–161
- [10] Kaunda, R. B. Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of Energy & Natural Resources Law* 2020, 38 (3), 237–244
- [11] USGS. Cobalt; 2019. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cobalt.pdf>. October 2021
- [12] USGS. Graphite (Natural); 2021. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-graphite.pdf>, October 2021
- [13] Odolnosť v oblasti kritických surovín: zmapovanie cesty k väčšej bezpečnosti a udržateľnosti. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>
- [14] Number of plug-in cars climbs to 5.6M worldwide; [electrive.com](https://www.electrive.com/2019/02/11/the-number-of-evs-climbs-to-5-6-million-worldwide/); 2019. <https://www.electrive.com/2019/02/11/the-number-of-evs-climbs-to-5-6-million-worldwide/> November 2021
- [15] BloombergNEF. Electric Vehicle Outlook 2021; 2021. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>, November 2021
- [16] <https://autobild.pluska.sk/novinky/slovensku-jazdi-iba-9-500-elektromobilov-podpore-e-mobility-nas-predbehlo-aj-bulharsko>
- [17] Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2006/66/ES, 6.9.2006 https://www.epi.sk/media/File/pdf/2006/299096f6-f710-4a98-bc12-38f7e2289243_pdf_DOC_1.pdf?attachment-filename=299096f6-f710-4a98-bc12-38f7e2289243_pdf_DOC_1.pdf
- [18] Proposal for a Regulation of the European parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020 <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf>

- [19] Stone, M. As electric vehicles take off, we'll need to recycle their batteries ; National Geographic ; 2021. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/electric-vehicles-takeoff-recycling-ev-batteries>. November 2021
- [20] Havlik, T., Miškuřová, A., Oráč, D.: Materiálová recyklácia kovonosných odpadov s obsahom definovaných nedostatkových kovov do predajných produktov, Stav a vízie zhodnocovania odpadov z automobilového priemyslu SR., 2020, SPEKTRUM STU Slovenská technická univerzita v Bratislave 2020, 285, ISBN 978-80-227-5039-4
- [21] Havlik, T., Miškuřová A., Oráč, D.: Materiálová recyklácia lítiových automobilových trakčných akumulátorov. Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle, Bratislava, SPEKTRUM STU, 2021, 120-143, ISBN 978-80-5533867-5
- [22] Havlik, T., Miškuřová A., Oráč, D.: Industrial recycling End-of-life Electric Vehicles Lithium-ion Batteries. In: Analysis of the State, Forecasts and New Technologies of Waste recovery in the Automotive Industry. RAM-Verlag, Germany, UNIVNET STU, 2021, 93-110, ISBN978-3-96595-008-5
- [23] Havlik, T., Miškuřová A., Oráč, D., Klimko, J.: Extraction of valuable components from the discarded lithium accumulators from electric vehicles. In: Smart technologies for waste processing from the automotive industry, 2022, 85-103, ISBN 978-3-96595-023-8
- [24] Zubi G., Dufo-Lopez R., Carvalho M., Pasaoglu G.: The lithium-ion battery: state of the art and future perspectives, Renew. Sustain. Energy Rev. 89 (2018) 292–308, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
- [25] Marcinek M. et al: Electrolytes for Li-ion transport - review, Solid State Ionics 276 (2015) 107–126, <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2015.02.006>
- [26] Herrmann C., Kara S., Kwade A., Diekmann J.: Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, 2018. <http://www.springer.com/series/10615>
- [27] Schroder R., Aydemir M., Seliger G.: Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells, Procedia Manuf. 8 (2017) 104–111, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.013>
- [28] Asenbauer J. et al: The success story of graphite as a lithium-ion anode material-fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites, Sustain. Energy Fuels 4 (2020) 5387–5416, <https://doi.org/10.1039/d0se00175a>
- [29] Ellis B.L., Lee K.T., Nazar L.F.: Positive electrode materials for Li-Ion and Li-batteries, Chem. Mater. 22 (2010) 691–714, <https://doi.org/10.1021/cm902696j>
- [30] Latini D. et al: A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling, Journal of Power Sources 546 (2022) 231979, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775322009594?via%3Dihub>
- [31] Harper G. et al: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature 2019, 575, 75–86. <https://doi.org/10.1038/S41586-019-1682-5>
- [32] Fan E. et al: Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. Chem. Rev. 2020, 120, 7020–7063. <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.9B00535>
- [33] Kim H.J. et al: A comprehensive review of li-ion battery materials and their recycling techniques. Electronics 2020, 9, 1161. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS9071161>
- [34] Kim S. et al: A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling. J. Clean. Prod. 2021, 294, 126329. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126329>
- [35] Metals and mining prices, <https://www.fastmarkets.com/our-products/price-data/metals-and-mining-prices>
- [36] Lithium-Ion Battery Recycling - Overview of Techniques and Trends, ACS Energy Lett. 2022, 7, 712–719

- [37] Metals and mining prices, <https://www.fastmarkets.com/our-products/price-data/metals-and-mining-prices>
- [38] Werner D., Peuker U.A., Mütze T.: Recycling chain for spent lithium-ion batteries. *Metals* (Basel) 2020, 10, 316. <https://doi.org/10.3390/MET10030316>
- [39] 15 Yun L. et al: Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 136, 198–208. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.04.025>
- [40] Or T. et al: Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. *Carbon Energy* 2020, 2, 6–43. <https://doi.org/10.1002/CEY2.29>
- [41] Vyhláška č. 365/2015 Z. z. Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky z 13. novembra 2015, ktorou sa ustanovuje Katalóg odpadov. <http://ekolamp.sk/wp-content/uploads/2016/06/vyhlaska-mzp-15-z365.pdf>
- [42] Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady o o batériách a použitých batériách, o zrušení smernice 2006/66/ES a o zmene nariadenia (EÚ) 2019/1020 https://www.epi.sk/media/File/pdf/2020/4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1_pdf_DOC_1.pdf?attachment-filename=4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1_pdf_DOC_1.pdf
- [43] Rahman A., Afroz R., Safrin M.: Recycling and disposal of lithium batteries: An economical and environmental approach. *IJUM Eng. J.* 2017, 18, 238–252. <https://doi.org/10.31436/IJUM.EJ.V18I2.773>
- [44] Cell & chemistry, <https://electricchaseaudi.net/technology/battery/cell/>
- [45] Stellantis and the CEA collaborate on EV battery modeling, <https://evpowered.co.uk/news/stellantis-and-the-cea-collaborate-on-ev-battery-modeling/>
- [46] Battery Taxonomy: The Differences between Hybrid and EV Batteries, <https://www.caranddriver.com/news/a15345397/battery-taxonomy-the-differences-between-hybrid-and-ev-batteries/>
- [47] Sommerfeld, M., Vonderstein, C., Dertmann, Ch., Klimko, J., Oráč, D., Miškuřová, A., Havlik, T., Friedrich, B.: A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 1: Production of Lithium Concentrates in an Electric Arc Furnace, *Metals*, 2020, 10, 1069; doi:10.3390/met10081069
- [48] Roine, A. HSC Chemistry Thermodynamic Software; Outotec: Pori, Finland, 2018
- [49] Klimko, J., Oráč, D., Miškuřová, A., Vonderstein, C., Dertmann, Ch., Sommerfeld, M., Friedrich, B., Havlik, T.: A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 2: Lithium Recovery from Li Enriched Slag – Thermodynamic Study, Kinetic Study and Dry Digestion, *Metals* 2020, 10, 1558; doi:10.3390/met10111558
- [50] Takáčová Z., Havlik T., Kukurugya F., Oráč D.: Cobalt and lithium recovery from active mass of spent Li-ion batteries: Theoretical and experimental approach, *Hydrometallurgy*, 163, 2016, 9-17
- [51] Takáčová Z., Marcišová S., Havlik T.: Solvent extraction of cobalt from leach liquor after leaching of the active mass of spent lithium accumulators, 2013. In: *Metall*, Vol. 67, no. 10(2013), p. 450-454, ISSN 0026-0746
- [52] European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, [imap://th311qc@mail.tuke.sk:143/fetch%3EUID%3E/INBOX%3E57179?part=1.2&file name=Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf&type=application/pdf](mailto:th311qc@mail.tuke.sk:143/fetch%3EUID%3E/INBOX%3E57179?part=1.2&file name=Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf&type=application/pdf)

Zhodnocovanie problémových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov



Riešiteľský kolektív:

Technická univerzita v Košiciach

Strojnícka fakulta

Ústav priemyselného inžinierstva, manažmentu, inžinierstva prostredia a aplikovanej
matematiky

Katedra riadenia podniku a inžinierstva prostredia

Hlavný riešiteľ:

Dr.h.c. mult. prof. Ing. Miroslav Badida, PhD.

Riešitelia:

doc. Ing. Lýdia Sobotová, PhD.

Ing. Marek Moravec, PhD.

Ing. Tibor Dzuro, PhD.

Ing. Miriama Piňosová, PhD.

Ing. Alžbeta Nováková, PhD.

Ing. Kristián Pástor

5 Zhodnocovanie problémových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov

5.1 Úvod

Každoročne viac ako 50 miliónov vozidiel na celom svete dosiahne koniec svojej životnosti. Posledných 15 rokov bolo realizovaných množstvo výskumov a vývoja na zvýšenie podielu recyklácie vozidiel po dobe ich životnosti, ktoré súvisí aj so zdokonaľovaním techník demontáže a zlepšovaním procesu zhodnocovania materiálov. Aby budúce vozidlá boli viac energeticky účinné, pri ich výrobe sa budú používať nové materiály, predovšetkým polyméry a ich kompozity, ktoré bude problematické recyklovať. Predpokladá sa teda, že sa budú vyžadovať nové technológie na zvýšenie podielu recyklácie týchto materiálov po dobe ich životnosti. Táto práca sa pokúša nájsť riešenie na recykláciu problematických materiálov z vozidiel po dobe životnosti z hľadiska efektivity získaných surovín, ich materiálového zloženia, ako aj technologickej náročnosti ich zhodnocovania a recyklácie. [1]

Rozvoj automobilového priemyslu v Slovenskej republike a v Európe je kľúčový pre celkový rozvoj a prosperitu spoločnosti. [15] Na Slovensku sa automobilový priemysel vďaka štyrom (v budúcnosti až piatim) výrobným závodom prepracoval na prvú priečku v rámci priemyslu. Na druhej strane sa to však spája aj s negatívami, ktoré sa spájajú so spotrebou automobilov a konvenčným prístupom k nakladaniu s týmito vozidlami po dobe ich životnosti. [2]

Z dôvodu zhodnotenia alebo znovu použitia materiálov, ktoré sa nachádzajú vo vozidlách po dobe ich životnosti boli vyvinuté rôzne spracovateľské a demontážne techniky. [1] Problém predstavujú materiály, pre ktoré neexistujú, alebo existujú iba v obmedzenom množstve technologické prevádzky na ich spracovanie a je potrebné zamerať sa na ich zhodnocovanie so zreteľom na aplikáciu do nových materiálov a uplatnení vzniknutých recyklátov, napríklad do zvukovo a tepelno izolačných produktov, čím by sa mohla zlepšiť kvalita životného prostredia a ochrana jeho jednotlivých zložiek.

Riešitelia výskumného projektu sa vo svojej práci zamerali na vytypovanie problémových materiálov z hľadiska ich ďalšieho zhodnocovania z automobilov po dobe ich životnosti, na návrh metodiky merania akustických deskriptorov sypaných materiálov, na výskum vybraných akustických deskriptorov vytypovaných kompaktných a sypaných materiálov, na vývoj a výrobu prípravkov a zariadenia pre potreby merania akustických deskriptorov sypaných materiálov, na návrh metodiky merania sypaných materiálov, na rozsiahlu experimentálnu časť zameranú na výskum akustických deskriptorov vybraných problémových materiálov z hľadiska ich zhodnocovania (v kompaktnej a sypanej forme) ako aj na vyhodnotenie vykonaných experimentov s využitím regresnej a korelačnej analýzy a predikciu využitia sypaných materiálov do zvukovo a tepelno izolačných produktov. [1]

5.2 Špecifikácia potenciálne problémových komponentov (materiálov) vozidiel po dobe ich životnosti

Analyzovanie procesov, ktoré vychádzajú z recyklácie vozidiel po dobe životnosti a hodnotenie stavu zhodnocovania a spracovania odpadov z vozidiel po dobe životnosti je dôležité z hľadiska vytvorenia počiatočnej bázy informácií o materiáloch. [13] Tieto informácie sú nevyhnutné pre ďalšie výskumné aktivity, ktoré sú smerované k hľadaniu nových techník zhodnocovania odpadov a k minimalizácii ich negatívnych dopadov na životné prostredie.

Spracovatelia naznačujú problémy v dodržiavaní parametrov recyklácie, ktoré boli predpísané, z dôvodu neexistencie technologických prevádzok pre všetky materiály z vozidiel po dobe

životnosti. Spracovatelia následne materiály bez druhotného spracovateľa, buď skládajú, spaľujú alebo, ak im to kapacity dovoľia skladujú ich. [2, 12]

K materiálom pre ktoré v súčasnosti fungujú technologické prevádzky patria kovy, hliník, meď, katalyzátory, batérie a pneumatiky. Recykláciou pneumatík sa zaoberá aj spoločnosť AVE SK odpadové hospodárstvo s.r.o., Kechnec, ktorá sa zaoberá okrem iného výrobou gumového granulátu a gumových lisovaných výrobkov. Nakoľko v posledných rokoch dochádza k malému odbytú týchto výrobkov, v spolupráci s touto spoločnosťou je snaha nájsť riešenie pre možnosť lepšieho zhodnocovania problémového gumového odpadu zo starých vozidiel.

Pre gumené, viacvrstvové sklo, koberce, textilie, tapaciry, svetidlá, izolačné materiály, molitany, hadice, palubné dosky a plasty nie sú dostupní odberatelia alebo recyklačné spoločnosti, kde by fungovali technologické prevádzky. V malej miere recykláciou kobercov a textilií z vozidiel po dobe životnosti zaoberá spoločnosť Stered Krajné s.r.o., Krajné s ktorou sa tiež v rámci spolupráce hľadajú riešenia pre ďalšie využitie tohto materiálu do inovovaných pôvodných výrobkov alebo pre nové výrobky. Možnosti využitia sklenených frakcií z viacvrstvových autoskiel sa hľadajú v spolupráci so SjF STU v Bratislave a spoločnosťou Window Glass, s.r.o., Trnava.

Dosiahnutie úrovne spracovania viacerých materiálov sa dosahuje v množstve prípadov iba zvýšením energetického zhodnotenia. [12] Napriek tomu že problémové materiály, ako pneumatiky a textilie majú svojich odberateľov, ich zhodnotenie predstavuje určité limity. Spoločnosť AVE SK odpadové hospodárstvo s.r.o., Kechnec platí za tonu pneumatík 80,00 – 120,00 eur. STERED Krajné odoberá iba limitné množstvá textilií z vozidiel po dobe životnosti a z dôvodu malého odbytú je tento materiál skládkovaný alebo spaľovaný. Na obr.5.1 sú prezentované základné materiály z ktorých je vozidlo zložené. Zelenú farbu predstavujú materiály pre ktoré sú zriadené technologické pracoviská na ich spracovanie a červenou farbou sú označené materiály, ktoré sú problémové z hľadiska ich spracovania (recyklácie, resp. zhodnocovania).

Kovy	Meď	Hliník	Akumulátory, katalyzátory	Kvapaliny	Plasty	Gumy	Ostatné diely
karoséria	káble	motor	olovené	nafta, benzín	plasty pri motore	pneumatiky	koberce
motor	motorčeky	alternátor	NiCad	nemrznúca zmes	nárazníky, nádrže	tesnenia	izolácie
nápravy	alternátor	prevodovka	Lilon	olej	interiérové plasty	hadice	molitan
disky	štartér	disky		kvap. do ostrekovačov			textilie
prevody	elektronika			brzdová kvap.			sklo
štartér							tapaciry
sedáčky							reflektory
motorčeky							airbagy
alternátor							

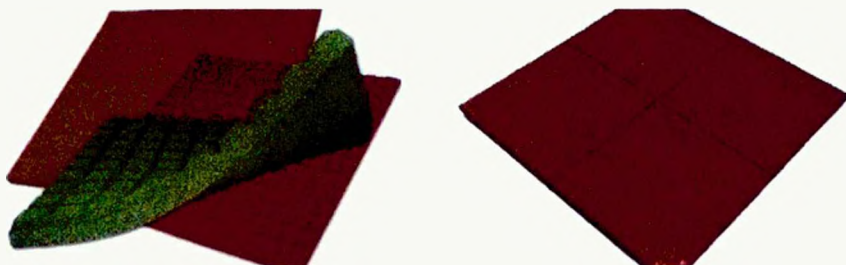
Obr. 5.1 Základné komponenty vozidla

5.3 Gumový granulát použitý na výskum

Gumový granulát, ktorý bol použitý na výskum bol vyrobený v spoločnosti AVE SK odpadové hospodárstvo s.r.o., prevádzka Kechnec. Tento granulát sa vyrába mechanickým drvením pneumatík po dobe životnosti, najmä z osobných automobilov. Pneumatiky sú spracovávané dánskou technológiou ELDAN a je v súlade v požiadavkami BAT a BATNEEC. Finálnym produktom sú výrobky z gumového granulátu.

5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno-izolačných produktov

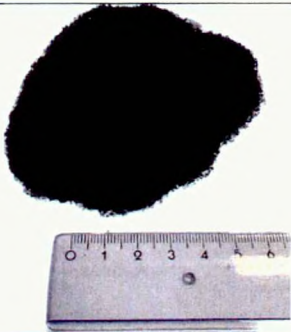
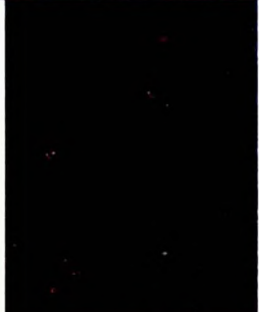
Granulát je vyrábaný v rôznych frakciách, najčastejšie však o veľkosti 0 až 4 mm. Ako jediný vyrábajú aj gumové lisované výrobky, použitím gumovej drviny a pojiva (obr. 5.2). V závislosti od veľkosti frakcie sa množstvo pridávaného lepidla pohybuje v rozmedzí 4 – 12 %.

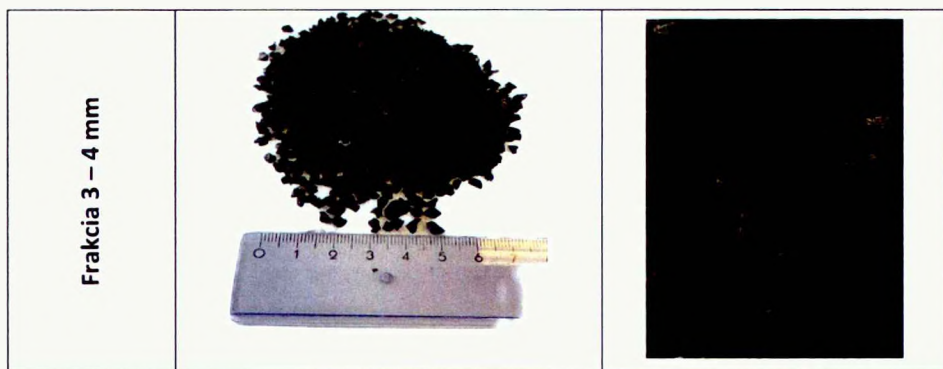


Obr. 5.2 Gumové lisované výrobky

Rozmery a veľkosti frakcií, ktoré boli použité na vedecké experimenty sú znázornené v tab.5.1.

Tab. 5.1 Detaily veľkosti gumových frakcií použitých na výskum

Frakcia 0 - 1 mm		
Frakcia 1 – 2 mm		
Frakcia 2 – 3 mm		



5.4 Textil použitý na výskum

Textilný materiál, ktorý bol použitý na výskum bol poskytnutý spoločnosť Stered PR Krajné, s.r.o., Krajné vo forme:

- kompaktného panelu z materiálov z automobilov zlepených a zlisovaných (obr. 5.3),
- sypaného materiálu, ktorý tvorili homogenizované časti textilií z kobercov a potáhov rozstrihané alebo roztrhnuté na menšie frakcie (obr. 5.4).



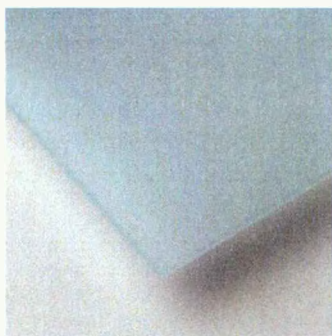
Obr. 5.3 Kompaktný textilný materiál



Obr. 5.4 Rozstrihaný textilný materiál

5.5 Sklenená drvina z autoskiel použitá na výskum

Sklenená drvina bola získaná z experimentov, ktoré boli vykonávané na Strojníckej fakulte STU v Bratislave (obr. 5.6).



Obr. 5.5 Kompaktný sklenený materiál



Obr. 5.6 Sklenená drvina

5.6 Návrh metodiky merania akustických deskriptorov sypaných materiálov

Na meranie vybraných akustických deskriptorov (Koefficientu zvukovej pohltivosti a Indexu útlmu) bola použitá impedančná trubica BSWA TECH SW433 pomocou metódy transformačnej funkcie, ktorá je v súlade s normou STN EN ISO 10534-2. [14]

Impedančná trubica musí mať neporéznu, hladkú a rovnú vnútornú stenu. Materiál, z ktorého je impedančná trubica vyrobená musí byť pevný a zabrániť vibráciám ktoré vznikajú počas prevádzky. [7] Konštrukcia trubice musí byť zabezpečená tak, aby horná hraničná frekvencia bola nižšia ako najnižšia medzná frekvencia trubice. Táto podmienka umožňuje vznik iba roviny pre šíriace sa vlny vo vnútri trubice. [4] Tento jav je vyjadrený ako:

$$d < K \frac{c}{f_u} \quad (5.1)$$

kde:

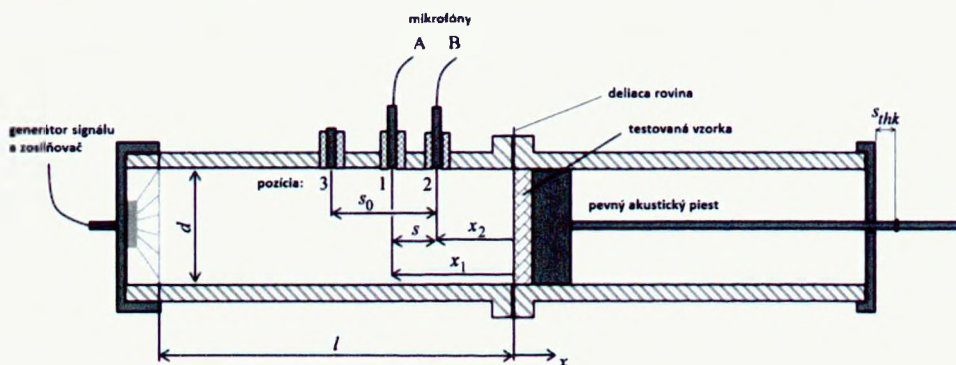
f_u – je horná frekvencia trubice a c je rýchlosť zvuku pri aktuálnej teplote vzduchu,

c – je rýchlosť zvuku pri jeho aktuálnej teplote.

Ďalšou podmienkou aby sa rozvinula rovinná vlna je dostatočná dĺžka trubice. Najmenšia vzdialenosť medzi zdrojom zvuku a prvým mikrofónom sa musí rovnať vnútornému priemeru trubice d . je odporúčané splniť nasledovnú podmienku:

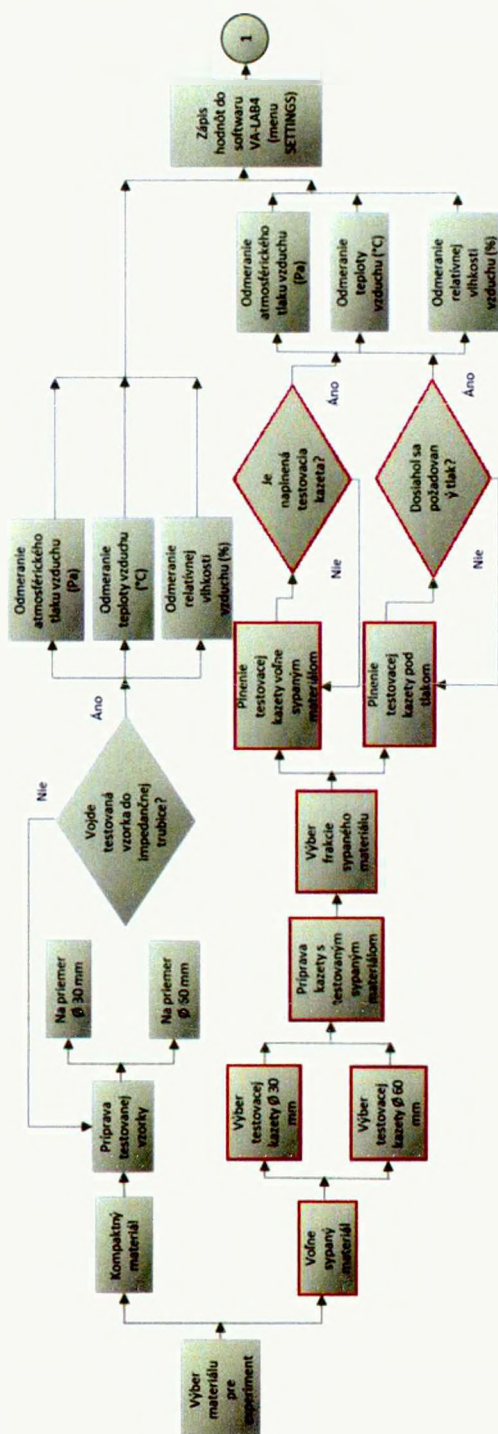
$$l - s - x_2 > 3d \quad (5.2)$$

Tieto rovnice definujú hlavné rozmery impedančnej trubice z dôvodu zabránenia nerovinnému šíreniu vln, ktoré si merania vyžadujú (obr. 5.7). [11, 16]



Obr. 5.7 Konštrukčné parametre impedančnej trubice [6]

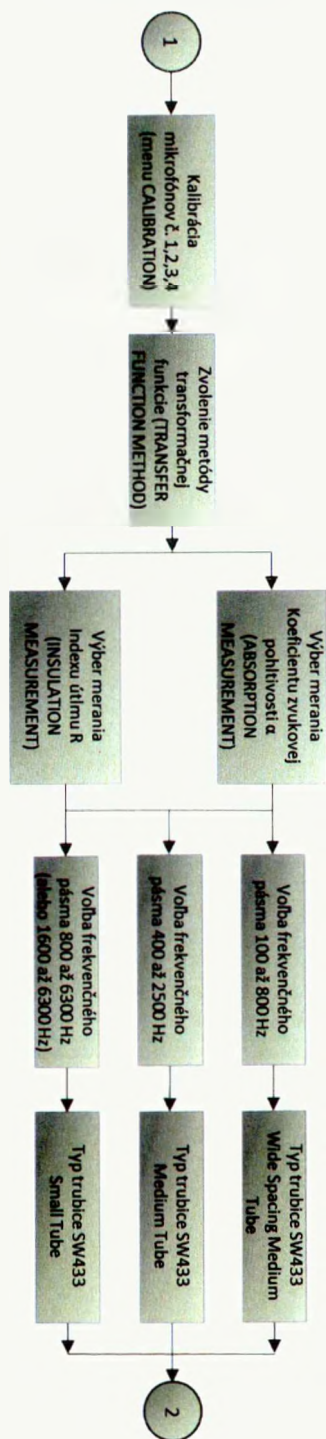
Metodikou merania koeficientu zvukovej pohltivosti (α) a indexu útlmu (R) pomocou impedančnej trubice sa zaoberali viacerí doktorandi, ktorých školiteľom bol Dr.h.c. mult. prof. Ing. Miroslav Badida, PhD. Žiaden z nich sa nevenoval návrhu metodiky merania sypkých materiálov v uvádzanej trubici. V realizovanom výskume na obr. 5.8 až obr. 5.11 je prezentovaná navrhnutá originálna metodika merania akustických deskriptorov sypaných materiálov rôznych frakcií (voľne sypaných, resp. pod určitým tlakom). Pre potreby aplikovania navrhutej metodiky bolo nutné vyvinúť a vyrobiť testovacie kazety a zariadenie prezentované v nasledujúcej časti tohto príspevku.



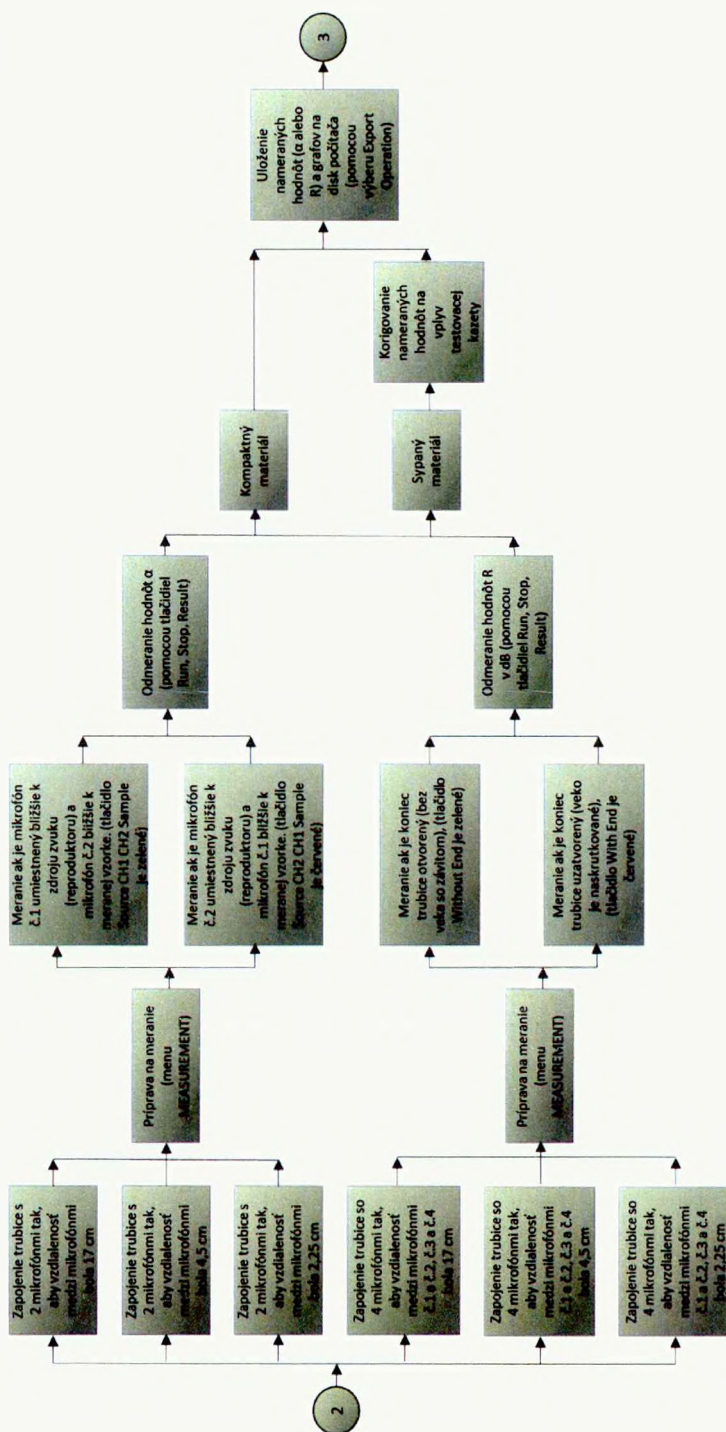
Legenda: inovovaná časť metódy je vyznačená červeným orámovaním

Obr. 5.8 Metodika merania sypaných materiálov – 1. časť

5. Zhodnocovanie problémových odpadov z automobilov, cho priemyslu do zvukovo a tepelne izolačných produktov



Obr. 5.9 Metodika merania sypaných materiálov – 2. časť



Obr. 5.10 Metodika merania sypaných materiálov – 3. časť

5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov



Obr. 5.11 Metodika merania sypaných materiálov – 4. časť

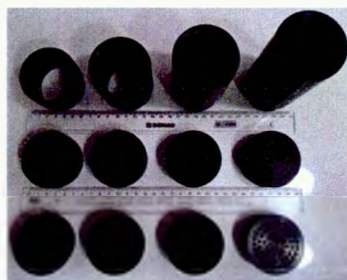
5.7 Vývoj a výroba prípravkov a zariadenia pre potreby merania akustických deskriptorov sypaných materiálov

Na začiatku riešenia tejto problematiky, bolo potrebné vyriešiť, ako merať vybrané akustické deskriptory pre sypané materiály v impedančnej trubici, nakoľko ich nie je možné voľne do zariadenia umiestniť. V nadväznosti na rozšírenie týchto možností boli riešiteľským kolektívom vyvinuté a vyrobené testovacie kazety na rozšírenie možností merania sypaných materiálov v impedančnej trubici. [9] Testovacie kazety boli vyrobené na obrábacom CNC stroji a to v piatich dĺžkach – 25, 50, 75, 100 a 125 mm (Obr. 5.12 5.12).

Kazety sú zložené z vonkajšieho závitú na jednej strane a v z vnútorného závitú na druhej strane. Uzavreté sú perforovaným sitom, ktorý tvorí najdôležitejšiu časť, nakoľko bráni vysypaniu materiálu z kazety (obr. 5.13). [8]



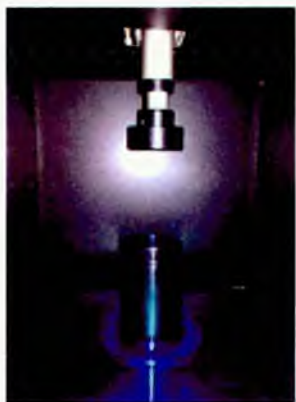
Obr. 5.12 Vyvinuté testovacie kazety



Obr. 5.13 Komponenty tvoriace kazetu

Navrhnutému riešeniu kaziet na rozšírenie možností merania sypkých materiálov v impedančnej trubici bol udelený Úradom priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky úžitkový vzor pod číslom dokumentu 9662 a zverejnený dňa 10.08.2022.

Riešitelia projektu v nadväznosti na testovacie kazety vyvinuli aj Zariadenie na merané plnenie testovacích kaziet sypanými materiálmi, ktoré rozšírilo možnosti merania vybraných akustických deskriptorov recyklovaných sypaných materiálov z vozidiel po dobe životnosti. Zariadenie umožňuje vyvinúť rôzne tlaky na sypaný materiál, a tak dosiahnuť rôznu pórovitosť v materiály. Následne je možné vyhodnotiť vplyv pórovitosti vo vybranom materiály na jeho akustické vlastnosti – Koeficient zvukovej pohltivosti (α) a Index útlmu (R). Na obr. 4.14 je znázornené zariadenie na merané plnenie testovacích kaziet sypanými materiálmi.



Obr. 5.14 Reálne pohľady na vyvinuté zariadenie

Vyvinutému zariadeniu na merané plnenie testovacích kaziet sypaným materiálom bol udelený Úradom priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky úžitkový vzor pod číslom dokumentu 9665 a zverejnený dňa 24.8.2022.

Zariadenie je vytvorené z hliníka a kryt tvorí oceľový plech. Má rozmery 410 x 754 x 414 mm a hmotnosť 15 kilogramov. Odporúčaný pracovný cyklus zariadenia je 15 min. za hodinu a hlučnosť nameraná vo vzdialenosti 30 cm od zariadenia je 50 dB. Princíp zariadenia spočíva v tom, že kazeta sa spolu s nasýpaným materiálom vloží do strediaceho krúžku a pomocou lineárneho piestu dochádza k lisovaniu materiálu vo vnútri kazety. Hodnota stlačenia v kilogramoch sa odčítava z ovládacie prvku, pričom rozsah zariadenia je od 100 g do 200 kg.

5.8 Výskum akustických deskriptorov vybraných problémových materiálov z hľadiska ich ďalšieho zhodnocovania (v kompaktnej a sypanej forme)

Experiment merania bol vykonávaný v laboratóriu na Katedre riadenia podniku a inžinierstva prostredia, Strojníckej fakulty, Technickej univerzity v Košiciach. Teplota prostredia v laboratóriu počas merania bola 22 °C a hodnota tlaku bola 99 500 Pa. Na meranie vzoriek bola použitá impedančná trubica BSWA TECH.

Experimentálne vzorky boli pripravené z dvoch recyklovaných materiálov z vozidiel po dobe životnosti:

- **recyklovaná gumová drvina** v kompaktnej a v sypanej forme v štyroch veľkostných frakciách,
- **recyklovaná textília** v kompaktnej a sypanej forme (strihaná frakcia).

Vzorky so sypaným granulátom boli zhotovené v troch hrúbkach – 2 cm, 4,5 cm a 7 cm pre každú gumovú frakciu (obr. 5.15 až obr. 5.18).



Obr. 5.15 Frakcia 0 – 1 mm v troch hrúbkach



Obr. 5.16 Frakcia 1 – 2 mm v troch hrúbkach

5. Zhodnocovanie problémových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelnoizolačných produktov



Obr. 5.17 Frakcia 2 – 3 mm v troch hrúbkach



Obr. 5.18 Frakcia 3 – 4 mm v troch hrúbkach

Rovnakým postupom boli zhotovené aj vzorky so sypaným recyklovaným textilom (obr. 5.19).



Obr. 5.19 Sypaný recyklovaný textil v troch hrúbkach

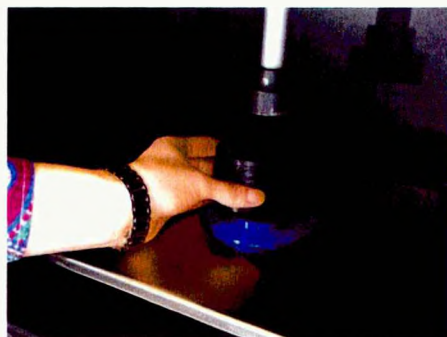
Každá sypaná vzorka bola zhotovená v 4 prevedeniach, a to:

- voľne sypaná,
- stlačená pod tlakom 50 kg,
- stlačená pod tlakom 100 kg,
- stlačená pod tlakom 150 kg.

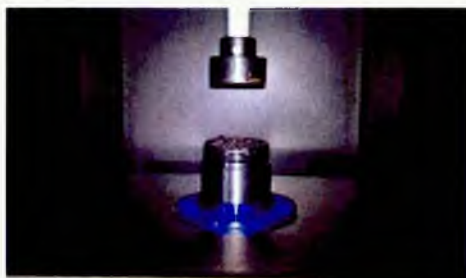
Vzorky sypaných materiálov boli stláčané v zariadení na merané plnenie testovacích kaziet sypkými materiálmi, kedy po nasypaní materiálu do kazety sa vzorka upevnila na strediaci krúžok a po zapnutí riadiacej jednotky sa elektrickým lineárnym piestom vyvíjal potrebný tlak na zhutnenie tohto materiálu (obr. 5.20 až obr. 5.25). Po vybratí vzorky zo zariadenia, bola vzorka uzatvorená perforovaným sitom testovacej kazety a znovu odvážená (obr. 5.26 až obr. 5.27).



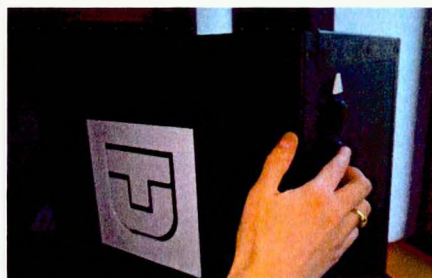
Obr. 5.20 Zapnutie riadiacej jednotky



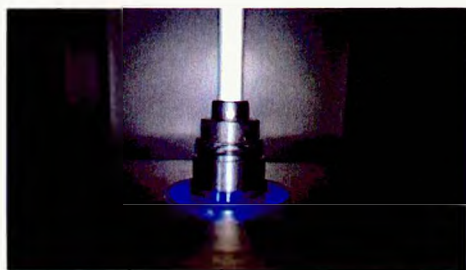
Obr. 5.21 Vloženie vzorky na strediaci krúžok



Obr. 5.22 Testovacia kazeta v zariadení



Obr. 5.23 Tlačidlový spínač - dole



Obr. 5.24 Materiál stláčaný lineárnym piestom



Obr. 5.25 Tlačidlový spínač - hore



Obr. 5.26 Uzatvorenie testovacej kazety



Obr. 5.27 Odváženie nasypanej vzorky v testovacej kazete

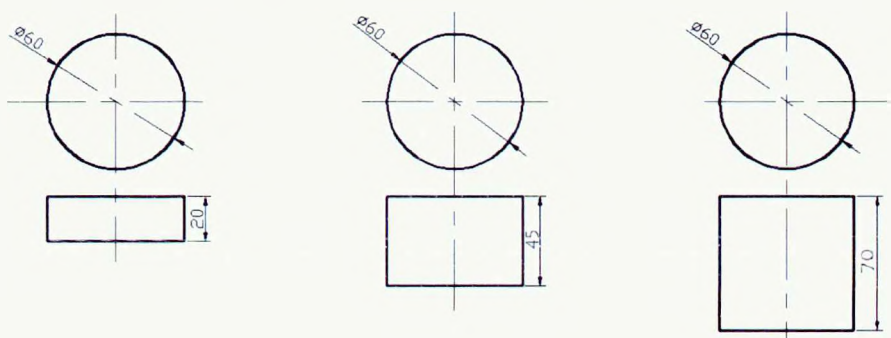
Kompaktné vzorky vyrobené z gumovej drviny (obr. 5.28) a z textilu (obr. 5.29) z vozidiel po dobe životnosti, boli vyrezané taktiež v troch hrúbkach 2 cm; 4,5 cm a 7 cm, všetky z priemerom 6 cm (obr. 5.30).



Obr. 5.28 Kompaktný materiál z recyklovanej gumy v troch hrúbkach



Obr. 5.29 Kompaktný materiál z recyklovaného textilu v troch hrúbkach



Obr. 5.30 Rozmery testovaných materiálov (vzoriek)

V tab. 5.2 a tab. 5.3 sú uvádzané základné informácie o vzorkách z recyklovanej gumovej drviny a recyklovaného textilného materiálu z vozidiel po dobe životnosti, ktoré boli použité na meranie vybraných akustických deskriptorov – koeficientu zvukovej pohltivosti (α) a indexu útlmu $\otimes$.

Tab. 5.2 Základné údaje o vzorkách z recyklovanej gumovej drviny

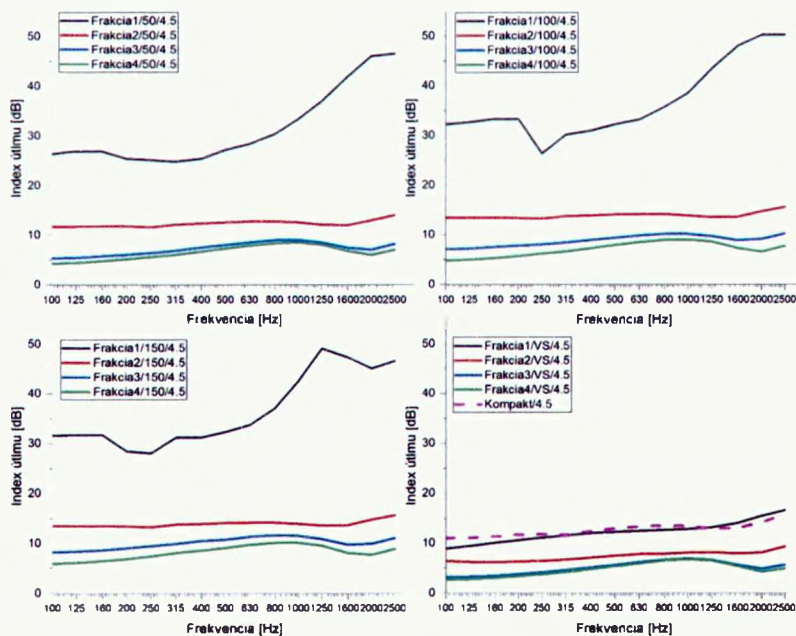
Materiál	Frakcia [mm]	Akustický parameter		Tlak [kg]	Hmotnosť [g]	Hrúbka vzorky [cm]	Priemer vzorky [cm]
Vzorka č. 1	0 – 1 mm	α	R	50	21,8 g	2 cm	6
					47,4 g	4,5 cm	6
					84 g	7 cm	6
				100	26,5 g	2 cm	6
					53,2 g	4,5 cm	6
					91,1 g	7 cm	6
				150	27,6 g	2 cm	6
					54 g	4,5 cm	6
					92,6 g	7 cm	6
				Voľne sypaná	16,7 g	2 cm	6
31,8 g	4,5 cm	6					
47,2 g	7 cm	6					
Vzorka č. 2	1 – 2 mm	α	R	50	24,9 g	2 cm	6
					49,5 g	4,5 cm	6
					80,3 g	7 cm	6
				100	26,8 g	2 cm	6
					52,2 g	4,5 cm	6
					86,9 g	7 cm	6
				150	28,2 g	2 cm	6
					55 g	4,5 cm	6
					92,4 g	7 cm	6
				Voľne sypaná	20,7 g	2 cm	6
37,2 g	4,5 cm	6					
58,6 g	7 cm	6					
Vzorka č. 3	2 – 3 mm	α	R	50	26,2 g	2 cm	6
					48,3 g	4,5 cm	6
					80,9 g	7 cm	6
				100	27,8 g	2 cm	6
					52 g	4,5 cm	6
					86 g	7 cm	6
				150	29,3 g	2 cm	6
					55,5 g	4,5 cm	6
					93,4 g	7 cm	6
				Voľne sypaná	23,2 g	2 cm	6
41,7 g	4,5 cm	6					
60,2 g	7 cm	6					
Vzorka č. 4	3 – 4 mm	α	R	50	26 g	2 cm	6
					49,6 g	4,5 cm	6
					81,9 g	7 cm	6
				100	27,5 g	2 cm	6
					51,7 g	4,5 cm	6
					85,2 g	7 cm	6
				150	29,3 g	2 cm	6
					54,9 g	4,5 cm	6
					91,8 g	7 cm	6
				Voľne sypaná	23,9 g	2 cm	6
43,7 g	4,5 cm	6					
67,6 g	7 cm	6					
Vzorka č. 5 – kompaktný materiál	1 – 3 mm	α	R	-	57,3 g	2 cm	6
					104,9 g	4,5 cm	6
					161,5 g	7 cm	6

Tab. 5.3 Základné údaje o vzorkách z recyklovaného textilu

Materiál	Frakcia [mm]	Akustický parameter		Tlak [kg]	Hmotnosť [g]	Hrúbka vzorky [cm]	Priemer vzorky [cm]
Vzorka č. 1	-	α	R	50	11,6 g	2 cm	6
					18,8 g	4,5 cm	6
					37,1 g	7 cm	6
				100	13,6 g	2 cm	6
					23,1 g	4,5 cm	6
					44,5 g	7 cm	6
				150	14,9 g	2 cm	6
					28,8 g	4,5 cm	6
					51,8 g	7 cm	6
				Voľne sypaná	8,4 g	2 cm	6
Vzorka č. 2 – kompaktný materiál	-	α	R	-	9,2 g	4,5 cm	6
					17,5 g	7 cm	6
					10 g	2 cm	6
					18,3 g	4,5 cm	6
					30 g	7 cm	6

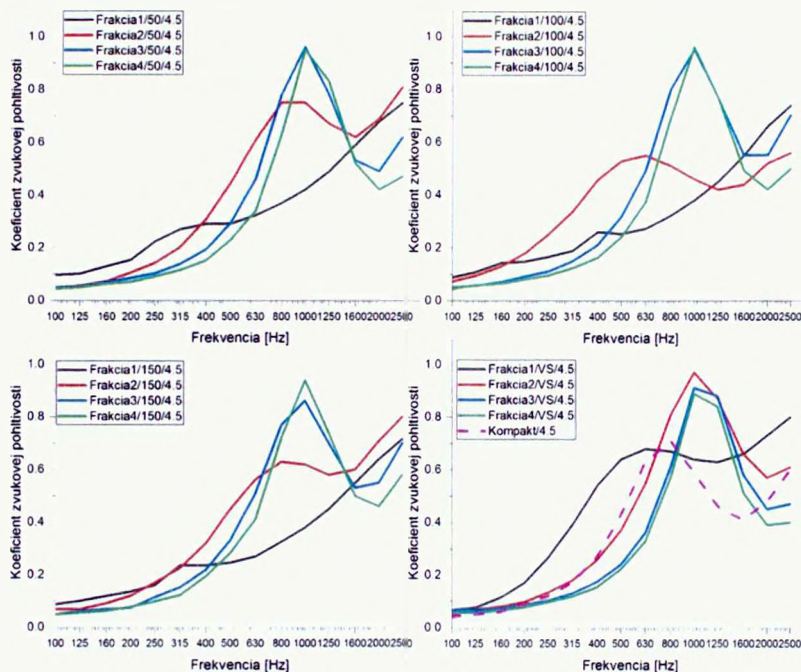
5.9 Vyhodnotenie vykonaných experimentov pomocou regresnej a korelačnej analýzy

V tejto časti príspevku sú prezentované výsledky vykonaných meraní vybraných akustických deskriptorov (Indexu útlmu (R) a Koeficientu zvukovej pohltivosti (α)). V rámci experimentálnej práce bolo vykonaných 5 250 meraní, čo možno označiť za významnú experimentálnu vzorku. Ako príklad sa uvádza na obr. 5.31 grafická interpretácia nameraných hodnôt Indexu útlmu (R) pre vzorky recyklovanej gumovej drviny o hrúbke 4,5 cm.



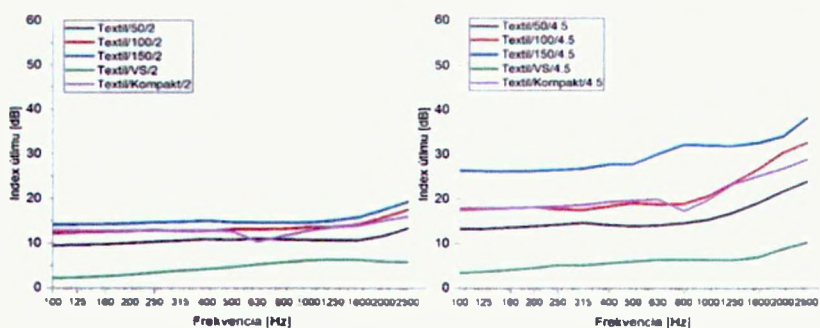
Obr. 5.31 Grafické znázornenie nameraných hodnôt indexu útlmu (R) pre vzorky recyklovanej gumovej drviny o hrúbke 4,5 cm

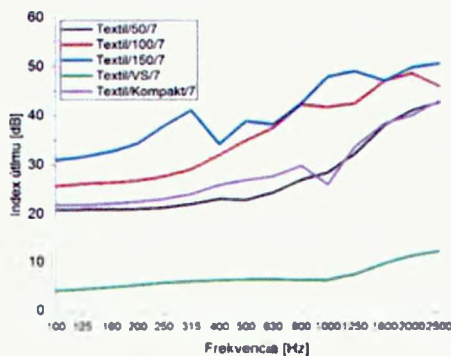
Grafické znázornenie nameraných hodnôt Koeficientu zvukovej pohltivosti (α) pre vzorky recyklovanej gumovej drviny o hrúbke 4,5 cm sa uvádza na obr. 5.32.



Obr. 5.32 Grafické znázornenie nameraných hodnôt koeficientu zvukovej pohltivosti (α) pre vzorky recyklovanej gumovej drviny o hrúbke 4,5 cm

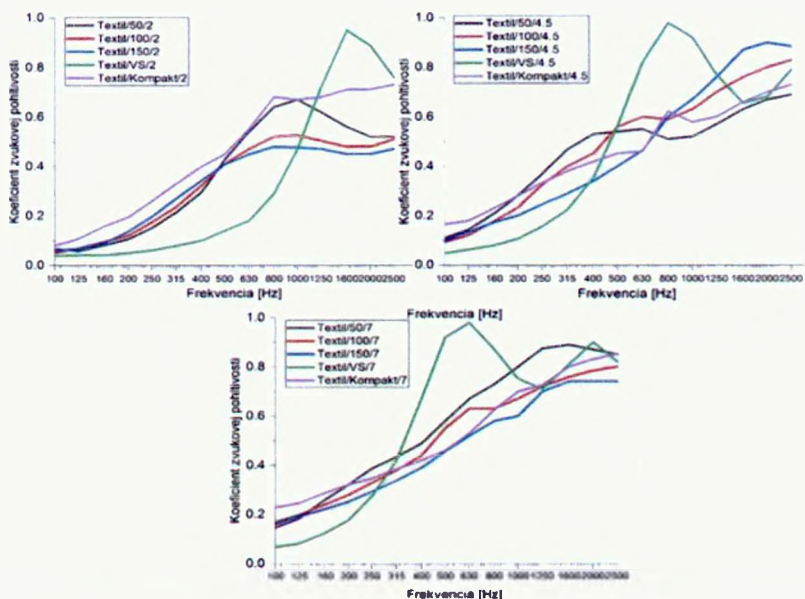
Grafické znázornenie nameraných hodnôt Indexu útlmu (R) pre vzorky recyklovaného textilu sú uvedené na obr. 532.





Obr. 5.33 Grafické znázornenie nameraných hodnôt Indexu útlmu (R) pre vzorky recyklovaného textilu

Grafické znázornenie nameraných hodnôt Koeficientu zvukovej pohltivosti (α) pre vzorky recyklovaného textilu sa uvádza na obr. 5.34.



Obr. 5.34 Grafické znázornenie nameraných hodnôt Koeficientu zvukovej pohltivosti (α) pre vzorky recyklovaného textilu

Detailné namerané výsledky, ich grafické interpretácie a zhodnotenia sú uvedené v práci [10]. Praktická časť výskumnej práce sa venovala aj vyhodnoteniu vplyvu významnosti pomocou štatistických metód. [17] Pri skúmaní výstupnej premennej Y od vybraných vstupných premenných $X_1, X_2, \dots, X_k$ bola použitá regresná a korelačná analýza. Predpokladá sa, že klasický lineárny regresný model v tvare:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (5.3)$$

kde $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ sú parametre modelu, Y je vstupná (závislá) premenná, premenné $X_1, X_2, \dots, X_k$ predstavujú k-nezávislých vstupných premenných a ε je náhodná chyba.

Štatistická významnosť regresného modelu, resp. parametrov regresného modelu bola overená pomocou testov štatistickej významnosti. V prípade, že p-hodnota je menšia, ako hladina významnosti α , tak nulová hypotéza sa zamietá v prospech alternatívnej hypotézy. V prípade, že p-hodnota je rovná, alebo väčšia, ako zvolená hladina významnosti α , tak nulová hypotéza sa nezamietá. [3, 5]

Miera (silu) tesnosti závislosti premennej Y od účinku k premenných je vyjadrená prostredníctvom viacnásobného koeficienta determinácie R^2 . Koeficient nadobúda hodnoty z intervalu $(0;1)$. Čím je hodnota bližšie k 1, tým je závislosť tesnejšia.

5.9.1 Sledovanie závislosti Koeficientu zvukovej pohltivosti od vybraných parametrov využitím regresnej analýzy

Pre Koeficient zvukovej pohltivosti (ďalej len KZP) sa uvažoval model:

$$KZP = \beta_0 + \beta_1 \cdot h + \beta_2 \cdot m + \beta_3 \cdot F + \varepsilon, \quad (5.4)$$

kde:

h - predstavuje hrúbku [cm],

m - hmotnosť [g],

F - frekvenciu [Hz].

V práci je podrobnejšie opísaný bodový odhad lineárneho regresného modelu pre frakciu 0 - 1 recyklovaného gumového granulátu.

Bodový odhad lineárneho regresného modelu, ktorý vystihuje závislosť koeficientu zvukovej pohltivosti (KZP) od zvolených nezávislých premenných (hrúbka - h , hmotnosť - m , frekvencia - F) má tvar:

$$KZP = 0,1097 + 0,000269 F - 6,347 m + 7,328 h.$$

Na overenie štatistickej významnosti modelu bol použitý F - test štatistickej významnosti modelu. Testuje sa nulová hypotéza H_0 : *regresný model nie je štatisticky významný* oproti alternatívnej hypotéze H_1 : *regresný model je štatisticky významný*. Pretože p-hodnota $< \alpha = 0.05$, možno predpokladať, že navrhovaný regresný model je štatisticky významný.

Štatistická významnosť jednotlivých parametrov regresného modelu bola overená pomocou testu štatistickej významnosti regresného parametra. Z výsledkov testovania vyplýva, že všetky parametre sa javia ako štatisticky významné (tab. 5.4).

Tab. 5.4 Odhady parametrov regresného modelu koeficientu zvukovej pohltivosti pre frakciu 1 recyklovaného gumového granulátu

Parameter	Bodový odhad	p-hodnota	Štatistická významnosť parametra
Constant	0,1097	0,000 < α	významný
F	0,000269	0,000 < α	významný
m	-6,347	0,000 < α	významný
h	7,328	0,000 < α	významný

Hodnota viacnásobného indexu determinácie je $R^2 = 80,36 \%$, čo znamená že až 80,36 % variability premennej KZP sa dá vysvetliť vplyvom premenných h , m , F . Obr. 5.35 znázorňuje výstup regresného modelu v programe Minitab.

Regression Analysis: KZP versus h; m; F
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,103051	80,69%	80,36%	79,51%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,1097	0,0204	5,37	0,000	
F	0,000269	0,000011	25,13	0,000	1,00
m	-6,347	0,625	-10,15	0,000	4,41
h	7,328	0,791	9,27	0,000	4,41

Regression Equation

$KZP = 0,1097 + 0,000269 F - 6,347 m + 7,328 h$

Obr. 5.35 Výstup regresného modelu pre Koeeficient zvukovej pohltivosti frakcie 1 recyklovanej gumovej drviny v programe Minitab

Analogickým spôsobom boli získané regresné modely aj pre frakcie 2, 3, 4 a kompaktný materiál (tab. 5.5). Z výsledkov vyplýva, že pri frakcii 1 s priemerom granulátu od 0 mm do 1 mm existuje závislosť medzi vybranými premennými h , m , F a každý z týchto parametrov je štatisticky významný. Pri frakciách s priemerom granulátu od 2 mm do 3 mm, od 3 mm do 4 mm a pri kompaktnej vzorke predstavajú byť tieto parametre štatisticky významné a významný parameter je už iba frekvencia F .

Tab. 5.5 Bodové odhady lineárneho regresného modelu pre koeficient zvukovej pohltivosti recyklovaného gumového granulátu

Vzorka	Model	R ²
1 – 2 mm	$KZP = 0,0429 + 0,000291 F - 3,42 m + 6,30 h$	63,88 %
2 – 3 mm	$KZP = -0,0212 + 2,725 m + 0,000316 F$	60,74 %
3 – 4 mm	$KZP = -0,0646 + 3,182 m + 0,000298 F$	58,13 %
Kompaktná	$KZP = -0,0558 + 1,730 m + 0,000275 F$	50,80 %

Bodový odhad lineárneho regresného modelu, ktorý vystihuje závislosť koeficientu zvukovej pohltivosti (KZP) od zvolených nezávislých premenných (hrúbka – h , hmotnosť – m , frekvencia – F) pre recyklovaný textilný materiál je uvedený v tab. 5.6.

Tab. 5.6 Bodové odhady lineárneho regresného modelu pre koeficient zvukovej pohltivosti recyklovaného textilu

Vzorka	Model	R ²
Sypaná	$KZP = 0,0553 + 5,231 h - 2,75 m + 0,000275 F$	64,13 %
Kompaktná	$KZP = 0,1954 + 3,67 m + 0,000261 F$	77,56 %

Z tab. 5.5 vyplýva, že hodnota viacnásobného indexu determinácie je sypanú frakciu recyklovaného textilu je $R^2 = 64,13 \%$, čo znamená že 64,13 % variability premennej KZP sa dá vysvetliť vplyvom premenných h , m , F . Obr. 5.36 znázorňuje výstup regresného modelu v programe Minitab. Pre kompaktnú vzorku recyklovaného textilu je hodnota viacnásobného indexu determinácie $R^2 = 77,56 \%$.

Regression Analysis: KZP versus h; m; F

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,159856	64,73%	64,13%	62,77%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,0553	0,0317	1,75	0,082	
h	5,231	0,901	5,81	0,000	2,38
m	-2,75	1,34	-2,05	0,042	2,38
F	0,000275	0,000017	16,61	0,000	1,00

Regression Equation

$$\text{KZP} = 0,0553 + 5,231 h - 2,75 m + 0,000275 F$$

Obr. 5.36 Výstup regresného modelu pre koeficient zvukovej pohltivosti sypaného recyklovaného textilu v programe Minitab

5.9.2 Sledovanie závislosti Indexu útlmu od vybraných parametrov využitím regresnej analýzy

Rovnako ako pre Koeficient zvukovej pohltivosti sa uvažoval model aj pre Index útlmu, ktorý má tvar

$$\dot{U}_{tlm} = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 m + \beta_3 F + \varepsilon, \quad (5.5)$$

kde:

h - predstavuje hrúbku [cm],

m - hmotnosť [g],

F - frekvenciu [Hz].

V nasledujúcej časti uvádzame bodový odhad lineárneho regresného modelu pre frakciu 0 - 1 recyklovaného gumového granulátu. Nakoľko regresné modely pre ďalšie frakcie boli získané analogicky, sú ďalej uvedené v prehľadnej tabuľke.

Bodový odhad lineárneho regresného modelu, ktorý vystihuje závislosť indexu útlmu od zvolených nezávislých premenných (hrúbka – h , hmotnosť – m , frekvencia – F) má tvar:

$$\dot{U}_{tlm} = 8,31 - 444,2 h + 702,8 m + 0,004912 F.$$

Na overenie štatistickej významnosti modelu sme použili F – test štatistickej významnosti modelu. Testujeme nulovú hypotézu H_0 : *regresný model nie je štatisticky významný* oproti alternatívnej hypotéze H_1 : *regresný model je štatisticky významný*. Pretože p -hodnota $< \alpha = 0.05$, môžeme predpokladať, že navrhovaný regresný model je štatisticky významný.

Štatistickú významnosť jednotlivých parametrov regresného modelu bol rovnako overená pomocou testu štatistickej významnosti regresného parametra. Z výsledkov vyplýva, že všetky parametre sa javia ako štatisticky významné (tab. 5.7).

Tab. 5.7 Odhady parametrov regresného modelu indexu útlmu pre frakciu 1

Parameter	Bodový odhad	p-hodnota	Štatistická významnosť parametra
Constant	8,31	$0,000 < \alpha$	významný
h	-444,2	$0,000 < \alpha$	významný
m	702,8	$0,000 < \alpha$	významný
F	0,004912	$0,000 < \alpha$	významný

Hodnota viacnásobného indexu determinácie je $R^2 = 81,85 \%$, čo znamená že až 81,85 % variability premennej útlmu sa dá vysvetliť vplyvom premenných h , m , F . Obr. 5.37 znázorňuje výstup regresného modelu v programe Minitab.

Regression Analysis: Útlm versus h; m; F Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,46085	82,16%	81,85%	81,38%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8,31	1,08	7,68	0,000	
h	-444,2	41,9	-10,60	0,000	4,41
m	702,8	33,1	21,20	0,000	4,41
F	0,004912	0,000567	8,67	0,000	1,00

Regression Equation

$$\text{Útlm} = 8,31 - 444,2 h + 702,8 m + 0,004912 F$$

Obr. 5.37 Výstup regresného modelu pre index útlmu recyklovanej gumovej drviný frakcie 1 v programe Minitab

Analogickým spôsobom sme získali regresné modely aj pre frakcie 2, 3, 4 a kompaktný materiál (tab. 5.8). Z výsledkov vyplýva, že pri všetkých vzorkách z recyklovaného gumového granulátu existuje závislosť medzi vybranými premennými h , m , F a indexom útlmu a každý z týchto parametrov je štatisticky významný.

Tab. 5.8 Bodové odhady lineárneho regresného modelu pre Index útlmu

Vzorka	Model	R^2
1 – 2 mm	$\text{Útlm} = 2,525 - 244,1 h + 382,66 m + 0,001371 F$	94,81 %
2 – 3 mm	$\text{Útlm} = 1,786 - 173,1 h + 246,5 m + 0,001296 F$	87,10 %
3 – 4 mm	$\text{Útlm} = 1,464 - 164,5 h + 218,2 m + 0,001353 F$	77,53 %
Kompaktná	$\text{Útlm} = -17,30 - 2112 h + 1170,7 m + 0,002716 F$	97,23 %

Bodový odhad lineárneho regresného modelu, ktorý vystihuje závislosť Indexu útlmu recyklovaného textilu od zvolených nezávislých premenných (hrúbka – h , hmotnosť – m , frekvencia – F) pre recyklovaný textilný materiál je uvedený v tab. 5.9.

Tab. 5.9 Bodové odhady lineárneho regresného modelu pre Index útlmu recyklovaného textilu

Vzorka	Model	R^2
Sypaná	$\text{Útlm} = -0,800 - 161,0 h + 959,1 m + 0,004831 F$	91,93 %
Kompaktná	$\text{Útlm} = 1,82 + 763,1 m + 0,005082 F$	87,35 %

Hodnota viacnásobného indexu determinácie pre sypaný recyklovaný textil je $R^2 = 91,93 \%$, čo znamená že až 91,93 % variability premennej Útlmu sa dá vysvetliť vplyvom premenných h , m , F . Obr. 5.38 znázorňuje výstup regresného modelu v programe Minitab. Pre kompaktnú vzorku recyklovaného textilu je hodnota viacnásobného indexu determinácie $R^2 = 87,35 \%$.

Regression Analysis: Utlm versus h; m; F Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,38657	92,06%	91,93%	91,62%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,800	0,671	-1,19	0,235	
h	-161,0	19,1	-8,43	0,000	2,38
m	959,1	28,4	33,77	0,000	2,38
F	0,004831	0,000351	13,75	0,000	1,00

Regression Equation

$$\text{Utlm} = -0,800 - 161,0 h + 959,1 m + 0,004831 F$$

Obr. 5.38 Výstup regresného modelu pre Index útlmu sypaného recyklovaného textilu v programe Minitab

5.9.3 Celkové porovnanie výsledkov z merania akustických deskriptorov kompaktných a sypaných materiálov

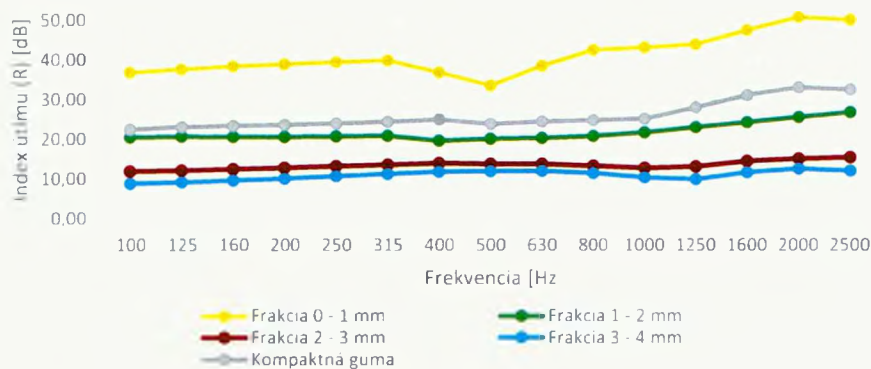
Z hľadiska meraní Indexu útlmu (R) recyklovanej gummy (rôznych frakcií), z vykonaných meraní najlepšie hodnoty dosiahla sypaná recyklovaná guma s hrúbkou 7 cm pri frekvencii 2500 Hz s veľkosťou frakcie 0 – 1 mm pri tlaku 150 kg, a to 50,80 dB. Čím bola frakcia recyklovanej gummy väčšia, tým sa hodnoty útlmu znižovali.

Kompaktná recyklovaná guma dosiahla pri hrúbke vzorky 7 cm a hmotnosti 161,5 g najlepšiu hodnotu 33,13 dB pri frekvencii 2000 Hz. Pri porovnaní sypaného granulátu s kompaktným panelom možno konštatovať že sypaný materiál dosahoval lepšie výsledky v celom frekvenčnom spektre (obr. 5.39).

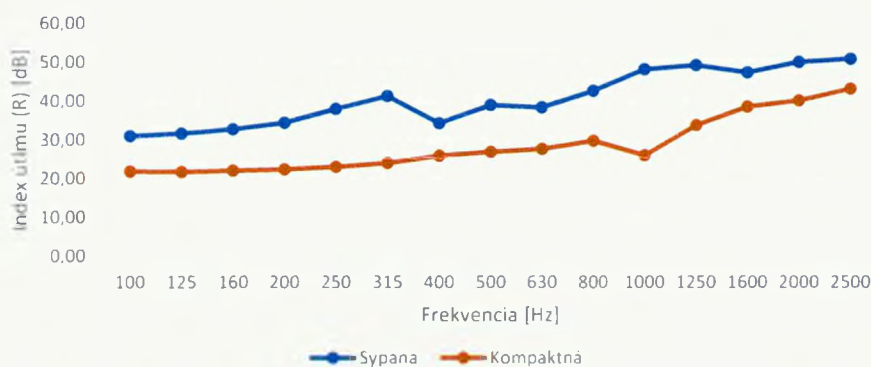
Na obr. 5.40 sú prezentované výsledky meraní Indexu útlmu (R) pre recyklovaný textil. Z výsledkov vyplýva že v celom frekvenčnom spektre najlepšie výsledky dosiahol sypaný recyklovaný textil. Najvyšší útlm dosiahla vzorka s hrúbkou 7 cm, ktorá bola stlačená pod tlakom 150 kg pri frekvencii 2500 Hz s hodnotou útlmu 50,55 dB.

Z nameraných výsledkov koeficientu zvukovej pohltivosti recyklovanej gummy vyplýva že v porovnaní sypaného a kompaktného materiálu, najlepšie výsledky dosiahol sypaný materiál. V rámci sypaného materiálu totožné výsledky dosiahla voľne sypaná frakcia s veľkosťou 1 – 2 mm a 2 – 3 mm, obe s hrúbkou 4,5 cm. Pri frekvencii 1000 Hz, čo je frekvencia v ktorej sa pohybuje dopravný hluk dosiahli hodnotu pohltivosti 0,97. pre porovnanie kompaktná guma dosiahla pri frekvencii 1000 Hz hodnotu pohltivosti iba 0,46. Najvyššia hodnota pohltivosti pre kompaktnú gumu bola pri frekvencii 1600 Hz a to 0,77 o hrúbke vzorky 2 cm (obr. 5.41).

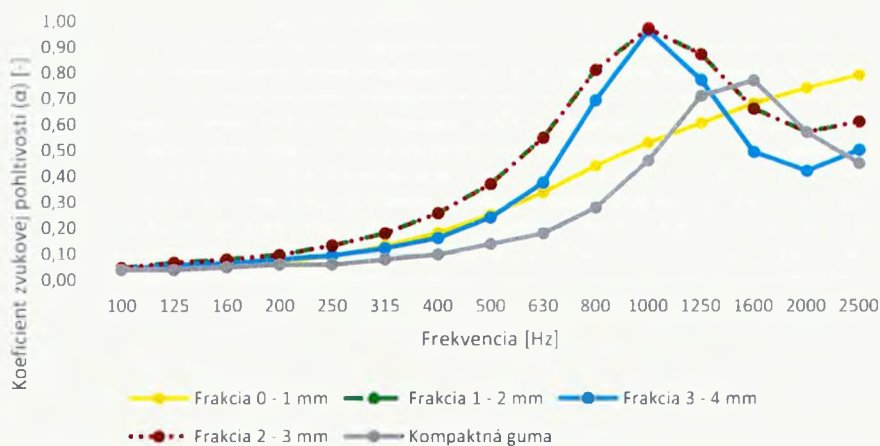
5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov



Obr. 5.39 Porovnanie najvyšších nameraných hodnôt indexu útlmu (R) pre sypanú a kompaktnú recyklovanú gumu



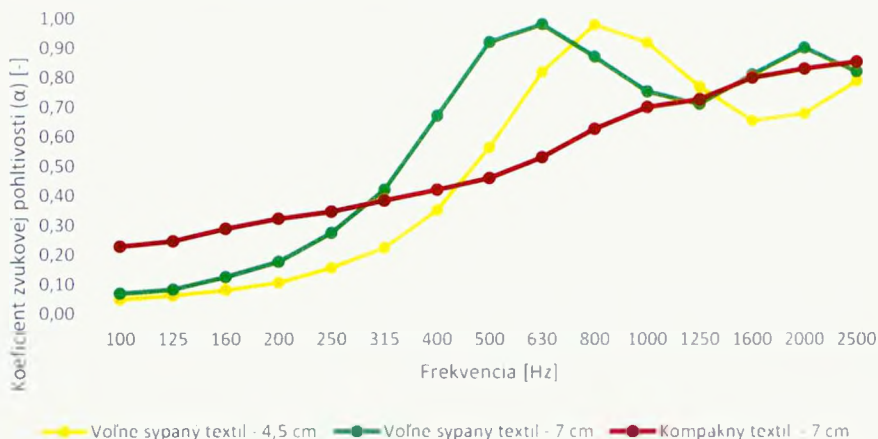
Obr. 5.40 Porovnanie nameraných hodnôt indexu útlmu (R) pre sypanú a kompaktnú recyklovanú gumu



Obr. 5.41 Porovnanie najvyšších nameraných hodnôt koeficientu zvukovej pohltivosti (α) sypanej a kompaktnej recyklovanej gumy

Pri porovnaní koeficientu zvukovej pohltivosti (α) voľne sypaného a kompaktného textilu, lepšie výsledky dosiahol sypaný textil (obr. 5.42). Najvyššiu hodnotu 0,98 dosiahla vzorka voľne nasýpaná pri frekvencii 800 Hz s hrúbkou 4,5 cm a vzorka voľne nasýpaná s hrúbkou 7 cm pri frekvencii 630 Hz. Kompaktný textil dosiahol lepšie výsledky až pri frekvencii 2500 Hz s hrúbkou 7 cm a s hodnotou pohltivosti 0,85.

Najlepšie hodnoty pohltivosti práve v rozmedzí dopravného hluku od 500 Hz do 1500 Hz. Výsledky sú graficky znázornené na obr. 5.42.

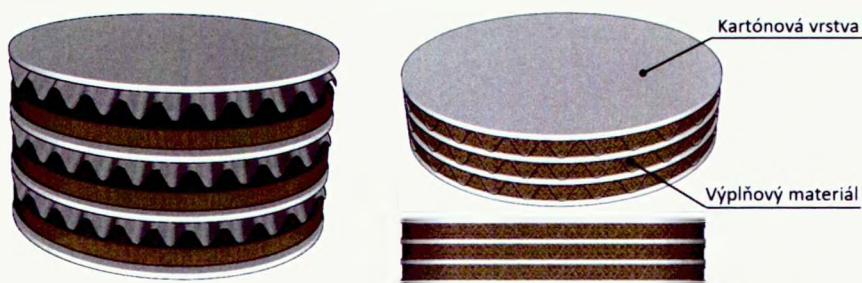


Obr. 5.42 Porovnanie najvyšších nameraných hodnôt koeficientu zvukovej pohltivosti (α) sypaného a kompaktného recyklovaného textilu

5.9.4 Experimentálne merania akustických vlastností akustických obkladových dosiek

Akustické obkladové dosky sa používajú v interiéroch miestností, kde sa aplikujú ako samostatné deliace plochy. V niektorých prípadoch sa používajú pri rekonštrukciách vnútorných priestorov na prekrytie stavebných nedostatkov, resp. kúrenárskych a vodárenských inštalácií. Uvádzané dosky okrem primárneho stavebného účelu by mali spĺňať aj ďalšie požiadavky ako napr. zabezpečiť zvukovú izoláciu medzi jednotlivými miestnosťami a tiež zabezpečiť optimálne akustické podmienky v donom priestore. Štandardné stavebné obkladové dosky sú v prevažnej miere vyrábané zo sadrokartónu. Niektorí výrobcovia stavebné obkladové dosky s vylepšenými akustickými vlastnosťami nazývajú aj akustické stavebné dosky. V súčasnosti na trhu sa sporadicky objavujú aj alternatívy k týmto obkladovým doskám. Základom týchto dosiek je kartónová konštrukcia s dutinami, ktoré sú vyplnené materiálom (najčastejšie kremičitý piesok). Riešitelia projektu použili ako výplňový materiál zo starých automobilov. Jednalo sa o granulované, resp. sýpkové materiály na báze recyklovaných pneumatík a autoskiel. Pre účely vedeckého experimentu bola použitá trojvrstvová lepenková kapsula (obr. 5.43).

5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov

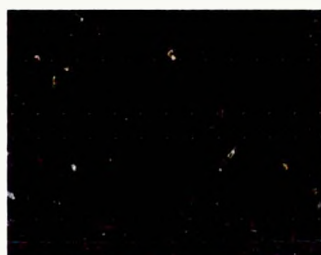


Obr. 5.43 Trojvrstvová lepenková kapsula

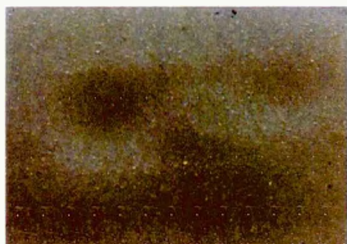
Ako výplňový materiál bola použitá recyklovaná guma (frakcia < 1 mm a frakcia 1 - 2 mm), drvené autosklo (frakcia < 1 mm), kremičitý piesok (frakcia < 1 mm) a sadrokartón (obr. 5.44).



Gumový granulát (frakcia menej ako 1 mm)



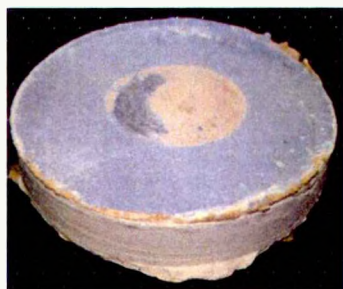
Gumový granulát (frakcia 1 - 2 mm) - vzorka



Drvené sklo (frakcia menej ako 1 mm) - vzorka



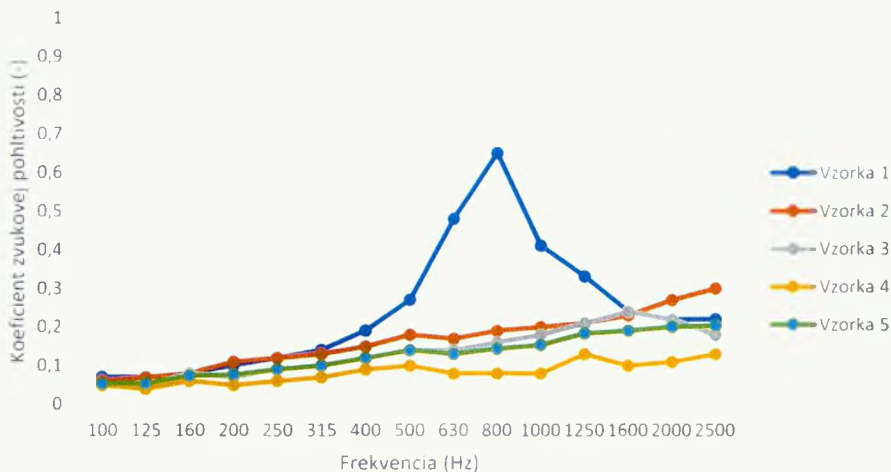
Piesok (menej ako 1 mm) - vzorka



Sadrokartón - vzorka

Obr. 5.44 Materiál použitý v experimentoch

Výsledky meraní koeficientu zvukovej pohltivosti (α) jednotlivých vzoriek a ich vzájomné porovnanie je uvedené na obr. 5.45.

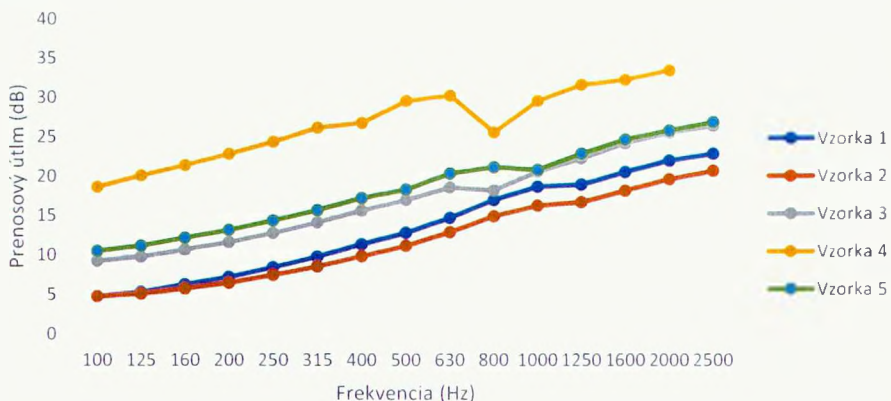


Legenda: Vzorka 1 - guma, Vzorka 2 - guma, Vzorka 3 - sklo, Vzorka 4 - piesok, Vzorka 5 - sadrokartón

Obr. 5.45 Porovnanie nameraných výsledkov koeficientov zvukovej pohltivosti meraných vzoriek

Na základe vykonaných meraní možno konštatovať, že najlepšia hodnota koeficientu zvukovej pohltivosti sa dosiahla pri použití materiálu, ako plniva, recyklovanej guma (frakcia < 1,0 mm). Výrazne lepšie vlastnosti sendvičovej vzorky boli dosiahnuté v pásme od 300 Hz do 1600 Hz. Veľmi podobné hodnoty boli zistené pri použití plniacich materiálov recyklovaná guma (frakcia 1,0 - 2,0 mm), sklo a sadrokartón. Najnižšie hodnoty koeficientu zvukovej pohltivosti boli dosiahnuté pri plniacom materiály piesok.

Výsledky meraní Indexu útlmu (R) skúšobných vzoriek a ich vzájomné porovnanie je uvedené na obr. 5.46.



Legenda: Vzorka 1 - guma, Vzorka 2 - guma, Vzorka 3 - sklo, Vzorka 4 - piesok, Vzorka 5 - sadrokartón

Obr. 5.46 Porovnanie výsledkov Indexu útlmu meraných vzoriek

Výsledky meraní preukázali, že najvyššia hodnota Indexu útlmu (R) bola dosiahnutá pri použití materiálu ako plniva kremičitý piesok. Ďalej nasledovali materiály, ako sadrokartón a recyklované sklo. Pri použití gumy (frakcia < 1,0 mm) a recyklovanej gumy (frakcia 1,2 - 2,0 mm), boli namerané najnižšie hodnoty Indexu útlmu (R).

5.10 Predikcia využitia sypaných materiálov do zvukovo a tepelno izolačných produktov

Jednou z možností využitia sypaných materiálov je ich aplikácia do zvukovo izolačných produktov, ako sú napríklad protihlukové steny. Protihlukové steny sa vo všeobecnosti realizujú najviac z dôvodu znižovania hluku z dopravy. V štandardnom type protihlukovej steny je vložený absorpčný materiál tvorený napr. minerálnou vlnou. Základný prvok predstavuje vonkajšia perforovaná platňa a v strede je vložený absorpčný materiál.

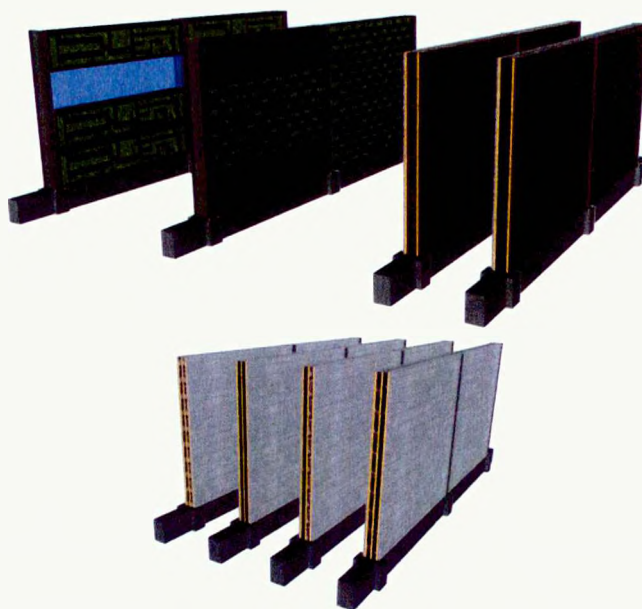
Problémové komponenty z vozidiel po dobe životnosti, ako sú staré textilie strihané, trhané, gumová drvína z opotrebovaných pneumatík (rôzne frakcie) a sklo (rôzne frakcie) sú na základe výsledkov v experimentálnom výskume vhodné na výrobu zvukovo izolačných prvkov. Nakoľko výroba kompaktných panelov z problémových materiálov z vozidiel po dobe životnosti je z hľadiska dostupnosti technologických procesov problematická a pridávanie dodatočných pojív samotný produkt len finančne predraží a vzniká aj riziko poškodenia životného prostredia, sypané materiály predstavujú možné riešenie pre ich aplikáciu do zvukovo izolačných produktov bez pridania dodatočných pojív. Z experimentálnej časti vyplýva, že sypané materiály dosiahli lepšie akustické vlastnosti ako kompaktné.

K výhodám týchto sypaných materiálov oproti komerčne vyrábaným recyklovaným panelom patrí nižšia hmotnosť, väčšia ekonomická efektívnosť, vysoká fyzikálna a chemická stabilita a lepšie hodnoty zvukovej pohltivosti:

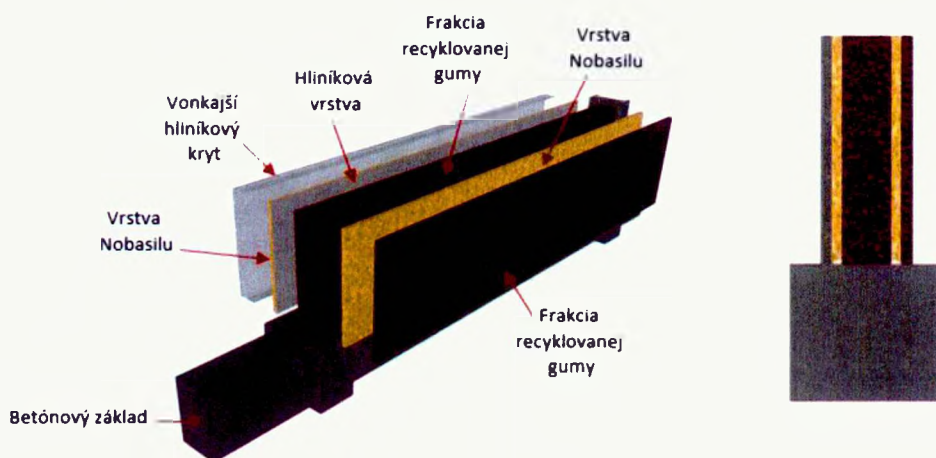
- na základe vykonaných meraní môžeme konštatovať, že sypané vzorky vykazujú dobrú zvukovú pohltivosť pri vyšších frekvenciách, čo je skutočnosť, ktorá odporúča tieto materiály na aplikáciu do zvukovo izolačných produktov,
- k výhodám týchto sypaných materiálov oproti komerčne vyrábaným recyklovaným panelom patrí nižšia hmotnosť, väčšia ekonomická efektívnosť, vysoká fyzikálna a chemická stabilita a lepšie hodnoty zvukovej pohltivosti,
- tieto materiály však nie sú samostatne použiteľné a je nutné ich aplikovať spoločne upevnené s nosnou stenou alebo rámom.

Riešiteľmi navrhnuté protihlukové panely sú uvedené na obr. 5.47 až obr. 5.49.

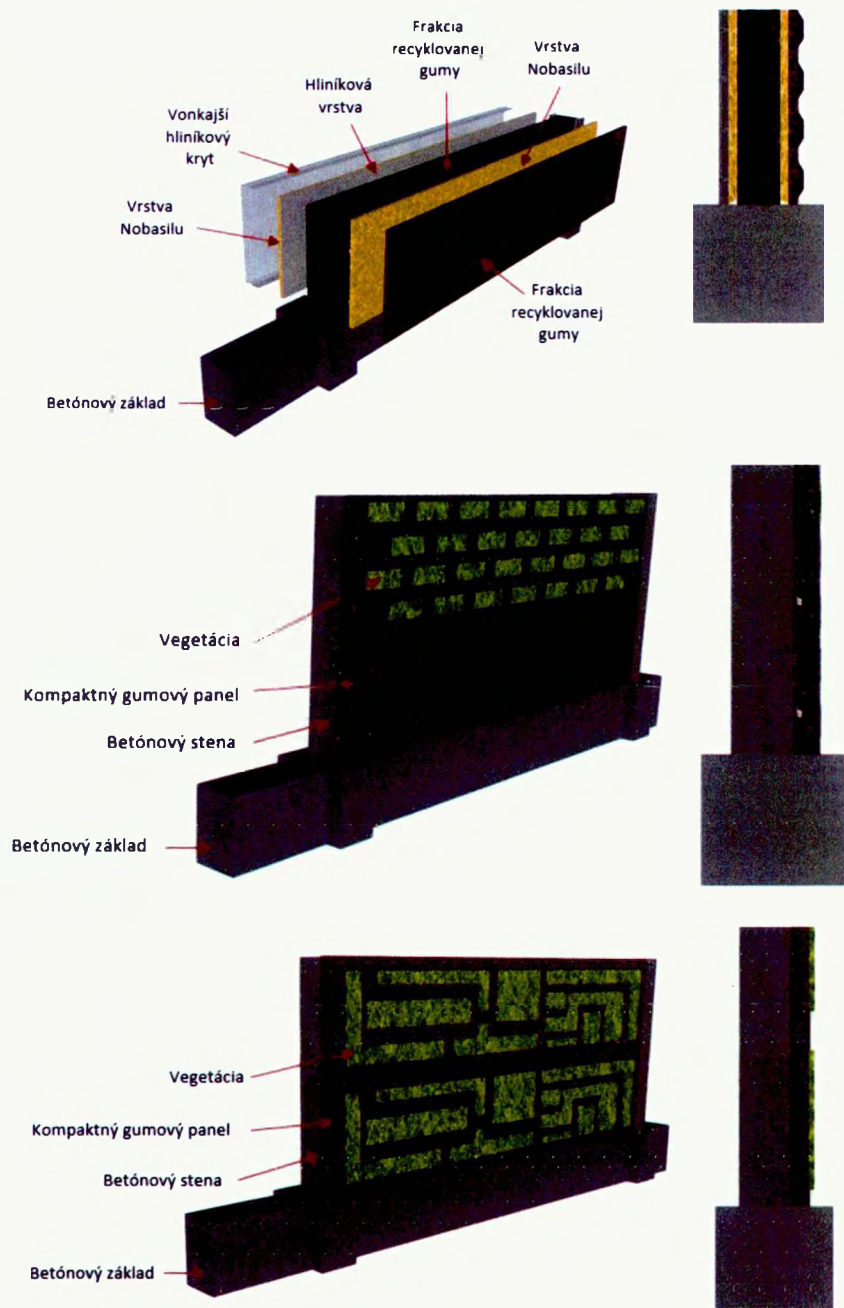
5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov



Obr. 5.47 Čelný a bočný pohľad na navrhnuté protihlukové panely

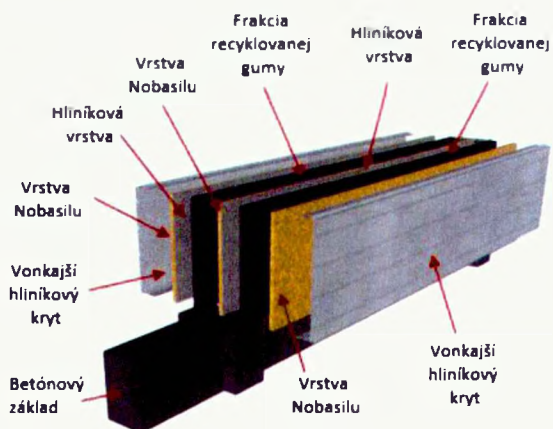
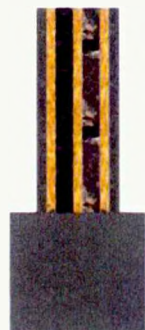
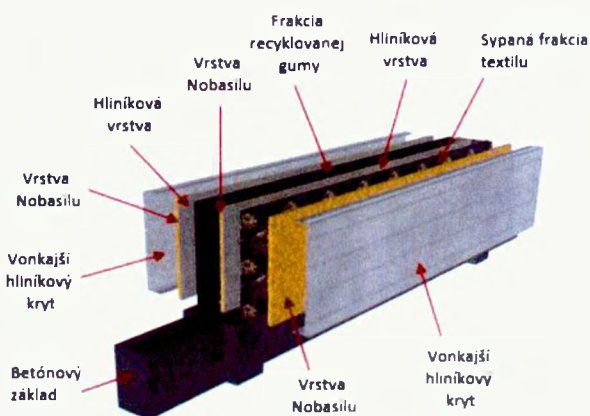
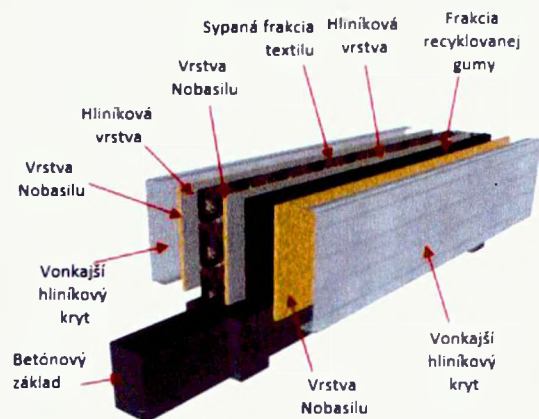


5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov

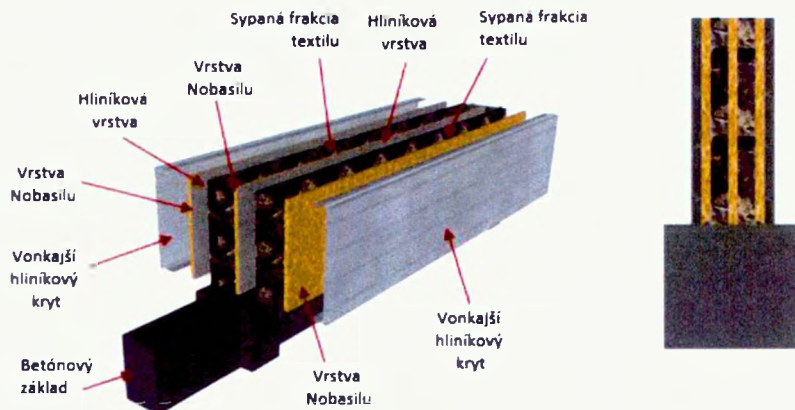


Obr. 5.48 Variantné riešenia protihlukových stien

5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov

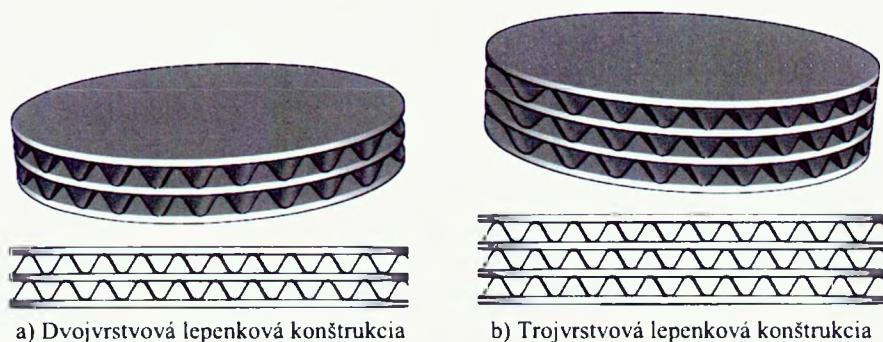


5. Zhodnocovanie problemových odpadov z automobilového priemyslu do zvukovo a tepelno izolačných produktov



Obr. 5.49 Variantné riešenia protihlukových stien

Ďalšou zaujímavou aplikáciou sypaných recyklovaných materiálov je ich využitie ako plniaceho materiálu pri výrobe akustických obkládových dosiek. Konštrukčné návrhy riešiteľov projektu UNIVNET sú uvedené na obr. 5.50.



Obr. 5.50 Lepenkový nosič akustickej obkládovej dosky

Reálny pohľad na fragment akustickej obkládovej dosky je znázornený na nasledujúcom obr. 5.51.



Obr. 5.51 Fragment akustickej obkládovej dosky

5.11 Záver

Riešiteľský kolektív výskumného projektu UNIVNET v roku 2022 stanovil ako hlavný výskumný cieľ analyzovať akustické vlastnosti (koeficient zvukovej pohltivosti α a index útlmu R) kompaktných a sypaných materiálov (voľné sypaných, resp. lisovaných pod zvoleným tlakom) získaných z recyklovaných komponentov automobilov po dobe ich životnosti. Pozornosť sa sústredila na gumový, textilný a sklenený recyklovaný materiál. Vykonané experimentálne merania a následná ich analýza pomocou regresnej a korelačnej analýzy preukázala vhodnosť použitia sypkých materiálov (gumy, skla, textílií) pre použitie v konštrukciách zvukovo a tepelno izolačných produktoch. Riešitelia projektu UNIVNET v príspevku prezentujú aplikácie sypkých materiálov v konštrukciách protihlukových stien a obkladových akustických doskách. Navrhnuté produkty predstavujú originálne technické riešenia. Aplikácia získaných poznatkov do reálnej praxe bude implementovaná v spolupráci so spoločnosťou FORSTER archivna a dopravná technika s.r.o., Bratislava a Národná diaľničná spoločnosť, a.s., Bratislava (protihlukové steny) a spoločnosťou Wolf SYSTEMBAU, spol. s.r.o., Galanta (akustické obkladové dosky).

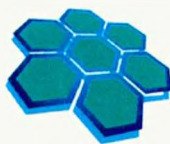
Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol na základe riešenia vedecko-výskumného projektu UNIVNET č.0201/0082/19, ktorý financoval výskumné aktivity.

Literatúra

- [1] BADIDA, M. - SOBOTOVÁ, L. - MORAVEC, M. - DZURO, T.: Environmental Engineering. RAM-Verlag, Lüdenscheid, Germany, 346 p., ISSN 978-3-96595-027-6.
- [2] BADIDA, M. a kol.: Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle, Vydavateľstvo SPEKTRUM STU Bratislava, 2021, s. 267, ISBN 978-80-553-3867-5.
- [3] COHEN, J. - COHEN, P. - WEST, S. G. - & AIKEN, L. S. (2013). Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. Routledge.
- [4] CORREDOR-BEDOYA, A.C. - ACUÑA, B. - SERPA, A. L. - MASIERO, B.: Effect of the excitation signal type on the absorption coefficient measurement using the impedance tube, Applied Acoustics, Volume 171, 2021, 107659, ISSN 0003-682.
- [5] ČÍŠKO, V. - VOKÁL, P.: Regresná a korelačná analýza ako kognoskačná metóda základného a aplikovaného výskumu. Vol. 29, No.1, 42—44, 1995, [online]. [cit 2023-01-20]. Dostupné na internete: http://publikacie.uke.sav.sk/sites/default/files/1995_1_042_044_cisko.pdf
- [6] ĎURIŠ, R. - LABAŠOVÁ, E.: The design of an impedance tube and testing of sound absorption coefficient of selected materials. [online]. [cit 2022-10-11]. Dostupné na internete: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1050/1/012003/pdf>
- [7] KESHARWANI, A. R. - BEDI, A. K. B. AND BAHL, S.: 2020. Experimental study to measure the sound transmission loss of natural fibers at tonal excitations. Materials Today: Proceedings. International Conference on Aspects of Materials Science and Engineering. Chandigarh, India. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.839.
- [8] Kolektív: Úžitkový vzor č. 9662: Kazeta na rozšírenie možnosti merania sypkých materiálov v impedančnej trubici. ÚPV SR Banská Bystrica, 2022.
- [9] Kolektív: Úžitkový vzor č. 9665: Zariadenie na meranie plnenie testovacích kaziet sypkými materiálmi. ÚPV SR Banská Bystrica, 2022.
- [10] NOVÁKOVÁ, A.: Možnosti zhodnocovania problémových odpadov z automobilového priemyslu a spracovania starých vozidiel do zvukovo izolačných produktov. Dizertačná práca, 2023, 182 str.
- [11] PASQUAL, A. M. - LARA, L. T.: 2017 Time-domain simulation of acoustic impedance tubes, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 39 (1) 67-79.
- [12] Rosely, C.V.M. - Silva, R.H.A. - Linhares, T.M. - Rocha, C.M.: The impedance tube construction and acoustic absorption study applied materials inside vehicles. In Proceedings of the 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012; 2012; Roč. 2.
- [13] Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2021. Enviroportal. [online]. [cit 2022-07-19]. Dostupné na internete: <https://www.enviroportal.sk/uploads/report/11401.pdf>
- [14] STN EN ISO 10534-2 (730537) Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method (ISO 10534-2:1998); 2002.
- [15] ŠOOŠ, L. (Ed.): Smart Technologies for Waste Processing from the Automotive Industry. RAM-Verlag, Lüdenscheid, Germany, 2022, 219 p., ISSN 978-396595-023-8.
- [16] WEI-HONG, T. - ROSMAINI, A. - ZUNAIDI, N. H. - DAUD, R. - CHENG, E. M.: 2015 Development of an Indigenous Impedance Tube Appl. Mech. Mater. 786 149-55 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.786.149.

- [17] Inoue, N.; Sakuma, T. Numerical investigation of effect of support conditions of poroelastic materials in impedance tube measurement, *Acoust. Sci. Tech.*, 38 (4) (2017), pp. 213-221.



Zhodnotenie odpadových polymérov z automobilového priemyslu v drevných kompozitných materiáloch



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Riešiteľský kolektív:
Technická univerzita vo Zvolene

Hlavný riešiteľ:
prof. Ing. Jozef Krilek, PhD.

Riešitelia:
Doc. Ing. Iveta Čabalová, PhD.
Doc. Ing. Marek Potkány, PhD.
Doc. Ing. Helena Hybská, PhD.
Ing. Vladimír Mancel
Ing. Anna Darabošová
Ing. Mária Osvaldová

6 Zhodnotenie odpadových polymérov z automobilového priemyslu v drevných kompozitných materiáloch

6.1 Úvod

Kombinovanými kompozitnými materiálmi, kde sa miešali drevné častice s odpadovou gumou sa zaoberalo viacero výskumných tímov [1,2,3]. Autori sa zaoberali charakterizáciou parametrov procesu lisovania za tepla a mechanickými vlastnosťmi zmesi. Za optimálne technologické parametre technológie lisovania za tepla boli stanovené parametre, ako hustota dosky 800 kg.m^{-3} , obsah živice 3 %, teplota = 160°C , doba lisovania 7 min a obsah odpadovej gumy 30 %. Pri týchto parametroch dosahuje zmes s kaučukom rovnaké mechanické vlastnosti ako drevotrieskové dosky. Gumové častice sa zmiešali s rôznymi koncentraciami LDPE (Low Density Polyethylene) živice do drevotrieskovej dosky, s cieľom zlepšiť mechanické vlastnosti kompozitu [4]. Výsledky ukázali, že kompozit zlepšuje obsah vlhkosti, absorpciu vody a napučiavanie v hrúbke materiálu, avšak nie všetky mechanické vlastnosti, napr. modul pružnosti (MOE) a povrchovú tvrdosť (SH). Parametrom, ktorý sa pridaním gumy + LDPE živice nezmenil, bola vnútorná väzba. Najlepšie mechanické vlastnosti kompozitu boli získané pri 5 % prídavku LDPE živice. Shao et al. [5] študovali možnosti nahradenia gumených zmesí regenerovanou gumou z odpadových pneumatík (RR) plnenou drevenými vláknami. Autori použili 0 % až 40 % množstvo RR, časy miešania medzi 6 minútami a 14 minútami a vulkanizačné teploty medzi 150 a 170°C . Autori zistili, že 20 % množstvo gumy zvyšuje pevnosť v ťahu o 33,9 %, teda tieto zmesi majú znížené hodnoty napučiavania v hrúbke materiálu v toluéne o 13 % a absorpciu vody o 42 %. Xu et al. [6] sledovali zmeny termofyzikálnych vlastností kompozitov, pričom pridali drewný prášok do matrice gumovej zmesi získanej z odpadových pneumatík. Študovali len mechanické vlastnosti a zistili, že prídanie 50 % dreveného prášku zvyšuje tvrdosť o 53 % oproti referenčnej vzorke, ktorou bola gumová zmes. Autori v článku Shao et al. [7] pridali drewné vlákna do kaučukových zmesí a finálne kompozity boli pripravené vulkanizačným lisovaním. Obsah drewných vlákien bol medzi 0 % a 50 % a otáčky rotora boli medzi 15 a 45 ot./min. Hoci výhodou kompozitu je zníženie pevnosti v ťahu, predĺženie pri pretrhnutí a odrazová pružnosť konečného kompozitu ukazujú zvýšenie tvrdosti gumy v oblasti medzi 17 % a 58 %. Absorpcia vody za 24 hodín bola iba 1 % až 3 %.

Cieľom tejto výskumnej úlohy bolo vyhodnotiť fyzikálno-chemické vlastnosti novovytvorených drewných kompozitných dosiek s obsahom gumy a porovnať dosiahnuté výsledky s bežnou drevotrieskovou doskou.

6.2 Príprava kompozitov

6.2.1 Použitý materiál na výrobu kompozitných dosiek drevo-guma

- Granulát z odpadovej pneumatiky – „GP“ – veľkosť od 1,0 do 4,0 mm. Granulát pozostáva zo spracovaného materiálu SBR (Styrén-Butadiénový kaučuk).
- Granulát z odpadovej gumy – „GG“ (koberce, izolácie) - veľkosť od 1,0 do 4,0 mm. Granulát pozostáva zo zmesi spracovaných materiálov: polyester, sklenené vlákna, polyuretán, papier, EPDM (Etylén Propylén Dién Monomér)
- Granulát z odpadovej gumy a pneumatík z vyradených automobilov poskytol podnik AVE SK-Kechnec, závod Slovensko.
- Drewné častice, pripravené z čerstvej smrekovej guľatiny, boli v experimente spracované v spoločnosti Kronospan s.r.o, Zvolen, SR. Rozmery častíc bežne

používaných pre stredovú vrstvu a vybraných na výrobu jednovrstvových drevotrieskových dosiek boli od 0,25 do 4,0 mm. Častice sa vysušili na obsah vlhkosti 4 %.

- Zloženie adhéznejs zmesi: Močovino-formaldehydová (UF) živica Kronores CB 1100 F (Diakol Strážske s.r.o., Strážske, Slovensko), lepidlo, ktoré bolo použité na spojenie drevených častíc a drvenej gumy má obsah pevnej látky 67,1 %, viskozitu 460 mPa·s, čas kondenzácie 55 sekúnd a hodnotu pH 8,6. Do lepiacej zmesi bol pridaný dusičnan amónny NH_4NO_3 (47 %) ako tvrdidlo. Parafín, použitý ako 35 % hmotnosti vodnej emulzie, bol aplikovaný na častice v množstvách 0,6 %.

6.2.2 Sitová analýza

Objektom výskumu boli granuláty vyrobené zo starých plastových a gumených komponentov z automobilového priemyslu. Jednotlivé granuláty boli vyrobené zo starých lakovaných nárazníkov, nelakovaných nárazníkov, palivových nádrží, pneumatík a kombinácie automobilových tesnení a kobercov. Cieľom tejto časti výskumu bolo analyzovanie jednotlivých vzoriek granulátov sitovou analýzou. Pomocou sitovej analýzy bola overená veľkosť frakcií jednotlivých granulátov, ktorú uvádzali ich výrobcovia.

Sitová analýza je najstaršou, najjednoduchšou a najlacnejšou metódou zisťovania veľkosti častíc tuhých látok. Táto metóda patrí do úzkej skupiny tzv. frakcionačných alebo separačných techník analýzy veľkosti častíc. Je založená na využití sady sít so známou veľkosťou otvorov, ktorá sa zostavuje v smere gravitačného transportu analyzovanej látky do bloku s postupne zmenšujúcou sa veľkosťou otvorov. Na každom site je zachytená konkrétna frakcia ako zlomok celkovej analyzovanej vzorky. Štandardná laboratórna verzia používa sítu s priemerom 200 mm s dnom z tkaného drôtu v rozsahu otvorov 20 μm až 1 mm a viac [8,9].

Tuhé látky sa môžu analyzovať buď v suchom stave alebo vo forme suspenzie. Po ukončení frakcionácie na každom site zostáva určitá časť z pôvodnej vzorky, ktorá obsahuje častice v medziach určených veľkosťou otvorov horného a dolného sita. Zvyšok na site sa zváži a výsledok sa vyhodnocuje ako hmotnosť skupín s definovaným rozmedzím veľkosti častíc [10]. Distribúcia veľkosti častíc má často zásadný význam pre spôsob, akým materiál funguje pri použití. Sitovú analýzu možno vykonať na akomkoľvek type neorganických alebo organických zrnitých materiáloch vrátane piesku, drveného kameňa, uhlia, pôdy, širokej škály vyrábaného prášku, obilia a semien, až po minimálnu veľkosť v závislosti na presnú metódu. Keďže ide o jednoduchú techniku určovania veľkosti častíc, je pravdepodobne najbežnejšou a najpoužívanejšou metódou [9].

Metódy sitovej analýzy

Metódy stanovenia veľkosti častíc na sitách zahŕňujú veľký počet známych postupov, ktoré možno rozdeliť na základe rôznych kritérií. Ako najbežnejšie kritériá sa pre klasifikáciu týchto metód používajú tieto [8]:

- typ média, ktoré sa pri separácii tuhej látky využíva – plynné (najčastejšie vzduch) alebo kvapalné (najčastejšie voda),
- charakteristika média – stacionárne alebo pohyblivé,
- stav sít pri analýze – pohybujúce sa alebo statické,
- rozsah veľkosti otvorov v sitách – bežné sítu (otvory od 100 μm do 6 cm) alebo mikrosítu (otvory od 3 μm do 100 μm).

Analytické sitovacie zariadenie

Pre sitovú analýzu bolo použité analytické sitovacie zariadenie AS 200 digit cA (obr. 6.1) od firmy Retsch. Zariadenie sa používa v oblastiach výskumu a vývoja, pri kvalitatívnej kontrole surovín, medzikontrola a kontrole koncových výrobkov a tiež ku kontrole výrobného procesu. Regulovateľný elektromagnetický pohon ponúka optimálnu adaptáciu pre každý výrobok. Ostré frakcie je možné získať po krátkej dobe sitovania. Model sitovacieho zariadenia AS 200 digit cA sa odporúča tam, kde sa vyžaduje riadená amplitúda, digitálne zobrazenie výšky vibrácií a času a intervalová prevádzka [11]. Technické parametre analytického sitovacieho zariadenia sú uvedené v tabuľke (tab. 6.1)



Obr. 6.1 Analytické sitovacie zariadenie AS 200 digit tA

Tab. 6.1 Technické parametre analytického sitovacieho zariadenia AS 200 digit cA [11]

Rozsah meradla	20 μ m – 25 mm
Amplitúda	digitálna, 0,2 – 3,0 mm
Zobrazovanie času	digitálne, 1 – 99 min
Vhodné priemery sít	100 mm / 150 mm / 200 mm / 203 mm
Maximálna výška sady sít	450 mm
Rozmery (š x v x h)	417 x 212 x 384 mm
Hmotnosť	35 kg

Digitálna váha

Pre zisťovanie hmotností jednotlivých frakcií bola použitá digitálna váha AG2000C (obr. 6.2) od firmy Axis. Váha disponuje digitálnym LCD displejom a základnou sadou kláves. Táto váha má mechanický kalibračný systém s vnútorným závažím, ktorý zaisťuje presnosť meraní počas prevádzky bez zásahu užívateľa. Technické parametre digitálnej váhy sú uvedené v tabuľke (tab. 6.2).



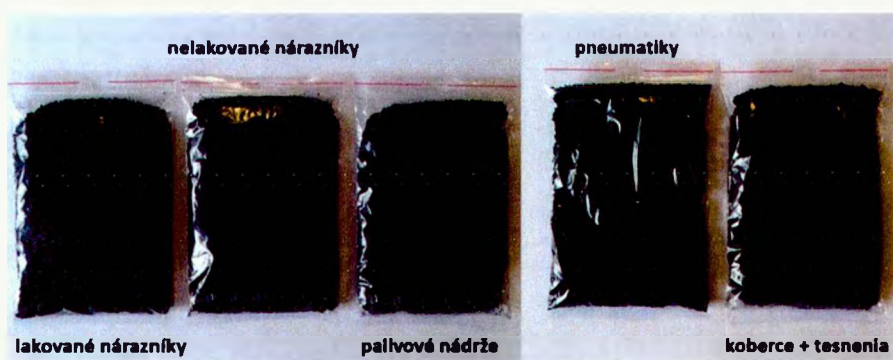
Obr. 6.2 Digitálne váhy AG2000C

Tab. 6.2 Technické parametre digitálnej váhy [12]

Pracovná teplota	18 – 33 °C
Rozsah váživosti	2 000 g
Odčítavacia odchýlka	0,01 g
Rozmer podložky (š x v)	165 x 165 mm
Celková hmotnosť váhy	5 kg
Rozmery (š x v x h)	215 x 345 x 90 mm
Napájací zdroj	12 V, 800 mA

Materiál

Materiálom, ktorý sa pomocou sitovej analýzy vyhodnocoval, boli granuláty (obr. 6.3) vyrobené zo starých lakovaných a nelakovaných nárazníkov, palivových nádrží, pneumatík a kombinácie automobilových tesnení a kobercov.



Obr. 6.3 Vzorky granulátov

Lakované a nelakované nárazníky boli vyrobené primárne z polypropylénu (PP), palivové nádrže z polyetylénu (PE), pneumatiky z prírodného kaučuku (NR) a styrenbutadiénového kaučuku (SBR) a kombinácia tesnení a kobercov z nitrilbutadiénového kaučuku (NBR) a etylénpropyléndiénového kaučuku (EPDM). Plastové granuláty boli vyrobené v dielňach Technickej univerzity vo Zvolene. Gumené granuláty boli spracované a dodané firmou AVE SK

Odpadové hospodárstvo s.r.o. (Kechnec). Jednotlivé vzorky granulátov, ktoré boli použité na sitovú analýzu, mali hmotnosť približne 300 g.

Pracovný postup

Metodika merania spočívala v presitovaní kompletnej vzorky jednotlivých granulátov (obr. 6.4). Každá vzorka bola podrobená sitovej analýze 10 minút pri amplitúde 1 mm podľa technickej normy EN 15149-1 [13]. Pri analýze boli použité sitá podľa technickej normy ISO 3310-1 [14] s veľkosťami ôk 1 mm, 2 mm, 3,15 mm, 4 mm a 5 mm. Na začiatku boli všetky sitá a zberná nádoba osobitne odvážené, následne boli na seba poukladané od najmenšieho priemeru. Po každej sitovej analýze boli jednotlivé sitá spolu s presitovanou vzorkou znovu odvážené a výsledné hodnoty boli zapísané do tabuliek. Výsledné hodnoty boli následne spracované do grafov.



Obr. 6.4 Sitovacie zariadenie

Vyhodnotenie výsledkov

Vyhodnotenie sa zameriava na spracovanie hodnôt frakcií jednotlivých granulátov vo forme tabuliek a grafov. V grafoch sú uvedené jednotlivé frakcie spolu s percentuálnym zastúpením v analyzovaných vzorkách.

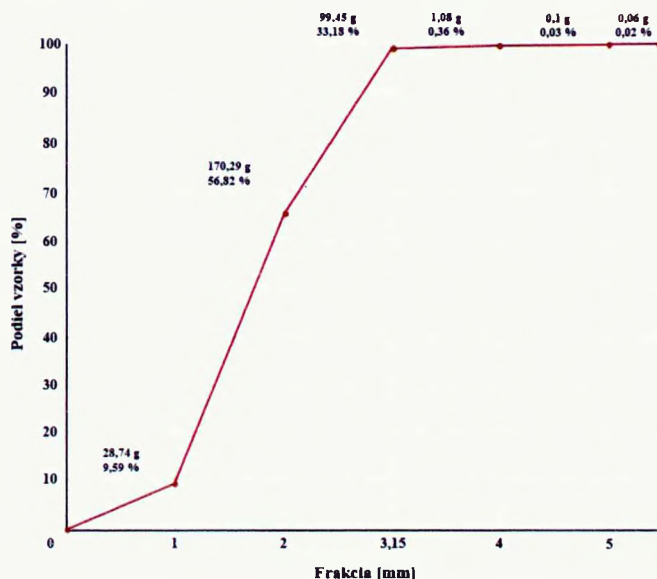
Lakované nárazníky

Výsledné hodnoty frakcií granulátu zo starých lakovaných nárazníkov sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 6.3) a podiel frakcií granulátu zo starých lakovaných nárazníkov reprezentuje graf na nasledujúcom obrázku (obr. 6.5).

Z výsledkov sitovej analýzy granulátu, získaného zo starých lakovaných nárazníkov, možno konštatovať, že najväčšie percentuálne zastúpenie vo vzorke má frakcia v rozmedzí od 1,0 do 2,0 mm, a to konkrétne 56,82 %. Podiel granulátu frakcie 1,0 – 4,0 mm predstavoval 90,36 % z celkovej analyzovanej vzorky. Podiel granulátu frakcie väčšej ako 4,0 mm bol v minimálnej miere. Analýza tiež ukázala zastúpenie frakcie menšej ako 1,0 mm, a to konkrétne 9,59 %.

Tab. 6.3 Výsledky sitovej analýzy granulátu z lakovaných nárazníkov

Frakcia [mm]	Hmotnosť sita + vzorky [g]	Hmotnosť sita [g]	Hmotnosť vzorky [g]	Podiel vzorky [%]
< 1	417,75	389,01	28,74	9,59
1 - 2	506,78	336,49	170,29	56,82
2 - 3,15	608,99	509,54	99,45	33,18
3,15 - 4	535,23	534,15	1,08	0,36
4 - 5	515,19	515,09	0,1	0,03
5 <	380,6	380,54	0,06	0,02
Celková hmotnosť granulátu			299,72	100



Obr. 6.5 Podiel frakcií granulátu zo starých lakovaných nárazníkov

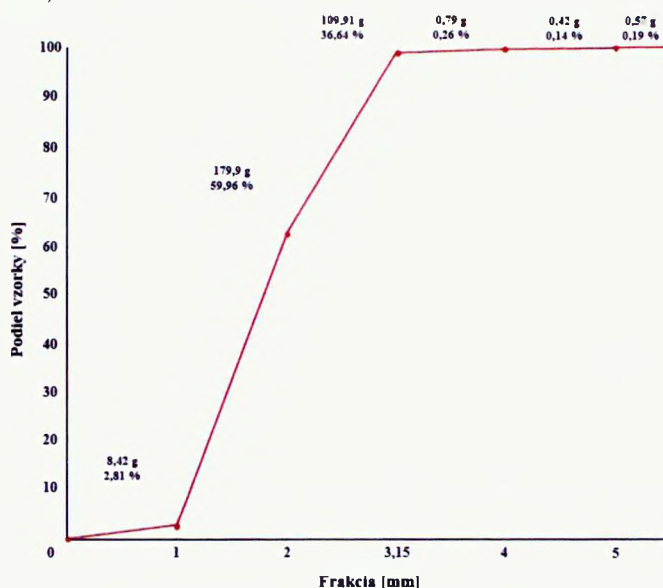
Nelakované nárazníky

Výsledné hodnoty frakcií granulátu zo starých nelakovaných nárazníkov sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 6.4).

Tab. 6.4 Výsledky sitovej analýzy granulátu z nelakovaných nárazníkov

Frakcia [mm]	Hmotnosť sita + vzorky [g]	Hmotnosť sita [g]	Hmotnosť vzorky [g]	Podiel vzorky [%]
< 1	397,43	389,01	8,42	2,81
1 - 2	516,39	336,49	179,9	59,96
2 - 3,15	619,45	509,54	109,91	36,64
3,15 - 4	534,94	534,15	0,79	0,26
4 - 5	515,51	515,09	0,42	0,14
5 <	381,11	380,54	0,57	0,19
Celková hmotnosť granulátu			300,01	100

Podiel frakcií granulátu zo starých nelakovaných nárazníkov reprezentuje graf na nasledujúcom obrázku (obr. 6.6).



Obr. 6.6 Podiel frakcií granulátu zo starých nelakovaných nárazníkov

Z výsledkov sitovej analýzy granulátu, získaného zo starých nelakovaných nárazníkov, možno konštatovať, že najväčšie percentuálne zastúpenie vo vzorke má frakcia v rozmedzí od 1,0 do 2,0 mm, a to konkrétne 59,96 %. Podiel granulátu frakcie 1,0 – 4,0 mm predstavoval 96,86 % z celkovej analyzovanej vzorky. Podiel granulátu frakcie väčšej ako 4,0 mm bol v minimálnej miere. Analýza tiež ukázala zastúpenie frakcie menšej ako 1,0 mm, a to konkrétne 2,81 %.

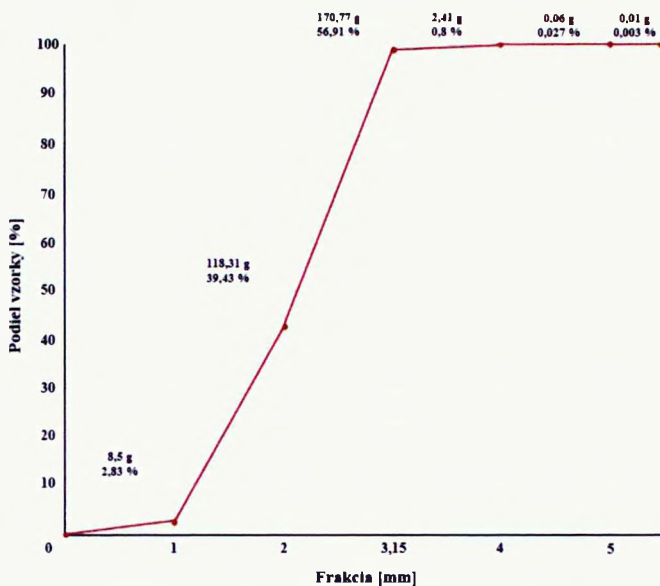
Palivové nádrže

Výsledné hodnoty frakcií granulátu zo starých palivových nádrží sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 6.5).

Tab. 6.5 Výsledky sitovej analýzy granulátu z palivových nádrží

Frakcia [mm]	Hmotnosť sita + vzorky [g]	Hmotnosť sita [g]	Hmotnosť vzorky [g]	Podiel vzorky [%]
< 1	397,51	389,01	8,5	2,83
1 - 2	454,8	336,49	118,31	39,43
2 - 3,15	680,31	509,54	170,77	56,91
3,15 - 4	536,56	534,15	2,41	0,80
4 - 5	515,15	515,09	0,06	0,027
5 <	380,55	380,54	0,01	0,003
Celková hmotnosť granulátu			300,06	100

Podiel frakcií granulátu zo starých palivových nádrží reprezentuje graf na nasledujúcom obrázku (obr. 6.7).



Obr. 6.7 Podiel frakcií granulátu zo starých palivových nádrží

Z výsledkov sitovej analýzy granulátu, získaného zo starých palivových nádrží, možno konštatovať, že najväčšie percentuálne zastúpenie vo vzorke má frakcia v rozmedzí od 1,0 do 2,0 mm, a to konkrétne 56,91 %. Podiel granulátu frakcie 1,0 – 4,0 mm predstavoval 97,14 % z celkovej analyzovanej vzorky. Podiel granulátu frakcie väčšej ako 4,0 mm bol v minimálnej miere. Analýza tiež ukázala zastúpenie frakcie menšej ako 1,0 mm, a to konkrétne 2,83 %.

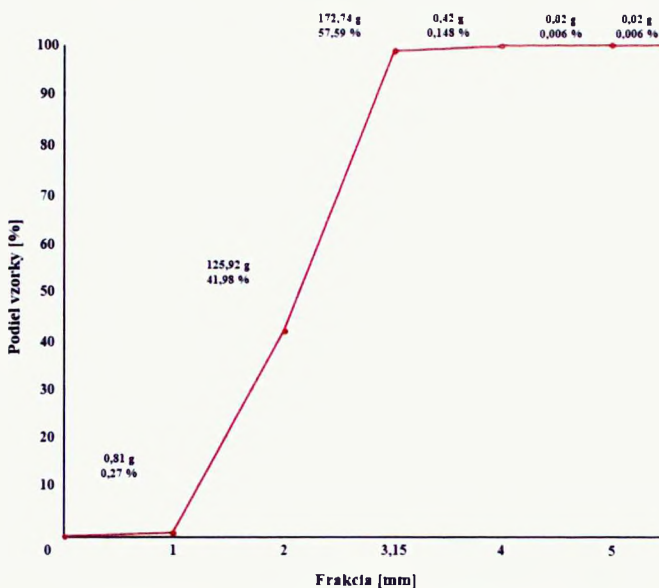
Pneumatiky

Výsledné hodnoty frakcií granulátu zo starých pneumatík sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 6.6).

Tab. 6.6 Výsledky sitovej analýzy granulátu zo starých pneumatík

Frakcia [mm]	Hmotnosť sita + vzorky [g]	Hmotnosť sita [g]	Hmotnosť vzorky [g]	Podiel vzorky [%]
< 1	389,82	389,01	0,81	0,27
1 - 2	462,41	336,49	125,92	41,98
2 - 3,15	682,28	509,54	172,74	57,59
3,15 - 4	534,57	534,15	0,42	0,148
4 - 5	551,11	551,09	0,02	0,006
5 <	380,56	380,54	0,02	0,006
Celková hmotnosť granulátu			299,93	100

Podiel frakcií granulátu zo starých pneumatík reprezentuje graf na nasledujúcom obrázku (obr. 6.8).



Obr. 6.8 Podiel frakcií granulátu zo starých pneumatík

Z výsledkov sitovej analýzy granulátu, získaného zo starých pneumatík, možno konštatovať, že najväčšie percentuálne zastúpenie vo vzorke má frakcia v rozmedzí od 2,0 do 3,15 mm, a to konkrétne 57,59 %. Dodávateľ uvádzal veľkosť granulátu v rozmedzí od 1,0 do 3,0 mm, čo bolo pomocou sitovej analýzy potvrdené. Podiel granulátu frakcie 1,0 – 3,15 mm predstavoval 99,57 % z celkovej analyzovanej vzorky. Podiel granulátu frakcie väčšej ako 3,15 mm bol v minimálnej miere. Analýza tiež ukázala minimálne zastúpenie frakcie menšej ako 1,0 mm, a to konkrétne 0,27 %.

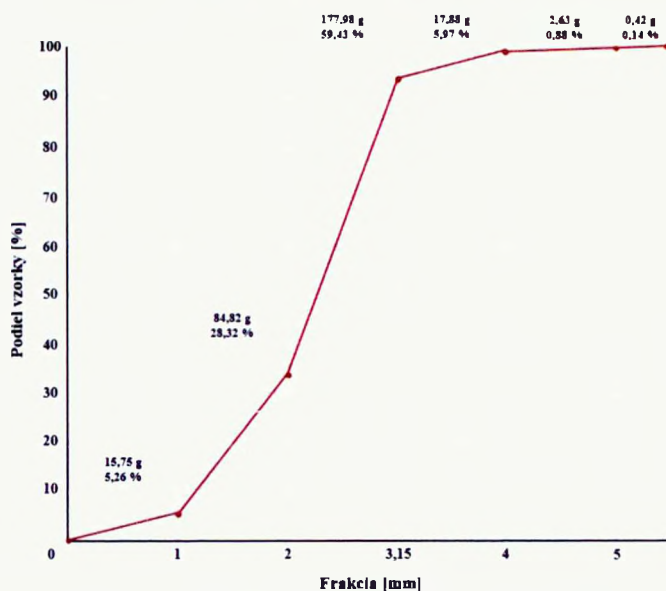
Tesnenia + koberce

Výsledné hodnoty frakcií granulátu z tesnení a kobercov sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 6.7).

Tab. 6.7 Výsledky sitovej analýzy granulátu z tesnení a kobercov

Frakcia [mm]	Hmotnosť sita + vzorky [g]	Hmotnosť sita [g]	Hmotnosť vzorky [g]	Podiel vzorky [%]
< 1	404,76	389,01	15,75	5,26
1 - 2	421,31	336,49	84,82	28,32
2 - 3,15	687,52	509,54	177,98	59,43
3,15 - 4	552,03	534,15	17,88	5,97
4 - 5	517,72	515,09	2,63	0,88
5 <	380,96	380,54	0,42	0,14
Celková hmotnosť granulátu			299,48	100

Podiel frakcií granulátu zo starých tesnení a kobercov reprezentuje graf na nasledujúcom obrázku (obr. 6.9).



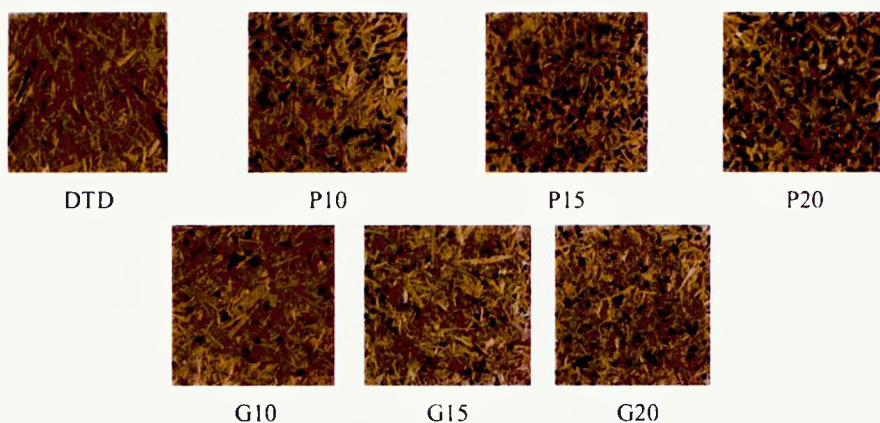
Obr. 6.9 Podiel frakcií granulátu zo starých tesnení a kobercov

6.2.3 Výroba kompozitov drevo-guma

Na lisovanie jednovrstvových drevotrieskových dosiek s prídavkom drvenej gumy/pneumatiky bola použitá komerčne dostupná močovino-formaldehydová (UF) živica. Adhézna zmes bola pridaná k časticiam v množstve 11 % hmotnosti. Použitým materiálom bola drvená guma, ktorá bola spomenutá v časti materiál. Jednovrstvová drevotriesková doska s prídavkom drvenej odpadovej gumy mala rozmery 360 mm x 280 mm x 15 mm a bola pripravená v laboratóriách Technickej univerzity vo Zvolene. Obsah vlhkosti častíc zmiešaných s UF živicami bol 9,5 %. Drevotrieskové dosky boli pripravené bežnou technológiou, t.j. najprv predlisovaním časticových rohoží za studena na 1 MPa a následným lisovaním za tepla v tlaku (laboratórny lis CBJ 100–11, TOS, Rakovník, bývalá ČSSR) pri maximálnej teplote lisovanie dosiek v lise 230 °C, maximálny lisovací tlak 6,50 MPa a celkový lisovací čas 356 s, ktorý musel byť dlhší ako pri bežnej výrobe celodrevených drevotrieskových dosiek z dôvodu prítomnosti drvenej odpadovej gumy. Bolo vyrobených 6 dosiek z každého druhu s priemernou hustotou od 554 do 615 kg·m⁻³ (obr. 6.10, tab. 6.8).

Tab. 6.8 Označenie kompozitov

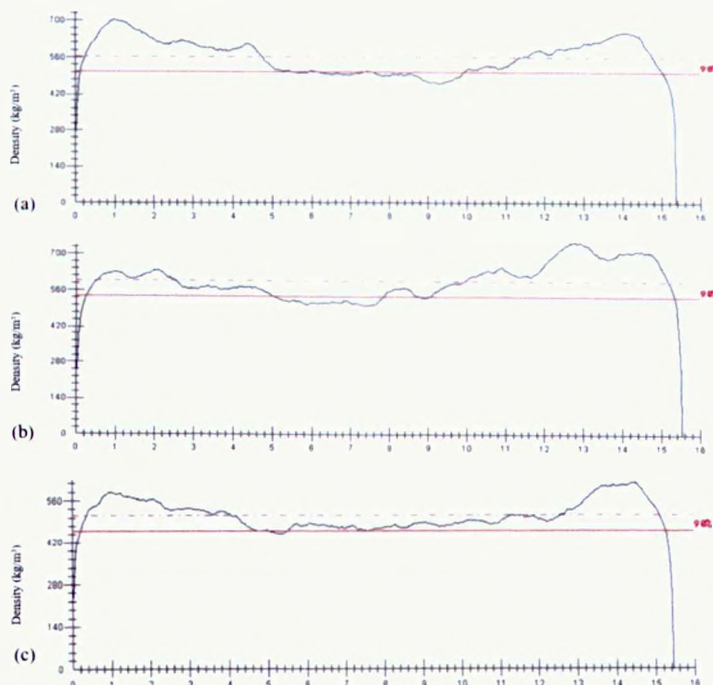
Označenie vzoriek	Charakterizácia kompozitov
DTD	Drevotriesková doska
P10 (T10)	Drevotriesková doska s obsahom GP v podiele 10 %
P15 (T15)	Drevotriesková doska s obsahom GP v podiele 15 %
P20 (T20)	Drevotriesková doska s obsahom GP v podiele 20 %
G10 (R10)	Drevotriesková doska s obsahom GG v podiele 10 %
G15 (R15)	Drevotriesková doska s obsahom GG v podiele 15 %
G20 (R20)	Drevotriesková doska s obsahom GG v podiele 20 %



Obr. 6.10 Vzorky kompozitov

6.3 Hustotný profil drevotrieskových dosiek s obsahom gumy

Vzorky drevotrieskových dosiek sa analyzovali na profil hustoty pomocou DENSE-LAB X Laboratory Density Profile Analyzer (METTLER TOLEDO, Columbus, Ohio, Spojené štáty americké) vo Fibre and Biocomposite Center (FIDEC), Olak Lempit, Selangor, Malajzia. Profily hustoty kontrolnej drevotrieskovej dosky a drevotrieskovej dosky s obsahom 20% gumy a 20 % pneumatík sú znázornené na obr. 6.11. Vzorky mali typický profil hustoty v tvare písmena U pre drevotrieskové dosky, čo naznačuje pravidelný gradient hustoty cez hrúbku panelu [15]. Vrstva jadra mala najnižšiu hustotu, zatiaľ čo v oboch vonkajších vrstvách boli pozorované dve maximálne hustoty.



Obr. 6.11 Typický profil hustoty (density) vzorky drevotrieskovej dosky: (a) kontrolná, (b) 20 % gumy, (c) 20 % pneumatiky

Priemerná hustota kontrolnej drevotrieskovej dosky bola $562,35 \text{ kg.m}^{-3}$. Pridanie 10 % pneumatiky mierne zvýšilo jej priemernú hustotu na $567,06 \text{ kg.m}^{-3}$, ale začala sa znižovať, keď sa pridalo 15 % ($567,06 \text{ kg.m}^{-3}$) a 20 % ($554,66 \text{ kg.m}^{-3}$) drviny z pneumatiky. Naopak, všetky drevotrieskové dosky s pridanou gumou majú vyššiu strednú hustotu v porovnaní s kontrolnou doskou, ktorej hustota sa pohybuje od 597,13 do $614,87 \text{ kg.m}^{-3}$. Výsledky sú očakávané, pretože guma má vyššiu hustotu ako pneumatika. Priemerná maximálna hustota kontrolnej dosky je $681,30 \text{ kg.m}^{-3}$. Drevotriesková doska s prídavkom 10 až 20 % gummy mala vyšší pik priemernej hustoty ako kontrolná doska. V prípade drevotrieskových dosiek s obsahom drviny z pneumatiky mali vyšší pik priemernej hustoty, v porovnaní s kontrolnou doskou, len tie, ktoré obsahovali 15 % plnidla.

6.4 Analýza prchavých organických zlúčenín látok (VOC) metódou GC-MS

Analýzy VOC sa uskutočnili pomocou zariadenia Agilent 7890A GC/5975C MSD (Agilent, Santa Clara, USA) s Agilent Headspace Autosampler 7697A (Agilent, Santa Clara, USA).

Novo pripravované materiály by počas svojho životného cyklu nemali ohrozovať zdravie a bezpečnosť pracovníkov, obyvateľov ani životné prostredie. Pre komplexný pohľad na vlastnosti pripravených drevotrieskových dosiek boli preto pomocou metódy HS-GC-MS analyzované aj VOC emitujúce z pripravených materiálov. Boli vykonané 4 testy pri rôznych teplotách. V prvom teste boli VOC emitované z pripravených DTD s rôznym obsahom gummy a pneumatiky analyzované pri 30°C (teplota, ktorá je bežná v lete a vo vnútri budov). Pri iných skúškach pri teplotách 60°C , 80°C a 100°C (teploty, ktoré materiály dosahujú napr. v letnej sezóne (vonkajšie fasády budov) alebo v iniciačných fázach požiaru, keď sa materiál len zahrieva a začne sa tepelná degradácia). Na porovnanie boli analyzované aj VOC emitované z drevotrieskových dosiek bez gumového plnidla, ako aj granulát z odpadovej gummy a granulát z odpadových pneumatík.

Tab. 6.9 uvádza zoznam identifikovaných VOC, ktoré sa uvoľnili z pripravených DTD s rôznym obsahom gummy a pneumatiky pri teplotách 80°C (TEST 3) a 100°C (TEST 4). Pri nižších teplotách 30°C (TEST 1) a 60°C (TEST 2) neboli metódou GC/MS identifikované VOC, ktoré by sa uvoľňovali či už zo samotných drevotrieskových dosiek, ako aj z drevotrieskových dosiek s rôznym obsahom gumového plnidla. Baumann et al. [16] uvádzajú emisiu napríklad formaldehydu z DTD, pričom v našich vzorkách detegovaný nebol.

Samotný gumový granulát tiež veľmi neprispieva k tvorbe VOC pri nižších teplotách, dokonca ani pri 80°C neboli analyzované žiadne VOC, ktoré sa z neho uvoľňujú. Iba pri 100°C bol v emitujúcich látkach identifikovaný α -pinén. α -pinén (2,6,6-trimetylbicyklo-hept-2-én) je prchavý monoterpén, ktorý sa nachádza v olejoch mnohých druhov ihličnanov a v esenciálnych olejoch niektorých rastlín, ako je rozmarín. Je to jedna z hlavných prchavých organických zlúčenín, ktoré do ovzdušia vypúšťa drevospracujúci priemysel. Je dráždivý, dráždi oči, pokožku a dýchacie cesty [17]. α -pinén je tiež súčasťou živíc, ktoré sa používajú ako zmäkčovadlo pri výrobe elastomérov, ako je styrén-butadiénový kaučuk.

Pneumatiky sú náchylnejšie na tvorbu VOC. Pri 80°C sa uvoľňoval metylizobutylketón a pri 100°C aj toluén, cyklohexanón a tiež α -pinén. Metylizobutylketón sa používa ako rozpúšťadlo pre živice, farby a laky a používa sa aj v gumárenskom priemysle pri výrobe pneumatík. Je klasifikovaný ako dráždivý a patrí do skupiny 2B možných ľudských karcinogénov [18]. Cyklohexanón je dráždivá látka, ktorá môže spôsobiť vážne poškodenie očí. Toluén dráždi pokožku, oči, má negatívny vplyv na CNS, je klasifikovaný ako Repr.2 (podozrenie z poškodenia nenarodeného dieťaťa).

Tab. 6.9 Zoznam identifikovaných VOC z drevotrieskových dosiek (Rt – retenčný čas)

Rt (min)	VOCs	DTD		G		G10		G15		G20		P		P10		P15		P20	
		80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C	80 °C	100 °C
3,183	Methyl Isobutyl Ketone																		
3,467	Toluene	x	x											x	x	x	x	x	x
4,144	Hexanal		x							x									x
6,2	Cyclohexanone													x					x
6,792	Tricyclene		x												x				x
6,969	α -Thujene		x												x				x
7,102	α -Pinene	x	x		x		x		x		x			x	x		x		x
7,531	Camphene		x								x				x				x
7,709	Dehydroabietene		x								x				x				x
8,285	β -Pinene	x	x							x				x	x		x		x
9,291	3-carene	x	x							x				x	x				x

Zo samotnej DTD sa pri 80 °C okrem toluénu uvoľnil aj α -pinén a 3-karén, ku ktorým sa pridali ďalšie prchavé terpény a aldehydhexanal. Z prchavých látok mal vo všetkých vzorkách s obsahom DTD dominantné zastúpenie α -pinén. Vo vzorkách DTD bez pridania granulátu predstavoval až 79 % emisií VOC. Bauman et al. [17] tiež stanovili hexanal a iné karbonylové zlúčeniny v VOC emitovaných z rôznych drevotrieskových dosiek. Do lepidiel používaných na lepenie dreva sa však s výnimkou formaldehydu aldehydy nepridávajú. Za prítomnosť

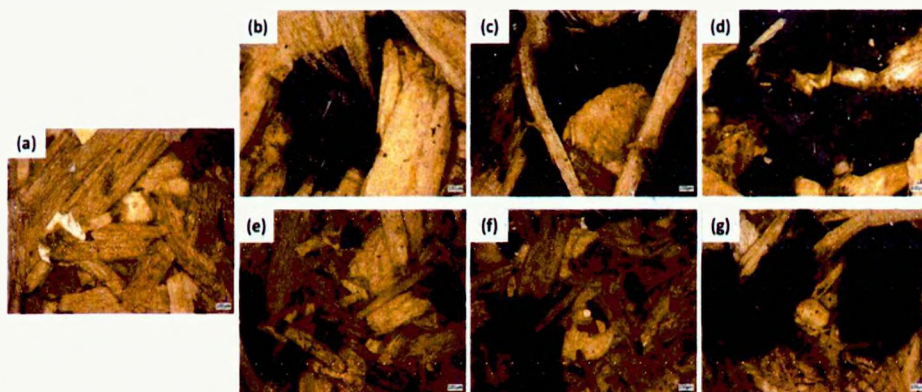
aldehydov je pravdepodobne zodpovedná degradácia samotného dreva alebo jeho sekundárnych metabolitov [17].

Granulát z pneumatík pridaný do vzoriek DTD prispel k širšej variabilite identifikovaných VOC, ale pravdepodobne aj k zvýšeniu množstva emisií VOC, pretože ich obsah vo vzorke P20 (merané pri 100 °C) bol 6-krát väčší.

Vo vzorkách G10, G15 a G20 sa predpokladalo, že v emisiách bude zistená prítomnosť všetkých látok identifikovaných počas analýzy VOC vzoriek DTD. Výsledky pri 80 °C neboli v emisiách identifikované žiadne iné prchavé organické zlúčeniny okrem α -pinénu. Pri analýze VOC pri 100 °C neboli medzi VOC identifikované terpény tricyklén a α -thujen. Je pravdepodobné, že nahradenie 10, 15 a 20 % drevnej triesky za gumu znížilo ich obsah pod detegovateľnú hranicu. Je tiež pravdepodobné, že prídanie gumy do DTD mohlo fungovať ako sorbent. Naznačuje to aj 85 %-ný pokles celkového obsahu emisií VOC vo vzorke G20 nameraný pri 100 °C. Montes et al. [18] testovali sorpčné vlastnosti vybraných polymérnych materiálov a zistili, že napríklad sorpcia α -pinénu materiálmi ako gumené pneumatiky, silikónová guma a kraton (kopolymér styrén/butadién) je veľmi rýchla a po 15 minútach sa absorbovalo viac ako 90 % α -pinénu.

6.5 Mikroskopická analýza

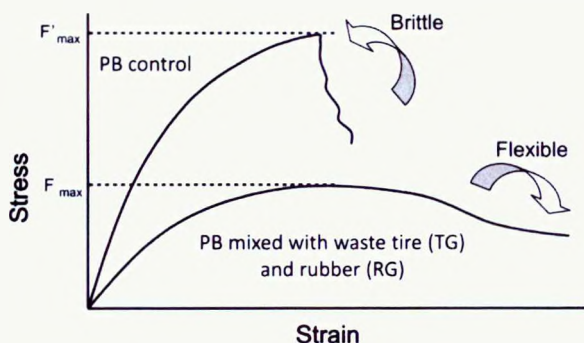
Digitálny mikroskop (VHX 6000, Keyence, Japonsko) s duálnym svetelným objektívom s vysokým rozlíšením VH-Z250T pri 100-násobnom zväčšení sa použil na prípravu digitálnych snímok drevotrieskových dosiek zmiešaných s rôznymi množstvami odpadovej pneumatiky (P) a gumy (G). FE-SEM (Quattro S, Thermo Scientific, USA) sa použil na charakterizáciu morfológických vlastností drevotrieskovej dosky pomocou detektora EDS pri 500-násobnom zväčšení s výkonom 3,0 kV a röntgenovým zdrojom Ka1.



Obr. 6.12 Digitálne obrázky drevotrieskových dosiek (DTD) vyrobených s rôznym obsahom odpadovej pneumatiky (P) a gumy (G) pri 100-násobnom zväčšení. (a) kontrolná DTD, (b) P10, (c) P15, (d) P20, (e) G10, (f) G15 (g) G20

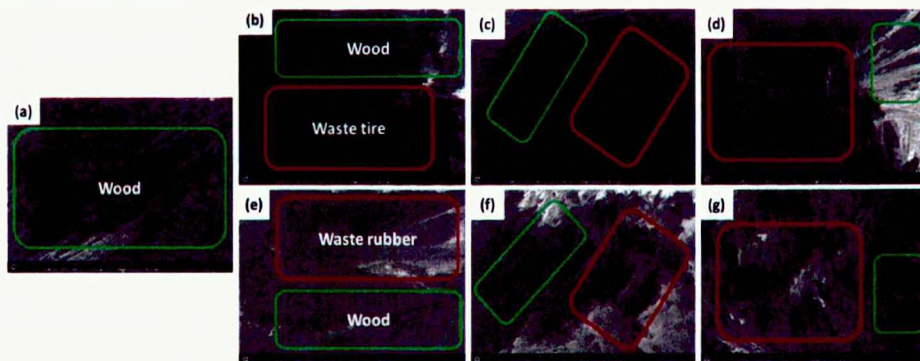
Pomocou digitálneho mikroskopu boli vytvorené digitálne snímky drevotrieskovej dosky (DTD) zmiešané s rôznymi množstvami odpadovej pneumatiky (P) a gumy (G) (obr. 6.12). Fotografie ukázali, že P a G boli rozptýlené v DTD ako čierne častice. Väčšia disperzia čiernych častíc v DTD bola spôsobená vyšším obsahom P a G. Fotografie ukázali, že povrch P (obr. 6.12 b-d) bol tuhší ako povrch G (obr. 6.12 e-g), čo spôsobilo, že G-DTD má vynikajúce ohybové vlastnosti v porovnaní s P-DTD a kontrolnou DTD. Obr. 6.13 znázorňuje typické krivky napätie-deformácia pre kontrolnú DTD a DTD zmiešané s P a G. MOR súvisel s maximálnou záťažou

(F_{max}), MOE DTD zmiešanej s P a G bola nižšia ako u kontrolnej DTD. Kontrolná DTD má tendenciu byť krehká, keď je jeho hodnota MOE vysoká, a ťažná alebo flexibilná, keď je MOE nízka. DTD zmiešaná s P a G vykazovala vyššiu hodnotu MOE ako kontrolná DTD. DTD zmiešaná s P a G mala nižšiu MOR, ale vyššiu MOE ako kontrolná DTD. Keďže DTD zmiešané s P a G mali vyššiu MOE ako kontrolná DTD, môže sa použiť na špecifické aplikácie, ako sú ohybové materiály [19].



Obr. 6.13 Typické krivky napätia a deformácie kontrolných drevotrieskových dosiek (PB) a PB zmiešaných s odpadovou pneumatikou (TG) a odpadovou gumou (RG)

FE-SEM (Quattro S, Thermo Scientific, USA) sa použil na charakterizáciu morfológických vlastností kontrolnej a modifikovanej DTD s použitím detektora EDS pri 500-násobnom zväčšení s výkonom 3,0 kV a zdrojom röntgenového žiarenia $K\alpha$. Mikrofotografie FE-SEM kontrolnej a modifikovanej DTD sú zobrazené na obr. 6.14. Kontrolná DTD jasne ukázala drevnú časť (zelený rámček), zatiaľ čo pridaním P a G sa vytvorila odpadová pneumatika a gumové škvrny (červený rámček). Viac škvŕn GP a GG v DTD bolo spôsobených vyšším obsahom GP a GG.



Obr. 6.14 FE-SEM snímky drevotrieskových dosiek (DTD) vyrobených s rôznym obsahom odpadovej pneumatiky (P) a gumi (G) pri 500-násobnom zväčšení. (a) kontrolná DTD, (b) P10, (c) P15, (d) P20, (e) G10, (f) G15 (g) G20

6.6 Hodnotenie termofyzikálnych vlastností

Tepelná vodivosť, teplotná vodivosť a špecifická tepelná kapacita boli stanovené metódou rozšíreného dynamického rovinného zdroja (EDPS). Rovinný zdroj meria zmeny elektrického odporu R a počíta teplotu z lineárneho vzťahu medzi elektrickým odporom a teplotou, ktorý je pre rovinný zdroj charakterizovaný teplotným koeficientom odporu $4,8 \times 10^{-3} \Omega \cdot K^{-1}$ a odporom

pri 20 °C, čo sa rovná 3,6 Ω. Metóda EDPS je vhodná pre vzorky s nízkou vodivosťou a experimentálne usporiadanie je robené tak, že tepelný tok je jednosmerný cez hrúbku vzorky, čo bolo vo všetkých prípadoch merania splnené.

Termofyzikálne vlastnosti všetkých materiálov boli pre každý materiál merané 10-krát. Z experimentálnych hodnôt sme vypočítali priemernú hodnotu spolu so štandardnými odchýlkami, ktoré sú uvedené v tab. 6.10.

Tab. 6.10 Priemerné hodnoty termofyzikálnych vlastností pre každý materiál

Materiál	Tepelná vodivosť' k [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Teplotná vodivosť' α [mm ² ·s ⁻¹]	Špecifická tepelná kapacita c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
DTD	0,104±0,005	0,122±0,004	1454±87
G10	0,139±0,004	0,174±0,011	1351±78
G15	0,143±0,008	0,179±0,013	1355±30
G20	0,144±0,004	0,181±0,003	1368±23
P10	0,136±0,004	0,176±0,006	1333±24
P15	0,143±0,003	0,177±0,003	1360±26
P20	0,146±0,007	0,178±0,006	1409±24

Maximálna miera nespoľahlivosti merania bola 5,8 % pre tepelnú vodivosť', 7,1 % pre teplotnú vodivosť', 5,8 % pre špecifickú tepelnú kapacitu a 6,7 % pre hustotu, čo je veľmi priaznivé pre materiály na báze dreva. Z tab. 6.10 je dobre vidieť, že teplotná a tepelná vodivosť' sa zvyšujú so zvyšujúcim sa množstvom plnidla, čo je v dobrej zhode s vyššou tepelnou a teplotnou vodivosťou plnidiel v porovnaní s drevnou matricou. Toto je typický trend pre kompozit, pri ktorom sa zvyšuje tepelná vodivosť' spolu s teplotnou vodivosťou v dôsledku vyššej rýchlosti šírenia tepla cez objem vzorky, čo má za následok aj vyššiu tepelnú vodivosť'. Rýchlosť zvýšenia je vyššia pre teplotnú vodivosť', pretože plnidlá pôsobia hlavne v objeme vzorky. Pokles špecifickej tepelnej kapacity je typický aj pre kompozity, pri ktorých sa zvyšuje tepelná aj teplotná vodivosť'.

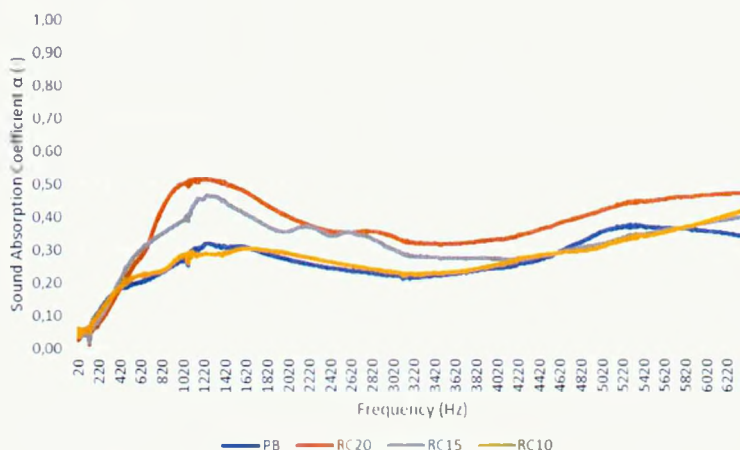
Pri porovnaní hodnôt teplotnej vodivosti je zrejmé, že u vzorky P20 je vidieť výrazné rozdiely v porovnaní s ostatnými sledovanými kompozitmi. Dá sa to vysvetliť skutočnosťou, že šírenie tepla cez pneumatiku je rýchlejšie ako cez gumovú zmes, čo má za následok vyššiu teplotnú vodivosť' pneumatiky oproti gumovej zmesi, a tým aj vyššiu hodnotu teplotnej vodivosti kompozitu. Dôvod, prečo rozdiely pre vzorky P10 a P15 nie sú štatisticky významné, spočíva v minimálnej hodnote koncentrácie plnidla.

Rozdiely mernej tepelnej kapacity porovnávaných materiálov sú štatisticky významné. U kompozitov R10 a P20 je vidieť výrazné rozdiely oproti všetkým ostatným materiálom. Významné rozdiely pre kompozit P20 možno vysvetliť najvyššou hodnotou mernej tepelnej kapacity, ktorá je stále veľmi vzdialená od hodnoty pre čistú DTD. Významné rozdiely pre kompozit R10 možno vysvetliť druhou najnižšou hodnotou mernej tepelnej kapacity, väčšou percentuálnou chybou mernej tepelnej kapacity tohto kompozitu. DTD má okrem kompozitov R10 a P20 štatisticky nevýznamne odlišné hodnoty mernej tepelnej kapacity oproti iným kompozitom. Potvrdzuje sa aj skutočnosť, že percentuálne rozdiely medzi DTD a DTD s obsahom plnidiel sú vo väčšine prípadov nižšie ako miera nespoľahlivosti merania špecifickej tepelnej kapacity.

6.7 Meranie koeficientu absorpcie zvuku

Akustické vlastnosti skúmaných materiálov boli hodnotené pomocou koeficientu zvukovej absorpcie (SAC) a koeficientu zníženia hluku (NRC). Meranie prebiehalo pomocou impedančnej Kundtovej trubice (Brüel & Kjær typ 3050), v ktorej boli umiestnené 2 mikrofóny (podľa EN ISO 10534-2 [20]). Pre toto zariadenie je potrebné pripraviť vzorky s priemerom 100 mm (pre meranie vo frekvenčnom rozsahu 20 Hz až 1,6 kHz) a 30 mm (vo frekvenčnom rozsahu 1,6 kHz až 6,4 kHz). Hrúbka všetkých vzoriek bola 15 mm. Z každého typu vzorky bolo vytvorených 6 testovacích vzoriek. Výsledky sa potom spriemerovali. Koeficient redukcie hluku (NRC) je jednočíselné hodnotenie, ktoré predstavuje priemer koeficientov absorpcie zvuku materiálu pri špecifických stredných frekvenciách (testované pri 250, 500, 1000 a 2000 Hz oktávach) zaokrúhlený na najbližšiu 0,05.

Hodnoteným akustickým parametrom je súčiniteľ pohltivosti zvuku α . Obr. 6.15 zobrazuje frekvenčnú závislosť SAC od 20 do 6 400 Hz pre drevotrieskové dosky obsahujúce gumu (10, 15 a 20 %).



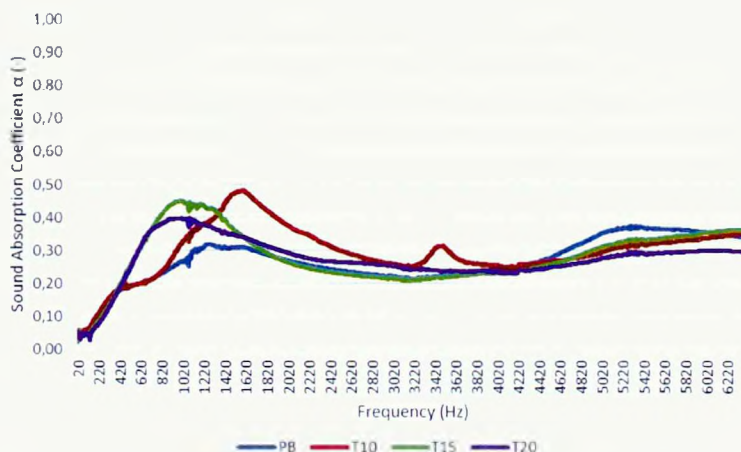
Obr. 6.15 Frekvenčná závislosť SAC pre drevotrieskové dosky obsahujúce gumu (PB= DTD; RC20=G20; RC15=G15; RC10=G10)

V prípade čistej drevotrieskovej dosky nedosahuje SAC podľa očakávania vysokú hodnotu, takže drevotrieskovú dosku nemôžeme považovať za vhodný zvukovoizolačný materiál. Po pridaní gumy do drevotrieskovej dosky dochádza k miernemu zvýšeniu SAC, najmä v rozsahu od 1 kHz do 2 kHz. Pri frekvenciách vyšších ako 2 kHz je rozdiel zanedbateľný. Zlepšenie zvukovoizolačných vlastností je výraznejšie so zvyšujúcim sa obsahom gumy (v rozmedzí od 10 do 20 %). Tab. 6.11 zobrazuje hodnoty NRC pre vybrané materiály. Z tabuľky opäť vyplýva, že guma zvyšuje pohltivosť zvuku drevotrieskovej dosky, čím viac jej doska obsahuje. Všetky skúmané vzorky patria do triedy zvukovej pohltivosti E okrem G20, ktorá vykazuje najlepšie zvukovoizolačné vlastnosti a patrí do skupiny D.

Tab. 6.11 NRC pre drevotrieskové dosky obsahujúce odpadovú gumu

	DTD	G20	G15	G10
NRC	0,20	0,30	0,25	0,20

Obr. 6.16 ukazuje frekvenčnú závislosť SAC pre drevotrieskové dosky obsahujúce odpadové pneumatiky (10, 15 a 20 %).



Obr. 6.16 Frekvenčná závislosť SAC pre drevotrieskové dosky obsahujúce odpadové pneumatiky (PB=DTD; T10=P10; T15=P15; T20=P20)

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade je porovnávacou vzorkou čistá drevotriesková doska. Po pridaní odpadových pneumatík do drevotriekovej dosky dochádza opäť k miernemu zvýšeniu SAC, najmä v rozsahu od 1 kHz do 1,6 kHz. Pri frekvenciách vyšších ako 1,6 kHz sú rozdiely nepatrné. V tomto prípade obsah odpadových pneumatík (v rozmedzí 10 až 20 %) nemá významný vplyv na hodnoty SAC. V tab. 6.12 sú hodnoty NRC pre tieto testované vzorky. Vo všetkých prípadoch sa NRC zvýšilo o 0,05 v porovnaní s čistou drevotriekou. Tabuľka tiež ukazuje, že obsah odpadových pneumatík v drevotriekovej doske nemá žiadny vplyv na NRC. V tomto prípade absolútne všetky skúmané vzorky svojimi hodnotami patria do triedy absorpcie zvuku E.

Tab. 6.12 NRC pre drevotrieskové dosky obsahujúce odpadové pneumatiky

	DTD	P20	P15	P10
NRC	0,20	0,25	0,25	0,25

6.8 Vplyv kompozitov drevo-guma na akvatické a terestrické prostredie

Každoročne veľké množstvo automobilov skončí svoju životnosť a stávajú sa odpadom. Jedným z mnohých odpadov z automobilového priemyslu sú odpadové pneumatiky, odpadová guma a odpadové plasty. Ich hromadenie predstavuje globálny environmentálny problém. Odkedy sa začali vytvárať ihriská so syntetickým trávnikom, ktoré obsahujú napríklad granulát z odpadových pneumatík, predmetom záujmu je skutočnosť, či chemické látky nachádzajúce sa v tomto granuláte môžu negatívne vplyvať na ľudské zdravie. Na túto tému sa vypracovalo už

vyše 100 vedeckých štúdií, medzi ktoré patria akademické výskumy a správy z Európskej chemickej agentúry (ECHA) a Agentúry pre ochranu životného prostredia (EPA). EPA v roku 2016 spolu s Centrom pre kontrolu chorôb zahájila výskumný projekt, ktorý je najrozsiahlejšou a najväčšou štúdiou v rámci syntetických trávnikov a gumového granulátu pochádzajúceho z odpadových pneumatík. Výsledkom ich výskumu je, že aj napriek vysokému podielu chemických látok v gumovom granuláte, je expozícia týchto látok na človeka pri činnostiach na ihrisku je dosť obmedzená. Problémom odpadových pneumatík je prítomnosť ťažkých kovov a rôznych chemických látok, z ktorých sú niektoré potenciálne mutagény a karcinogény. Na základe ich postupného rozkladu sa tieto látky dostávajú do životného prostredia. Toxíny z týchto látok môžu kontaminovať pôdne alebo vodné prostredie, negatívne vplyvať na flóru, faunu a aj na ľudí. Významné je riziko mikročastíc z odpadovej gumy a ich prítomnosť v životnom prostredí. Medzi hlavné kontaminanty gumových mikročastíc patrí zinok (Zn), organické látky (PAH) a 6ppd-chinón pochádzajúci zo zlúčeniny 6PPD, ktorú obsahujú pneumatiky. Zinok v pneumatikách predstavuje až 1 - 2 % z celkovej hmotnosti. Rozpustnosť zinku z gumených mikročastíc je ovplyvňovaná UV žiarením, hodnotou pH a veľkosťou mikročastíc. V prípade zvyšovania hodnôt pH sa rozpustnosť Zn značne znižuje. Rozpustnosť zinku sa z častíc opotrebovaných pneumatík v prítomnosti UV žiarenia zvyšuje a v tme naopak znižuje. Na rozpustnosť zinku má vplyv aj veľkosť častíc pochádzajúcich z pneumatík, pretože pri menšej veľkosti častíc dochádza k vylúhovaniu väčšieho množstva Zn v dôsledku zvýšenia povrchovej plochy a rýchlost' prenosu hmoty pri menších časticiach. Vyššie množstvo zinku vo vodnom prostredí môže spôsobiť toxický účinok pre vodné organizmy. Vo vodných výluhoch sú však prítomné aj PAH, ktoré môžu byť v značnej miere zodpovedné za celkovú toxicitu. PAH predstavujú látky, ktoré sú imunotoxické, mutagénne a karcinogénne pre mnohé rôzne druhy vodných organizmov. Mikročastice z gumy môžu predstavovať rôzne stupne chemickej toxicity, pretože tá závisí od chemického zloženia, typu a veľkosti častice alebo ďalších faktorov. Častice, ktoré pochádzajú z opotrebovaných jazdených pneumatík môžu obsahovať určité chemické látky v porovnaní s pneumatikami, ktoré sú vytvorené v laboratórných podmienkach. Príčinou je možné zachytenie chemikálií, ktoré pochádzajú z vozovky alebo iných abiotických faktorov [21,22,23].

V rámci projektu boli posudzované environmentálne vplyvy gumy z odpadových pneumatík a drevné kompozity vyrobené s náhradou dreva granulátom z odpadovej gumy na zložky životného prostredia.

6.8.1 Experiment práce

Experiment práce bol zameraný na posúdenie vplyvu odpadovej pneumatiky a drevných kompozitov pripravených s obsahom odpadu z automobilového priemyslu na akvatické a terestrické prostredie.

Ako experimentálne vzorky boli použité odpadová guma z použitých pneumatík – granulát (frakcia 1-3 mm) a drevotrieskové dosky (drevné kompozity) vyrobené náhradou dreva 10, 15 a 20 % odpadovej gumy alebo s 10, 15 a 20 % odpadových pneumatík a drevotriesková doska bez pridaného odpadu. Drevné kompozity boli pripravené v laboratóriách Drevárskej fakulty TUZVO).

Príprava vodných výluhov: Z každej vzorky boli pripravené vodné výluhy lúhovaním po dobu 24 hodín a 48 hodín lúhovadlom - demineralizovanou vodou s pH upraveným na hodnotu 3 (TN1 CEN/TR 17105).

Stanovenie ďalších ukazovateľov: pH a Stanovenie chemickej spotreby kyslíka (CHSK-Cr) (STN EN ISO 10523 [24]; STN ISO 15705 [25]).

Na posúdenie škodlivých vplyvov látok uvoľnených do vodných výluhov boli použité biotesty: test inhibície (stimulácie) rastu *Lemna minor*, test akútnej toxicity na perloočkách a test inhibície rastu koreňa vyššej kultúrnej rastliny. Uskutočnené boli vo všetkých testoch predbežné testy [26, 27, 28, 29, 30, 31].

6.8.2 Výsledky a diskusia

Vo vodnom výluhu z granulátu pripravenom z odpadových pneumatík bolo alkalické pH 9,18 a obsah organických látok (CHSK-Cr): 47,2 mg/l. Pomerne nízke koncentrácie rozpustených látok vo forme iónov boli stanovené ako merná vodivosť. Na základe výsledkov biotestov bol výluh toxický iba pre testovacie organizmy *Daphnia magna* [32]. Granulát z odpadových pneumatík bol ďalej recyklovaný použitím do drevných kompozitov s rôznym podielom odpadovej gumy a odpadových plastov z automobilového priemyslu sme začali s posudzovaním zdravotnej bezpečnosti týchto kompozitov.

Počas testu inhibície rastovej rýchlosti *Lemna minor* neboli zaznamenané na jej lístkoch prejavy nekrózy a ani chlorózy. Výsledky predbežného testu boli pozitívne a boli vyššie vo výluhoch po 48 hodinách a s narastajúcim prídavkom odpadu do drevných kompozitov sa ľu znižovala. Terestrickým testom akútnej toxicity sa zistil inhibičný vplyv odpadu na rast koreňa koreňa *Sinapis alba* (v porovnaní s kontrolou). Autori Fořt et al. [33] stanovili terestrickým testom so *Sinapis alba* inhibíciu vodného výluhu z pneumatík 31 %. Naše hodnoty IC (%) stanovené sú vyššie a predpokladáme, že vyššia inhibícia je spôsobená práve látkami rozpustenými do vodného výluhu z dreva.

Predpokladáme, že vyšší prídavok odpadu do drevných kompozitov spôsobuje zmeny v zložení vodného výluhu. Obsah dreva je nižší a tým sa vylúhuje do výluhov aj menej látok vo vode rozpustných. Dôkazom toho sú aj zo stanovené hodnoty CHSK. Drevo je z chemického hľadiska zložené z biopolymérov lignínu, celulózy, hemicelulózy ako majoritných organických zložiek a vo vzorkách bez prídavku odpadov sa ho nachádza viac, preto boli stanovené hodnoty vyššie. Najcitlivejšie reagovali na zloženie vodného výluhu akvatické organizmy *Daphnia magna*. Všetky výsledky boli pozitívne a v takmer všetkých vzorkách bola zaznamenaná 100% imobilizácia. pH vo všetkých výluhoch bolo kyslé. Vplyvom prídavku odpadov do drevných kompozitov a tiež vplyvom času lúhovania sa zaznamenalo mierne zníženie kyslosti. Vyššia kyslosť vo výluhoch zo vzoriek DTD predpokladáme, že bola spôsobená degradáciou acetylovaných hemicelulóz. Najvyššia priemerná hodnota CHSK bola v drevných kompozitov bez prídavku odpadu (DTD). Prídavok tesnenia a aj pneumatík v DTD spôsobil znížený obsah látok organického pôvodu bez vplyvu druhu použitého odpadu v porovnaní s DTD [34]. Na záver môžeme konštatovať, že prídavok odpadových gúm z pneumatík a tesnení z automobilového priemyslu do drevných kompozitov napriek tomu, že výsledky testov boli vo väčšine prípadov pozitívne, vykazuje v týchto vzorkách prijateľnejšie výsledky z hľadiska vplyvov na akvatické a terestrické prostredie ako drevné kompozity bez prídavku odpadu. Vzhľadom k tomu, že ide problematiku, ktorá predstavuje „novum“ v recyklácii odpadov do výrobkov pre stavebné využitie nie sú v tejto problematike k dispozícii doteraz známe poznatky uplatniteľné v diskusii.

6.8.3 Záver

Drevné kompozity sa už dlhodobo v praxi uplatňujú a majú perspektivu ďalšieho využitia ako stavebné materiály, predstavuje využitie takýchto odpadov z automobilového priemyslu vhodnú možnosť ich zhodnotenia.

Kompozity na báze dreva sú náhradou za masívne drevo. Ich výroba môže prispievať značnou mierou k zhodnocovaniu odpadu, keďže zvyčajne obsahujú drevný odpad. Drevné kompozity nie sú iba ekonomicky vhodné, ale predstavujú aj kvalitný stavebný materiál a z hľadiska vplyvu na zložky životného prostredia v porovnaní s drevotrietskou doskou bez obsahu odpadovej gumeny predstavujú menšie environmentálne riziko.

V súčasnosti bolo zahájené testovanie výluhov drevných kompozitov vyrobených z prídavkom odpadových plastov z palivových nádrží a z nárazníkov. Pomocou biotestov a vybraných ukazovateľov bude posúdený ich vplyv na akvatické a terestrické prostredie.

6.9 Komparácia tradičného a inovatívneho metodického postupu kalkulácie inovovaného produktu - drevoplastovej dosky

Vychádzajúc z výsledkov riešenia projektu v roku 2021, kde bol prezentovaný koncept investičného projektu zameraný na uvažovanú produkciu veľkometrážnej stavebnej nenasiakavej drevoplastovej dosky (WPC) (o rozmeroch $l = 2\,500\text{ mm}$, $\bar{s} = 1\,250\text{ mm}$, $h = 20\text{ mm}$ a hmotnosti $48,5\text{ kg}$), bolo možné priebežne naplniť aj ciele dané v roku 2022. Technologický postup výroby drevoplastovej dosky bol uvažovaný na strojnom zariadení pre vytlačanie profilov WPC pozostávajúceho z dvojzávitkového extrudéra, formy, stereotypov, traktie, rezacieho stroja a nakladacieho a chladiaceho stola. Investičné náklady boli stanovené na úrovni $1\,032\,000\text{ €}$. Výstup zmesi vytlačacej linky bol predikovaný na úrovni $1\,600\text{ kg/hod}$, čo znamená, že v priebehu 8 hodinovej smeny by, pri využití kapacity na úrovni $87,5\%$, daná technologická linka dokázala vyprodukovať $11\,200\text{ kg}$ zmesi (ročná kapacita $2\,800\text{ t}$). Investičný projekt zároveň kvantifikoval ekonomickú náročnosť projektu z pohľadu štruktúry investičných a prevádzkových nákladov, hraničnej kapacity a taktiež poskytol flexibilný metodický postup hodnotenia efektívnosti investície aj pri určitej úrovni rizika.

Cieľom riešenia projektu v roku 2022 bolo navrhnúť a komparovať tradičné a inovatívne metodické postupy cenotvorby pre uvažovaný produkt. Tradičným postupom sa rozumie, v priemyselnej praxi najrozšírenejšia metóda prirážkovej kalkulácii s využitím štruktúry typového kalkulačného vzorca. Ten je založený, v súlade s princípmi prepočtovej kalkulácie, na odhade položiek priamych nákladov a alokovaní spoločných nepriamych nákladov prostredníctvom využitia prirážok pre strediská výroby, správy a odbytu. Štruktúra kalkulačného vzorca je v kontexte odporúčani množstva teoretických zdrojov [35, 36, 37, 38, 39], ale aj praktických aplikácií pri výrobe podobných produktov, nasledovná:

Priame materiálové náklady (drevná surovina - piliny)

+ Priame materiálové náklady (plast HDPE + prídavky)

+ Priame mzdové náklady

+ Výrobná réžia (VR)

= Úplné náklady výroby

+ Správna a odbytová réžia (SOR)

= Celkové náklady produktu

+ Zisková kalkulačná prirážka

= Ponuková cena bez DPH

Prirážky jednotlivých stredísk stanovené s využitím typových rozvrhových základní.

$VR = \text{Výrobné režijné náklady} \times 100 / \text{Priamy materiál}$

$$VR = (34\,020 + 172\,000) \times 100 / 1\,103\,200 = 18,68\%$$

$SOR = \text{ostatné režijné náklady podniku} \times 100 / \text{Výrobné náklady výroby}$

$$SOR = (83\,654 \times 100) / (1\,103\,200 + 149\,910 + 34\,020 + 172\,000) = 5,73\%$$

Pre vyčíslenie hrubej prepočtovej kalkulácie nákladov na finálny produkt, je rešpektovaný predpokladaný pomer vstupných surovín na 1 tonu zmesi a 1 veľkometrážnu dosku určených rozmerov v pomere 40:60, kde 40 % predstavujú drevné piliny a 60 % plastový granulát HDPE (spolu s neurčeným pomerom UV stabilizátorov a farbív, kde nie je možná nateraz uviesť presný pomer z hľadiska utajovania receptúry, ich finančná náročnosť je však započítaná v danej položke). V rámci komparácie oboch kalkulačných postupov sa využila rovnaká úroveň ziskovej prirážky v kalkulácii, ktorá je určená z priemernej úrovne rentability nákladov odvetvia na úrovni 20 %. Zároveň táto prirážka v sebe zahŕňa aj určitú rezervu na krytie nepredpokladaných režijných nákladov a taktiež zníženú úroveň využitia kapacity v počiatočnom období spustenia výroby. Výška ponukovej predajnej ceny veľkometrážnej dosky predpokladaných rozmerov, určenej predbežnou hrubou prepočtovou prirážkovou kalkuláciou je na úrovni približne 661,19 €/tonu a pri daných rozmeroch aj na kalkulačnú jednotku 32,07 € bez DPH.

Kalkulačná položka	Kalkulačná jednotka (€/48,5 kg)	Kalkulačná jednotka (€/1 tona zmesi)
Materiálové náklady piliny	1,07	22,00
+ Materiálové náklady HDPE	18,04	372,00
+ mzdové náklady	2,60	53,54
+ Výrobná réžia (18,67%)	3,57	73,59
= Úplné náklady výroby	25,28	521,13
+ Správna a odbytová réžia (5,73%)	1,45	29,86
= Celkové náklady výrobku	26,73	550,99
+ Zisková kalkulačná prirážka (20%)	5,34	110,20
= Ponuková cena bez DPH	32,07	661,19 €

Inovatívny metodický postup určenie finálnej ceny produktu je založený na snahe o čo najpresnejšie prepočítanie vybraných priamych a najmä režijných nákladov prostredníctvom špeciálnych nákladových položiek - sadzieb strojových hodín (SSH). Štruktúra modifikovaného kalkulačného vzorca upravená podľa podkladov autorov [40, 41, 42] je nasledovná:

Materiálové náklady drevná surovina (piliny)
 + Materiálové náklady plastový komponent (HDPE + prídavky)
 + Sadzba mzdových nákladov na strojovú hodinu (Smzd/SH)
 + Sadzba energetických nákladov na strojovú hodinu (SE/SH)
 + Sadzba kalkulačných odpisov na strojovú hodinu (SKO/SH)
 = Úplné náklady výroby
 + Ostatné režijné náklady podniku (ORN)
 = Celkové náklady produktu
 + Zisková kalkulačná prirážka
 = Ponuková Cena bez DPH

Pre stanovenie navrhovaných položiek sadzieb strojových hodín v kalkulácii boli využité nasledovné metodické postupy (tab. 6.13).

Vychádzajúc z praktických znalostí štruktúry nákladov, prezentovaných v investičnom projekte, je možné prezentovať finálny prepočet modifikovanej kalkulácie SSH. Celkový počet strojových hodín pre danú technológiu bol určený na maximálnej úrovni 2 000 SH/rok avšak pri reálnom využití 87,5 % je potrebné uvažovať s kapacitou 1 750 SH/rok pri podmienkach

jednozmennej prevádzky. Do finálnej ceny produktu tak vstupujú: priame náklady výroby v rámci, ktorých sú zahrnuté náklady na vstupný materiál (drevný odpad z vlastnej réžie ocenený na úrovni vnútropodnikovej ceny) a doplnkové zložky (plastový granulát HDPE + pojivo ocenené na úrovni trhových cien); mzdové náklady zahŕňajúce náklady na mzdu a odvody zamestnancov obsluhujúcich technológie a manažérov predaja prepočítaných príslušnou sadzbou SH; náklady na energie predstavujú prepočet režijných nákladov na pohon strojných technológií prepočítaných na SH a kalkulačné odpisy ako režijný náklad amortizácie hodnoty majetku kalkulovaný prostredníctvom SSH. Podiel spoločných režijných nákladov je vyjadrený položkou nepriamych nákladov podniku, pre ktoré platí v zmysle kalkulácií, nutnosť ich úhrady v predajnej cene prostredníctvom prirážky ostatných režijných nákladov (ORN). Pre určenie ziskovej prirážky bolo vychádzané z priemernej úrovne rentability nákladov odvetvia na úrovni 20 %. Následne bolo možné vyčíslieť vybrané kalkulačné položky z tabuľky 6.13.

Tab. 6.13 NRC Postup pre výpočet položiek kalkulácie sadzieb strojových hodín

Sadzba mzdových nákladov na strojovú hodinu (Smzd/SH)	$\text{Smzd/SH} = \text{mzdové náklady} / \text{plánovaný časový fond SH}$
Sadzba energií na strojovú hodinu (SE/SH)	$\text{SE/SH} = \text{menovitý výkon stroja} \times \emptyset \% \text{ využitia elektrickej kapacity} \times \text{sadzba na jednotku energie}$
Sadzba kalkulačných odpisov na strojovú hodinu (SKO/SH)	$\text{SKO/SH} = (\text{nadobúdacia cena technológie} / (\text{doba životnosti} \times \text{plánovaný časový fond SH}))$
Prirážka ostatných režijných nákladov (ORN - %)	$\text{ORN} = (\text{ostatné režijné náklady}) / (\text{priame mzdy}) \times 100$

a) Sadzba mzdových nákladov na strojovú hodinu Smzd/SH

= 149 910 € / 1 750 SH = 85,66 €/SH

b) sadzba energií na strojovú hodinu SE/SH

= 105 kW x 0,9 x 0,18 €/kWh = 17,1 €/SH

c) sadzba kalkulačných odpisov na strojovú hodinu SKO/SH

= 172 000 € / 1 750 SH = 98,29 €/SH

d) prirážka ostatných režijných nákladov

= 83 654 € / (149 910 € x 100) = 55,80 %

Finálna kalkulácia bola určená na kalkulačnú jednotku podobne ako v tradičnej prirážkovej kalkulácii na úrovni 1 tony zmesi a aj 1 ks veľkometrážnej dosky o definovaných rozmeroch: l = 2 500 mm, š = 1 250 mm, h = 20 mm a váhe 48,5 kg. Prezentuje ju nasledovná tab. 6.14. Do úvahy pri aplikácii SSH je nutné brať aj východziu skutočnosť, že inštalovaná kapacita pri výťažnosti 87,5 % deklaruje za 1 SH výkon 1 600 kg produktu.

Porovnaním výsledkov oboch kalkulácií je možné identifikovať nepatrné rozdiely vo vyčíslení predajnej ceny. Tá bola na 1t zmesi stanovená prirážkovou kalkuláciou na úrovni 661,19 € (na 1 ks drevoplastovej dosky definovaných rozmerov to bolo 32,07 €). Inovatívnym metodickým postupom kalkulácie SSH to bolo na 1t zmesi na úrovni 659,36 € (resp. 31,98 €/48,5 kg). Tento ozaj zanedbateľný rozdiel je však spôsobený jednou zásadnou skutočnosťou. Obe kalkulácie pri ich metodickom uplatnení vychádzali zo vstupnej databázy údajov o jednotlivých nákladových položkách z konceptu návrhu investičného projektu. Ten v podstate uvažoval s podmienkami rovnorodej produkcie a to je dôvod minimálnych až zanedbateľných rozdielov v kalkuláciách predajných cien. Tento fakt však treba vysvetliť a rozšíriť o možnosti využívania rôznorodej produkcie, ktorá je v praxi rozšírenejšia. Tú by bolo možné identifikovať v našom prípade pri možnosti variácie iných plošných rozmeroch drevoplastovej dosky (najmä jej hrúbky), prípadne

zmenených podielov zložiek drevo-plast alebo následnej povrchovej úpravy. Následne by sa ukázal efekt presnejšieho prepočtu kalkulácie SSH, pretože náklady by bolo potrebné rozpočítať na viaceré produkty s inou výškou rozvrhových základní.

Tab. 6.14 Finálna kalkulácia prostredníctvom sadzieb strojových hodín

Kalkulačná položka	Poznámky ku kalkulácii	Kalkulačná jednotka (€/1 t zmesi)	Kalkulačná jednotka (€/48,5 kg)
Materiálové náklady piliny	vlastná réžia 22 €/tonu	22,00	1,07 €
+Materiálové náklady HDPE (+ pojivo a UV stabilizátory)	trhová cena 620 €/tonu	372,00	18,04
+ Sadzba mzd. nákladov - SMzd/SH	sadzba 85,66 €/SH	53,54	2,60
+ Sadzba energií - SE/SH	sadzba 17,01 €/SH	10,63	0,52
+ Sadzba kalkul. odpisov - SKO/SH	sadzba 98,29 €/SH	61,43	2,98
= Úplné náklady výroby		519,6	25,20
+ Ostatné režijné náklady podniku – ORN	prirážka ORN 55,80 %	29,87	1,45
= Celkové náklady výrobku		549,47	29,65
+ Zisková kalkulačná prirážka	20 %	109,89	5,33
= Ponuková cena bez DPH		659,36	31,98

Aplikácia SSH je ideálnym metodickým postupom ako alokovať výrobné náklady technologického charakteru výroby s dominantným využívaním strojných zariadení oproti ustupujúcemu podielu manuálnej práce. Výhodou je eliminácia tzv. princípu spriemerovania, prostredníctvom využívaných prirážok režijných nákladov a týmto spôsobom presnejšie určenie podielu problémových nákladových položiek, kalkulovaných na pracovnú hodinu stroja. Najväčší efekt z využitia kalkulácie SSH však vidíme nielen v eliminovaní nepresnosti prirážkovej kalkulácie cez využitie stanovených sadzieb ale najmä v tom, že takýto návrh dáva možnosť veľmi rýchlej reakcie a flexibilnej úpravy zmenených podmienok vstupnej kalkulácie najmä v prípade zmeny sadzby za technologickú časť spotreby energie (SE/SH), prípadne inflačný vplyv na zmeny materiálových vstupov (SMzd/SH), ale aj investičných nákladov vyjadrených v položke odpisov (SKO/SH). V dnešnej turbulentnej dobe častých zmien a neistoty je teda táto kalkulácia aj s ohľadom na dominantnú technologizáciu výroby ideálnou možnosťou rýchleho rozhodovania.

6.10 Záver

Predmetom výskumnej úlohy bolo vyhodnotiť vybrané vlastnosti drevných kompozitných materiálov - drevotrieskových dosiek (DTD) s obsahom odpadovej gumy (pneumatiky, zmes koberčekov a tesnení) z automobilov a porovnať výsledky s bežnými drevotrieskovými doskami. Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že:

- vzorky drevotrieskových dosiek mali typický profil hustoty v tvare písmena U, čo naznačuje pravidelný gradient hustoty cez hrúbku panelu. Vrstva jadra mala najnižšiu hustotu. Porovnaním DTD s obsahom gumy a pneumatík možno konštatovať, že DTD s obsahom gumy mali vyššiu hustotu.
- analýza prchavých produktov (VOC) metódou GC-MS poukázala na fakt, že pri nižších teplotách nedochádzalo k uvoľňovaniu VOC, čo svedčí o dobrej stabilite a zdravotnej bezpečnosti DTD s obsahom gumového plnidla v interiéri. Pri vyšších teplotách (80 °C a 100 °C) došlo k uvoľňovaniu VOC, pričom pneumatiky sa ukázali ako materiál náchylnejší na ich tvorbu v porovnaní s gumami, dokonca je pravdepodobné, že prídanie od 10 % do 20 % gumy do DTD spôsobuje zníženie tvorby VOC a gumy pôsobia ako sorbent.
- prídanim od 10 % do 20 % gumového plnidla do DTD došlo k zvýšeniu hodnôt tepelnej a teplotnej vodivosti a zníženiu hodnôt špecifickej tepelnej kapacity, čo je nežiaduce pre ich použitie ako izolačný materiál.
- zvyšovaním percentuálneho podielu gumy/pneumatiky v DTD sa zlepšovali akustické vlastnosti a dané kompozity by bolo možné použiť ako zvukovoizolačný materiál.
- vplyv DTD bez gumového plnidla na akvatické a terestrické prostredie je významnejší a predstavuje väčšie environmentálne riziko v porovnaní s DTD s obsahom gumy.

DTD s obsahom gumového plnidla je možné použiť na špecifické účely. Výskumom sme zistili, že dochádza k zlepšeniu niektorých vlastností, napr. akustických, ale aj k zhoršeniu napr. tepelnoizolačných vlastností. Je potrebné vykonať ďalšie výskumy s iným zložením kompozitu, aby sme dosiahli produkt s čo najlepšimi výsledkami.

Literatúra

- [1] Xin, S.Y.; Cui, Y.; Xu, M.; Li, J. Technological Properties of Poplar Particle/Waste Rubber Powder Composites. *Advanced Materials Research*, 2011, 194-196, 602-605.
- [2] Zhao, J.; Wang, X.M.; Chang, J.M.; Yao, Y.; Cui, Q. Sound insulation property of wood–waste tire rubber composite, *Compos. Sci. Technol.* 2010, 70, 2033-2038.
- [3] Ayrlimis, N.; Buyuksari, U.; Avci, E. Utilization of waste tire rubber in the manufacturing of particleboard. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, 24, 688-692. DOI: 10.1080/10426910902769376.
- [4] Febrianto, F.; Hwee, S.P.; Man, C.K.; Hidayat, W. 2017. Properties Enhancement of Rubber Wood Particleboard Laminated with Low Density Polyethylene (LDPE) Resin. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 2017, 10(2), 186–194
- [5] Shao, D.; Xu, M.; Cai, L.; Shi, S.Q. Fabrication of Wood Fiber-rubber Composites with Reclaimed Rubber. *BioResources*, 2018, 3300-3314.
- [6] Xu, M.; Han, L.; Shi, S.Q.; Li, J. Wood-rubber composite fabricated from rubber mixing and vulcanization molding process. *Wood and Fibre Science*, 2017, 386-395.
- [7] Shao, D.; Xu, M.; Cai, L.; Shi, S.Q. Fabrication of Wood-Rubber Composites Using Rubber Compound as a Bonding Agent Instead of Adhesives. *Materials*, 2016, DOI: 10.3390/ma9060469.
- [8] Jesenák, K. Sitová analýza. Particle size analysis (in Slovak). Bratislava: Comenius University Bratislava, 2008, 154 s. ISBN 978-80-223-2464-9.
- [9] Mahure, P.S.; Borkar, S.A.; Deshmukh, Ch.G. A Review of Multipurpose Sieving Machine. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2021, 2(12), 452-455.
- [10] Lawinska, L.; Modrzewski, R. Analysis of Sieve Holes Blocking in a Vibrating Screen and a Rotary and Drum Screen. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017, 53(2), 812-828.
- [11] RETSCH. Analytical sieving machine AS 200 digit cA (in Slovak). [online]. Available at: <https://www.retsch.sk/sk/produkty/sitovanie/sitovacie-stroje/as-200-digit-ca/funkcie-a-charakteristiky/>.
- [12] WAGICAS. Waga precyzyjna AXIS AG2000C [online]. Available at: <https://wagicas.pl/produkt/waga-precyzyjna-axis-ag2000c-348.html>.
- [13] EN 15149-1: 2010. Solid biofuels – Determination of particle size distribution – Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above.
- [14] ISO 3310-1: 2016. Test sieves – Technical requirements and testing – Part 1: Test sieves of metal wire cloth.
- [15] Yemele, M.C.N.; Blanchet, P.; Cloutier, A.; Koubaa, A. Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black spruce and trembling aspen bark. *Forest Products Journal*, 2008. 58(11), 48-56.
- [16] Baumann, M.G.D.; Lorenz, L.F.; Batterman, S.A.; Zhang, G.-Z. Aldehyde emissions from particleboard and medium density fiberboard products. *Forest products journal*, 2000, 50(9), 75-82.
- [17] Montes, M.; Daugulis, A.J.; Veigaaand, M.C.; Kennesa, Ch. Characterization of absorbent polymers for the removal of volatile hydrophobic pollutants from air. *J Chem Technol Biotechnol.*, 2011. 86, 47–53. DOI: 10.1002/jctb.2517
- [18] HSDB (2008). Methyl isobutyl ketone. Hazardous Substances Data Base. Available at: <http://toxnet.nlm.nih.gov>.

- [19] Yang, H.S.; Kim, D. J.; Lee, Y. K.; Kim, H. J.; Jeon, J. Y.; Kang, C. W. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresource Technology*, 2004. 95(1), 61–65. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.02.002
- [20] EN ISO 10534-2: 2015. Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method
- [21] Sidhu, CH. Crumb rubber. Canada: CATRA. 2021. [online]. [cit. 2022-5-4]. Dostupné na: <https://www.catraonline.ca/storage/files/shares/publications-en/Product_Description_-_Crumb_Rubber.pdf>.
- [22] La Placa, S. Toxicity and Effects of Tire Crumb Rubber in the Aquatic Environment. 2021. [online]. [cit. 2022-5-4]. Dostupné na: <https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3910&context=all_dissertations>
- [23] Šourková, M.; Adamcová, D.; Winkler, J.; Vaverková, M. D. Phytotoxicity of Tires Evaluated in Simulated Conditions. *Environments*, 2021, 8, 49. DOI: 10.3390/environments8060049
- [24] STN EN ISO 10523: 2008. Water quality. Determination of pH.
- [25] STN ISO 15705: 2005. Water quality. Determination of the chemical oxygen demand index (ST-COD). Small-scale sealed-tube method
- [26] Hybská, H.; Samešová, D. *Ecotoxicology*. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2015. ISBN 978-80-228-2750-8.
- [27] OECD 221:2006. *Lemna* sp. Growth Inhibition test.
- [28] STN EN ISO 20079: 2008. Water quality. Determination of the toxic effect of water constituents and waste water on duckweed (*Lemna minor*). Duckweed growth inhibition test.
- [29] OECD 202: 2004. Guidelines for Testing of Chemicals. *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test. Paris. France.
- [30] STN EN ISO 6341: 1999. Water quality. Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). Acute toxicity test.
- [31] STN 83 8303: 1999. Testing of dangerous properties of wastes. Ecotoxicity. Acute toxicity tests on aquatic organisms and growth inhibition tests of algae and higher cultivated plants.
- [32] *Daphnia magna*. [online]. [cit. 2022-5-4]. Dostupné na: <<https://alchetron.com/Daphnia-magna>>.
- [33] Fořt, J.; Kobetičová, K.; Böhm, M.; Podlesný, J.; Jelínková, V.; Vachtlová, M.; Bureš, F.; Čermý, R. Environmental Consequences of Rubber Crumb Application: Soil and Water Pollution. *Polymers*, 2022, 14, 1416. DOI: 10.3390/polym14071416
- [34] Hybská, H.; Samešová, D.; Lobotková, M. Ecotoxicological effects of the leachate from the waste tires on the environment. *Waste forum*, 2021, 3, 166 – 175.
- [35] Däumler, K. D.; Grabe, J. *Kostenrechnung 2. Deckungsbeitragsrechnung*. 7., neubearb. und erw. Auflage. Herne/Berlin, 2002. 325 s. ISBN 3-482-70747-2.
- [36] Hradecký, M.; Lanča J.; Šiška, L. *Managerial accounting (in Czech)*. 1. edition. Prague: Grada, 2008. p. 264. ISBN 978-80-247-2417-3.
- [37] Potkány, M.; Krajčírová, L. *Calculations and budgets (in Slovak)*. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2015. 197 s. ISBN 978-80-228-2801-7
- [38] Coenenberg, A.G; Fisher, T.M.; Günther, T. *Kostenrechnung und Kostenanalyse*. 9., überarbeitete Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2016. 950 s. ISBN 978-3-7910-3613-7.

- [39] Král, B. et al. Managerial accounting (in Czech). 4th expanded and updated edition, Prague: Management Press, 2018. 792 p. ISBN 978-80-7261-568-1.
- [40] Ostermann, R. Basiswissen Internes Rechnungswesen: Eine Einführung in die Kosten- und Leistungsrechnung. Herdecke; Witten : W3L, 2010. p. 304. ISBN 978-3-868-34022-8.
- [41] Mumm, M. Kosten- und Leistungsrechnung: Internes Rechnungswesen für Industrie- und Handelsbetriebe. Berlin: Springer Gabler, 2015. p. 343. ISBN 978-3-662-44378-1.
- [42] Wöltje, J. Kosten- und Leistungsrechnung. Freiburg: Haufe Lexware, 2016. p. 456. ISBN 978-3-648-07929-4.

Optimalizácia prevádzkových parametrov pyrolýzneho reaktora na energetické zhodnocovanie odpadu z automobilového priemyslu



Riešiteľský kolektív:
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Hlavný riešiteľ:
Ing. Marek Patsch, PhD.

Riešitelia:
Ing. Peter Pilát, PhD.
prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.

7 Optimalizácia prevádzkových parametrov pyrolýzneho reaktora na energetické zhodnocovanie odpadu z automobilového priemyslu

7.1 Úvod

Súčasný životný štýl ľudstva produkuje veľké množstvo komunálneho a priemyselného odpadu, ktorý obsahuje veľké množstvo plastov rôzneho druhu. Kvôli nedostatočnej sieti spracovateľských prevádzok v SR je tento odpad vo veľkej miere ukladaný na skládky odpadu. Podľa nariadenia Európskej komisie bude ukladanie odpadu tohto druhu na skládky v blízkej dobe obmedzené (recyklovateľného, alebo energeticky využiteľného), preto v dnešnej dobe čelíme otázke ako s ním naložiť a spracovať ho. Ak pominieme fakt, že najvhodnejším riešením je plastový odpad neprodukovať, recyklácia plastu je optimálnym riešením daného problému. Nie všetok plastový odpad je vhodný na recykláciu a následné využitie (či už z pohľadu nemožnosti vytriediť plasty podľa druhu, jeho kontaminácie inými látkami a pod.). Ďalším možným riešením je jeho spaľovanie, alebo spoluspaľovanie s iným palivom na získanie tepla pre výrobu elektrickej energie, vykurovanie alebo iné technologické procesy. Spaľovanie, alebo spoluspaľovanie plastového odpadu a jeho energetické využitie je riešenie, nanešťastie zariadení je na území SR pomerne málo a sú na území nerovnomerne rozmiestnené. Ekologicky a energeticky vhodnejším riešením je využitie nových technológií spracovania plastového odpadu, napr. splyňovanie alebo pyrolýzu, ktoré tento odpad pretvoria opäť na východiskovú surovinu – plynnú a kvapalnú fázu, ktoré sú použiteľné buď priamo ako palivo, alebo ako vstupná surovina pre petrochemicky a chemický priemysel. Budovanie takýchto zariadení na území SR zatiaľ nie je veľmi rozšírené, dôvodom môže byť finančná náročnosť alebo aj takmer nejestvujúci trh, kde by sa mohli produkty rozkladu plastového odpadu uplatniť. Jestvujúce prevádzky napr. na splyňovacie a pyrolýzne spracovanie plastového odpadu sú v podmienkach SR skôr pilotnými projektmi, majú obmedzenú kapacitu, sú na území nerovnomerne rozmiestnené, z čoho vyplýva aj potreba prepravy vhodného odpadu na veľké vzdialenosti zo širokého okolia. O preprave odpadu na veľké vzdialenosti sa dá len ťažko povedať, že je ekonomická a ekologická. Vo svete a na trhu sú dostupné veľké splyňovacie a pyrolýzne spracovateľské zariadenia, ktoré sú investične náročné a pre podmienky SR nevyhovujúce. Východiskom z tejto situácie je budovanie menších splyňovacích a pyrolýznych spracovateľských zariadení, kapacitne dimenzovaných podľa množstva odpadu v blízkom okolí, rovnomerne rozmiestnených po celom území SR, podpora ich budovania zo strany štátu napr. vhodnou legislatívou, dotáciami a pod., a takisto vytvorenie trhu pre produkty splyňovania alebo pyrolýzy – syntézneho plynu, pyrolýzneho oleja a pod. Takéto menšie spracovateľské prevádzky na nerecyklovateľný plastový priemyselný a komunálny odpad by mohli byť umiestnené v blízkosti väčších zdrojov plastového odpadu, napr. v blízkosti spracovateľských prevádzok na vyradené automobily, alebo pre združenia obcí, prípadne v areáloch na triedenie komunálneho odpadu. Takáto prevádzka by mohla byť modulového systému, napr. umiestnená v kontajneroch a mohla by byť prispôbená konkrétnym požiadavkám, druhom a množstvám spracovávaného odpadu.

Splyňovacie alebo pyrolýzne spracovanie jednodruhového vytriedeného plastového odpadu (napr. PET fľaše, HDPE, LDPE, PP, staré pneumatiky a pod.) je technologicky zvládnuteľné, problematická je technológia spracovania zmesového plastového odpadu, ktorý môže byť kontaminovaný rôznymi prísadami, tak ako napríklad odpad z automobilového priemyslu. Nesúrodosť tohto vstupného materiálu pre energetické zhodnocovanie zvyšuje technologickú náročnosť celého procesu. Tento odpad je špecifický najmä svojim skupenstvom (tuhé a kvapalné), druhovou skladbou a rozmanitou frakciou (v závislosti od spôsobu predchádzajúceho

spracovania). Za energeticky využiteľný odpad z automobilového priemyslu a recyklácie automobilov možno považovať plasty, gumu, prevádzkové kvapaliny (palivá, motorové a prevodové oleje, chladiace a brzdomé kvapaliny,...), kožu, syntetické textilie a potahy a pod. Najväčší podiel energeticky využiteľných odpadov z vyradených automobilov tvoria plasty, ktoré možno vo všeobecnosti rozdeliť na polypropylén 35 % celkovej hmotnosti plastov v autovraku, polyuretán 20 %, PVC 11 %, ABS 10 %, polyamid 9 %, polyetylén 5 % a ostatný nešpecifikovaný 10 %. Do kategórie plastového odpadu je možné zaradiť aj zvyšky z káblového šrotu, tie sú tvorené káblovými izoláciami, koncovkami, konektormi a pod., sú tvorené najmä PVC a ABS a ďalej sa už nerecyklujú, sú určené primárne na energetické zhodnotenie. Najväčšie problémy pri energetickom zhodnocovaní plastov sú s PVC, ktorého prítomnosť v palive je limitovaná kvôli vznikajúcim emisiám (ak je PVC v palive nad 1%, je nutná zvýšená teplota v spaľovacej komore a nárast zádržnej doby). Zloženie vstupného paliva pre proces energetického zhodnocovania plastov je daný technológiou spracovania autovraku. Podrvený plastový podiel po šredrovaní je už len veľmi náročné odseparovať a tento plastový podiel je primárne určený na energetické zhodnotenie, vstupné palivo má nešpecifikované vlastnosti a zloženie. Najpresnejšie chemické a fyzikálne vlastnosti a zloženie vstupného paliva sú dosahované pri úplnej demontáži autovraku.

7.2 Materiálové zloženie vstupných surovín pre pyrolýzny proces

Pre správny návrh pracovných podmienok pyrolýzneho procesu, najmä pracovnej teploty v pyrolýznom reaktore, rýchlosti ohrevu a dĺžku zádržnej doby je nutné poznať materiálové zloženie spracovávaného odpadu a jeho fyzikálno-chemické vlastnosti. Niektoré vlastnosti sú všeobecne známe, niektoré je nutné získať laboratórne. Laboratórne testovanie prebiehalo podľa príslušných noriem, vzorky materiálu pochádzali z reprezentatívnych častí vyradených automobilov. Overovanie prebiehalo podľa príslušných noriem na skúšanie vlastností ako: pevnosť, ťažnosť, tepelná odolnosť, plastifikačná teplota, teplota topenia, zápalná teplota, bod vznietenia a pod.

Pojem plasty sa zaužíval už v minulom storočí pre ich vlastnosť – plasticnosť, plastifikáciu, vďaka ktorej je možné z nich vytvárať rôzne výrobky aj komplikovaných tvarov pomerne jednoduchým spôsobom a to zahriatím materiálu na plastifikačnú teplotu, kedy mäknú a nárastom teploty sa stávajú až tekuté. V takejto podobe sú spracovávané extrúziou, vstrekaním a tvarovaním. Plasty je možné za bežných teplôt opracovávať aj trieskovým obrábaním, preto je ich použitie naozaj veľmi široké. A to nie len kvôli veľkým možnostiam ich spracovania, ale aj kvôli ich obrovskej rôznorodosti, čo sa týka ich fyzikálno-chemických vlastností. Plasty nahradili iné materiály aj z energetických dôvodov, pretože energetická náročnosť spracovania plastov je neporovnateľná napr. s metalurgickým priemyslom, čím sa šetria aj energetické zdroje a nie v zanedbateľnej miere.

Zaradenie polymérnych materiálov do systémových skupín je pomerne komplikované. Polyméry sú materiály s vysoko variabilnou chemickou štruktúrou a tým aj vlastnosťami, preto je systematická kategorizácia polymérov na základe univerzálneho kritéria prakticky nemožná. Z toho dôvodu sa rozdeľujú na základe rôznych kritérií (napr. podľa pôvodu, chemického zloženia, charakteru chemickej reakcie, ktorou vznikli, podľa ich chovania pri zaťažení teplotou a tlakom a pod.). Ako príklad sú uvedené nasledujúce rozdelenia:

a) Rozdelenie podľa pôvodu:

- Prírodné polymérne materiály – bielkoviny, celulóza, kaučuk, z ktorých možno vyrobiť technické polymérne materiály, napr. gumu, celoid, celofán a i.

- Syntetické polymérne materiály – vznikli polyreakciami z organických i anorganických nízkomolekulových látok (napr. polyetylén, polystyrén, epoxid, polytetrafluóretylén, polymetylmetakrylát, silikóny a i.).
- b) Rozdelenie podľa chemickej reakcie, ktorou vznikli:
- polyméry pripravené polymerizáciou,
 - polyméry pripravené polykondenzáciou,
 - polyméry pripravené polyadíciou.
- c) Rozdelenie podľa elasticko-plastických vlastností:
- Termoplasty – sú polymérne materiály, ktoré pri vyšších teplotách prechádzajú do formy vysoko viskózne kvapaliny (vo väčšine prípadov pseudoplastickej), ktorú možno tvarovať a následným ochladením stabilizovať jej tvar. Tento proces je opakovateľný, to znamená, že polymér možno opätovným zahriatím uviesť do plastického stavu a znovu tvarovať. Termoplasty sa za bežných teplôt správajú ako tuhé telesá. Do tejto skupiny patria napr. polyetylén, polypropylén, polyamid a i.
 - Reaktoplasty – sú typy polymérov, ktoré nadobúdajú konečné vlastnosti až po zosieťovaní. Husto zosieťované polymérne štruktúry, v ktorých sú makromolekulové reťazce spájané kovalentnými väzbami, vznikajú pôsobením siet'ovacích činidiel (vytvrdzovadlá) alebo účinkom tepla. V procese vytvrdzovania sa tvarujú na tvar výrobku a po ukončení vytvrdzovacej chemickej reakcie sú tvarové zmeny nevratné. Vzniknuté polyméry sú netaviteľné a nerozpustné, nevykazujú prakticky žiadnu elastickú deformáciu a nie je možné uviesť ich opätovne do plastického stavu. Reaktoplasty sú napr. polyesterové, epoxidové, fenolformaldehdyové živice a pod.
 - Elastoméry (kaučuky) – sú polyméry s výraznou pružnosťou a nízkou tuhosťou. Po vytvorení priečných väzieb medzi ich makromolekulami (vulkanizácii) dochádza k potlačeniu plastického toku materiálu, polymér sa stáva vysoko elastický, značne odolný voči plastickej deformácii. Vzniká materiál, všeobecne označovaný ako guma. Predstaviteľmi elastomérov sú prírodné a syntetické kaučuky (napr. SBR, BR, NBR a i.). [11]

Ako už bolo spomenuté v úvode, najväčšie zastúpenie v automobilovom priemysle majú polypropylén (PP), polyuretán (PUR), polyetylén (PE), akronitrilbutadiénstyrén (ABS), polyamid (PA) a polyetylénteraftalát (PET), preto im pri experimentálnom overovaní bola venovaná aj väčšia pozornosť. Percentuálne zastúpenie jednotlivých materiálov v automobile je závislé od výrobcu a modelu automobilu, ale vo všeobecnosti možno predpokladať zloženie podľa tabuľky 7.1 a 7.2.

Tab. 7.1 Percentuálne hmotnostné zastúpenie materiálov v automobile [11]

Materiál	Hmotnostné percento
Zliatiny Fe	53,9 %
Zliatiny Al, Mg	14,7 %
Plasty	13,7 %
Mazivá a prevádzkové kvapaliny	5,8 %
Guma (pneumatiky, hadice,...)	4,0 %
Cu, Pb, Zn	2,9 %
Sklo	2,2 %
Prísady do polymérov	1,5 %
Ostatné	1,3 %

Tab. 7.2 Percentuálne hmotnostné zastúpenie jednotlivých druhov polymérov v automobile [11]

Materiál	Hmotnostné percento
PP	16,7 %
PUR	12,4 %
PE	11,1 %
ABS	8,9 %
PA	7,6 %
PET	5,7 %
PA-GV	5,6 %
PC	5,0 %
PREPOM	4,5 %
PVC	4,4 %
Textil – syntetický	3,9 %
Zmäkčovadlá	3,8 %
EPOM	2,9 %
PBT	2,3 %
ABS/PC	1,8 %
EVA	1,8 %
POM	1,5 %

7.3 Popis jednotlivých druhov plastov

Polyolefiny sú syntetické polyméry, ktoré vznikajú polymerizáciou uhlíkovodíkov, konkrétne alkénov, čiže olefinov a obsahujú jednu dvojitzú väzbu. Do tejto skupiny patria termoplasty, ale aj elastoméry. Najznámejšie polyolefiny sú polypropylén (PP) a polyetylén (PE).

7.3.1 Polypropylén (PP)

Polypropylén je polokryštalický termoplast. Poznáme izotaktický (čistý), syndiotaktický a ataktický polypropylén. Je to jednoduchý konštrukčný materiál s dobrou chemickou odolnosťou, ľahko zvariteľný a tvarovateľný. Používa sa hlavne pri výrobe rôznych zvaraných nádrží na prevádzkové kvapaliny, krytov, zásobníkov a pod., používa sa v automobilovom a chemickom priemysle, v stavebníctve. Hlavné vlastnosti materiálu zistené z literatúry a vykonanými laboratórnymi skúškami sú uvedené v tab. 7.3.

Tab. 7.3 Fyzikálne vlastnosti polypropylénu [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PP
Fyzikálne vlastnosti		
Hustota	g cm^{-3}	0,90 – 0,91
Mechanické vlastnosti		
Pevnosť v ohybe	MPa	43
Pevnosť v ťahu	MPa	30
Ťažnosť	%	700
Modul pružnosti v ťahu	MPa	1 500
Tepelné vlastnosti		
Tepelná odolnosť (Martens)	°C	30 – 40
Tepelná odolnosť (Vicat)	°C	80 – 90

Koeficient objemovej rozťažnosti (30 – 120 °C)	$1.K^{-1}$	4,8 – 6.104
Koeficient tepelnej vodivosti pri 20 °C	$J.m^{-1}.K^{-1}$	1,10 - 1,17
Merné teplo pri 20 °C	$J.m^{-1}.K^{-1}$	0,4
Teplota topenia	°C	160 - 176
Zápalná teplota	°C	350 - 370
Bod vznietenia	°C	370 - 390
Spalné teplo	$MJ.kg^{-1}$	45
Trvalá tepelná odolnosť	°C	105

7.3.2 Polyetylén (PE)

Polyetylén je polokryštalický termoplast s podielom kryštalickej fázy v rozmedzí 50 až 85 %. Kryštalické fázy zabezpečujú vyššiu pevnosť. Jeho merná hmotnosť sa pohybuje od 0,85 do 0,90 g.cm⁻³, polyetylén je teda ľahší ako voda. Je bez chuti a zápachu a fyziologicky neškodný. Polyetylény sú typickými plastami, ktorých vlastnosti mimoriadne závisia od štruktúry. Štruktúrna závislosť vlastností je preto základným parametrom na rozlíšenie jednotlivých druhov polyetylénov a odvíjajú sa od nej aj ich názvy.

Rozdelenie polyetylénov:

- PE-LD** nízko hustotný (rozvetvený, vysokotlakový) polyetylén,
- PE-HD** vysokohustotný (lineárny, nízkotlakový) polyetylén,
- PE-MD** stredno hustotný polyetylén,
- PE-LLD** lineárny nízko hustotný polyetylén,
- PE-VLD** veľmi nízko hustotný polyetylén,
- MPE-LLD** metallocenový lineárny nízko hustotný polyetylén,
- PE-UHMW** ultravysokomolekulový polyetylén,
- PE-X** zosieťovaný polyetylén,

Vlastnosti polyetylénu závisia od molekulovej hmotnosti, priestorového usporiadania tzv. „mérovo“ v reťazci makromolekuly a stupňa kryštalinity. Polyetylén s nízkou hustotou PE-LD (z anglického low density) má hustotu v rozmedzí 0,85 – 0,93 g.cm⁻³. Dôvodom nízkej hustoty je veľký počet dlhších bočných CH₃ skupín v reťazci. Vysoká rozvetvenosť bráni tesnému usporiadaniu makromolekúl, preto sa PE-LD vyznačuje nízkym obsahom kryštalitov, 40 – 50 %. Polyetylén PE-HD (z anglického high density) má hustotu v rozmedzí 0,945 – 0,965 g.cm⁻³. Dôvodom vysokej hustoty je nerozvetvený lineárny reťazec, ktorý umožňuje vznik väčšieho množstva kryštalitov, a to 60 – 80 %. S použitím katalyzátorov kovov prechodného mocnenstva (chróm, molybdén) sa vyrába vysokohustotný polyetylén PE-HD s hustotou v rozmedzí 0,95 – 0,97 g.cm⁻³. Obsahuje vysoké množstvo kryštalitov, až do 85 %. S použitím rôznych katalyzátorov a iniciátorov sa vyrába lineárny polyetylén s nízkou hustotou, PE-LLD (z anglického linear low density). Je to kopolymér PE a vyššieho α -olefinu. Jeho hustota je porovnateľná s PE – LD. Pomocou Zieglerovej metódy sa vyrába aj polyetylén s veľmi vysokou molekulovou hmotnosťou PE-UHMW. Nízkotlakovou polymerizáciou s použitím nových katalyzátorov, metallocénov sa vyrábajú metallocenové polyetylény MPE-LLD. Od obvyklých PE-LLD sa líšia užšou distribučnou krivkou molekulových hmotností. PE-VLD je polyetylén s veľmi nízkou hustotou, medzi 0,880 až 0,910 g.cm⁻³. Tieto ultraľahké typy sú kopolyméry alebo terpolyméry (polymerizácie sa zúčastňujú tri typy monomérov) etylénu až s 10 % vyšších α -olefinov, ako oktén, tetrametylpentén, spolu s propylénom. PE-X je zosieťovaný polyetylén. Zosieťovanie sa uskutočňuje počas spracovania vplyvom sietovacích prísad. Porovnanie

vlastností vybraných typov polyolefinov zistených z literatúry a vykonanými laboratórnymi skúškami sú né v tab. 7.4

Tab. 7.4 Porovnanie vlastností vybraných typov polyetylénov [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PE-LD	PE-HD	PE-UHMW
Fyzikálne vlastnosti				
Hustota	g cm^{-3}	0,85-0,93	0,94-0,97	0,935
Mechanické vlastnosti				
Modul pružnosti v ťahu 23°C	MPa	100-500	700-1400	300
Modul pružnosti v ťahu 50°C	MPa	30-100	400-900	150
Modul pružnosti v ťahu 100°C	MPa	pod 10	80-200	-
Pevnosť pri 23°C	MPa	8-23	18-35	nad 20
Pevnosť pri 80°C	MPa	2	4-6	8
Tepelné vlastnosti				
Koeficient dĺžkovej teplotnej rozťažnosti	K^{-1}	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Teplota použitia, maximálna krátkodobá	°C	80-90	90-120	-
Teplota použitia, maximálna trvalá	°C	60-75	70-80	-
Teplota použitia, minimálna trvalá	°C	-50	-50	-
Spálne teplo	MJ.kg^{-1}	46-47		
Teplota vznietenia	°C	380 - 390		

7.3.3 Polyuretán (PUR)

Polyuretány obsahujú v hlavných makromolekulárnych reťazcoch skupiny -O-, -CO-, -NH-. Patria do rozsiahlej skupiny polyesteramidov, teda polymérov, ktoré sú z chemického hľadiska kombináciou polyesterov a polyamidov. Lineárne polyuretány majú strednú mólovú hmotnosť, väčšinou v rozsahu od 7 kg.mol^{-1} do 12 kg.mol^{-1} . Ak presiahne jej hodnota 15 kg.mol^{-1} , sú už polyméry čiastočne zosieťované. Polyuretánov sa v technickej praxi využíva nespočetné množstvo druhov (od tvrdých, liatych až po penové), preto popis vlastností je pomerne zložitý. Napríklad rôznorodé vlastnosti liateho polyuretánu z neho robia poprednú voľbu inžinierov, ktorí hľadajú materiály s dlhou životnosťou pre ich vysoké zaťaženie a vysoké namáhanie. Polyuretán bežne prekonáva plasty, gumu a oceľ vo svojej celkovej schopnosti odolávať nepriaznivým vplyvom prostredia, ako je oder, teplo, rozpúšťadlá, olej a kyseliny. Navyše, schopnosť polyuretánu znižovať hluk z neho robí preferovaný materiál v dizajnoch reťazových pohonov, systémov dopravníkových pásov, prostrediach montážnych liniek a v automobilovom priemysle. Medzi najčastejšie používané v konštrukcii automobilov patria materiály označené komerčným názvom podľa konkrétneho výrobcu, z chemického hľadiska sú to tolylene-2,4-diisocyanate (2,4-TDI), tolylene-2,6-diisocyanate (2,6-TDI), 1,4-Phenylene diisocyanate (MDI), isophorone diisocyanate (IPDI), hexamethylene diisocyanate (HDI). Hlavné vlastnosti materiálu zistené z literatúry a vykonanými laboratórnymi skúškami sú uvedené v tab. 7.4.

Tab. 7.5 Materiálové vlastnosti zo skupiny PUR [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PUR
Merná hmotnosť	g cm^{-3}	1,26
Trvalá teplota použitia	°C	-20 – 80
Prechodná teplota použitia	°C	-20 – 80
Spálne teplo	MJ.kg^{-1}	38 – 41
Teplota vznietenia	°C	320 – 340

7.3.4 Akronitrilbutadiénstyrén (ABS)

Kopolymerizáciou akrylonitrilu, butadiénu a styrénu sa podarilo vplyvom akrylonitrilovej zložky zvýšiť chemickú odolnosť. Súčasne vplyvom butadiénnej zložky sa podstatne zvýšila húževnatosť polystyrénu, a to pri zachovaní spoľahlivých mechanických vlastností. Terpolyméry ABS sú dobre spracovateľné prakticky všetkými bežnými technologickými postupmi používanými pre termoplasty, z ktorých sú najvýznamnejšie vstrekovanie a vytlačanie. Prichádzajú na trh v rade rôznych typov s charakteristickou húževnatosťou, mechanickými vlastnosťami a chemickou odolnosťou. Tvrdý a lesklý povrch výrobkov má atraktívny vzhľad a môže byť ľahko galvanicky pokovaný. Ich použitie je veľmi široké, v strojárstve, automobilovom priemysle, pri stavbe lodí, v stavebníctve, v obalovej technike, v spotrebnom priemysle atď. Obzvlášť sa uplatňujú vo forme tzv. kompozitných materiálov, t. j. polymérov vystužených napr. sklenenými vláknami, čím sa dosahuje ďalšie zvýšenie mechanických vlastností. [11]

7.3.5 Polyamid (PA)

Polyamidy sú lineárne polyméry charakterizované polymérom retiazcom, v ktorom sa pravidelne striedajú skupiny $-CO-$, $-NH-$ s väčším počtom skupín metylénových, teda $-CH_2-$. Polyamidov sa v technickej praxi používa viac druhov, napríklad PA6 – extrudovaný polyamid, PA6G – liaty polyamid, PA6G+olej – liaty polyamid modifikovaný olejom, PA6G+MoS₂ – liaty polyamid modifikovaný sulfidom molybdénitým, PA4.6, PA66+GF30 – polyamid modifikovaný sklenenými vláknami, najpoužívanejší je však PA66. V porovnaní s polyamidom 6 má PA66 výhodu vo vyššej teplote topenia, väčšej pevnosti a menšej nasiakavosti, predovšetkým však v tom, že neobsahuje žiadny monomér, takže odpadá jeho odstraňovanie a možno ho tiež bez obáv použiť ako fólie napr. pri balení potravín. Veľmi rozšírené je však aj jeho zvlákňovanie. V železničnej doprave sa používa pri výrobe tlmiacich vložiek do betónových podvalov a tlmiacich podložiek pod spoje koľajníc. V menšom objeme sa vyrába polyamid 610. Porovnanie jeho vlastností s vlastnosťami polyamidu 6 a 66 je uvedený v nasledovných tabuľkách (tab. 7.6 a 7.7).

Tab. 7.6 Porovnanie materiálových vlastností zo skupiny polyamidov [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PA6G+olej	PA6G+MoS ₂	PA6G	PA66+GF30
Merná hmotnosť	g cm ⁻³	1,14	1,16	1,15	1,29
Medza klzu	N.mm ⁻²	80	78	85	160
Medza pevnosti v ťahu					
Dovolený stredný tlak deformácia 1%	N.mm ⁻²	22,00	25,00	26,00	28,00
Dovolený stredný tlak deformácia 2%	N.mm ⁻²	43,00	49,00	51,00	55,00
Dovolený stredný tlak deformácia 5%	N.mm ⁻²	79,00	88,00	92,00	90,00
Pevnosť v ohybe	N.mm ⁻²	140		140	250
Modul pružnosti v ohybe	N.mm ⁻²	2 800		3 200	
Ťažnosť	%	50	25	40	5
Modul pružnosti v ťahu	N.mm ⁻²	2 600	3 300	3 500	11 000

Teplota topenia	°C	220	220	220	255
Teplotná rozťažnosť	K ⁻¹	8.10 ⁻⁵	8.10 ⁻⁵	8.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵
Teplná vodivosť	W.K ⁻¹ .m ⁻¹	0,23	0,30	0,29	0,30
Trvalá teplota použitia	°C	-40 – 105	-30 – 105	-40 – 105	-30 – 120
Prechodná teplota použitia	°C	-40 – 160	-40 – 170	-40 – 170	-30 – 180
Spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	41 – 47			
Teplota vznietenia	°C	370 – 390			

Tab. 7.7 Porovnanie materiálových vlastností zo skupiny polyamidov [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PA66	PA6	PA4.6	PA12G
Merná hmotnosť	g.cm ⁻³	1,14	1,14	1,18	1,03
Medza klzu	N.mm ⁻²	85	76	100	60
Medza pevnosti v ťahu					
Dovolený stredný tlak deformácia 1%	N.mm ⁻²	25,00	24,00	23,00	
Dovolený stredný tlak deformácia 2%	N.mm ⁻²	49,00	46,00	45,00	
Dovolený stredný tlak deformácia 5%	N.mm ⁻²	90,00	80,00	94,00	
Pevnosť v ohybe	N.mm ⁻²	135	130	150	90
Modul pružnosti v ohybe	N.mm ⁻²	2 900	2 500	3 200	1 500
Ťažnosť	%	50	50	25	55
Modul pružnosti v ťahu	N.mm ⁻²	3 000	3 200	3 300	2 000
Teplota topenia	°C	265	220	295	179
Teplotná rozťažnosť	K ⁻¹	10.10 ⁻⁵	10.10 ⁻⁵	9.10 ⁻⁵	10.10 ⁻⁵
Teplná vodivosť	W.K ⁻¹ .m ⁻¹	0,28	0,28	0,30	0,23
Trvalá teplota použitia	°C	-30 – 100	-30 – 95	-40 – 155	-60 – 80
Prechodná teplota použitia	°C	-30 – 150	-40 – 140	-40 – 200	-60 – 140
Spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	41 – 47			
Teplota vznietenia	°C	370 – 390			

7.3.6 Polyetylénteraftalát (PET)

PET patrí medzi termoplastické polyestery, čiže v hlavnom reťazci sa nachádzajú esterové väzby a je polykondenzátom kyseliny teraftalovej a etylénglykolu. Používa sa hlavne na výrobu vlákien a následne na výrobu textílií, tkanín a napr. lán. Tým, že má vynikajúce elektroizolačné vlastnosti, využíva sa aj ako obal vodičov. Tým, že jeho pružnosť je v porovnaní s ostatnými plastami najlepšia a to už od teplôt -70°C až po 130°C a málo prepúšťa vlhkosť a plyny, využíva sa aj v automobilovom priemysle, ale aj ako obalový materiál na potraviny a výrobu fliaš na nápoje. Je odolný aj voči olejom. Skupina materiálov PET je tvorená viacerými modifikáciami za účelom zlepšiť nejakú konkrétnu vlastnosť materiálu, napr. PET, PET-GL (polyetylénteraftalát modifikovaný pevným mazivom – zlepšenie klzných vlastností a zvýšená

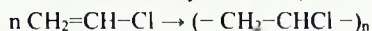
odolnosť voči opotrebeniu) a pod. Hlavné vlastnosti materiálu zistené z literatúry a vykonanými laboratórnymi skúškami sú uvedené v tab. 7.8.

Tab. 7.8 Porovnanie materiálových vlastností zo skupiny PET [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PET	PET-GL
Merná hmotnosť	g cm^{-3}	1,38	1,43
Medza klzu	N.mm^{-2}	80	75
Medza pevnosti v ťahu			
Dovolený stredný tlak deformácia 1%	N.mm^{-2}	26,00	24,00
Dovolený stredný tlak deformácia 2%	N.mm^{-2}	51,00	47,00
Dovolený stredný tlak deformácia 5%	N.mm^{-2}	93,00	95,00
Pevnosť v ohybe	N.mm^{-2}	125	115
Modul pružnosti v ohybe	N.mm^{-2}		2 600
Ťažnosť	%	40	5
Modul pružnosti v ťahu	N.mm^{-2}	3 000	2 600
Teplota topenia	$^{\circ}\text{C}$	255	255
Teplotná rozťažnosť	K^{-1}	$7 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
Tepelná vodivosť	$\text{W.K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	0,24	0,23
Trvalá teplota použitia	$^{\circ}\text{C}$	-20 – 100	-20 – 110
Prechodná teplota použitia	$^{\circ}\text{C}$	-20 – 160	-20 – 160
Spálne teplo	MJ.kg^{-1}	42 – 45	
Teplota vznietenia	$^{\circ}\text{C}$	340 – 370	
Antistatický materiál	-	nie	nie

7.3.7 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid, skratene PVC je umelo vyrobený plastický polymér so širokou škálou použitia. Je to pomerne tvrdý termoplast vyznačujúci sa vysokou odolnosťou voči agresívnym chemickým prostrediam. Je veľmi dobre zvariteľný a je možné ho tvarovať za tepla. Jeho nevýhodou je pomerne malý teplotný rozsah použitia a vysoká krehkosť pri nízkych teplotách. Vyše 50 % vyrobeného polyvinylchloridu sa používa v stavebníctve, kde nahrádza tradičné stavebné materiály, ako drevo, betón alebo keramika. Ďalej sa používa na výrobu obalov, káblových izolácií, infúzných setov, hračiek, gramofónových platní a pod. Polyvinylchlorid sa skladá zo zretiazaných jednotiek monoméru vinylchloridu (chloroetylénu):



Výsledný polymér má vysokú tvrdosť, preto sa zmäkčuje pridávaním tzv. plastifikátorov, ktoré dodávajú PVC pružnosť a ohybnosť. Okolo 90 % zmäkčovadiel v PVC tvoria ftaláty (estery kyseliny ftalovej). Najpoužívanejšie sú di-2-ethylhexylftalát (DEHP), diisodecyl ftalát (DIDP) a diisononyl ftalát (DINP). Hlavné vlastnosti materiálu zistené z literatúry a vykonanými laboratórnymi skúškami sú uvedené v tab. 7.9.

Tabuľka 7.10 sumarizuje podstatné vlastnosti vstupného materiálu pre pyrolýzne spracovanie, vlastnosti boli získané analyzátormi v laboratórnych podmienkach. Pre správny návrh najmä pracovnej teploty a rýchlosti ohrevu v pyrolýznom reaktore sú podstatné najmä teploty topenia a vznietenia a tepelná vodivosť, pre odhad budúcich energetických vlastností získaného pyrolýzneho oleja najmä spálne teplo vstupného materiálu.

Tab. 7.9 Porovnanie materiálových vlastností zo skupiny PVC [11, 19]

Vlastnosť	Jednotka	PVC
Merná hmotnosť	g cm^{-3}	1,42
Pevnosť v ohybe	N mm^{-2}	15
Ťažnosť	%	3 000
Teplota topenia	$^{\circ}\text{C}$	105
Teplotná rozťažnosť	K^{-1}	$8 \cdot 10^{-5}$
Teplná vodivosť	$\text{W K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	0,16
Trvalá teplota použitia	$^{\circ}\text{C}$	0 – 60
Prechodná teplota použitia	$^{\circ}\text{C}$	0 – 70
Spalné teplo	MJ kg^{-1}	39 – 41
Teplota vznietenia	$^{\circ}\text{C}$	185 – 250

Tab. 7.10 Zhmutie hlavných experimentálne získaných vlastností podstatných plastových zložiek z odpadu z automobilového priemyslu

Vlastnosť	Jednotka	PP	PE	PUR	PA	PET	PVC
Teplota topenia	$^{\circ}\text{C}$	165	135 – 138		179 – 295	255	105
Teplota vznietenia	$^{\circ}\text{C}$	370 – 390	380 – 390	320 – 340	370 – 390	340 – 370	185 – 250
Teplná vodivosť	$\text{W K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	0,22	0,40 – 0,41		0,23 – 0,30	0,23 – 0,24	0,16
Spalné teplo	MJ kg^{-1}	45	46 – 47	38 – 41	41 – 47	42 – 45	39 – 41

7.4 Energetické zhodnocovanie odpadu

7.4.1 Pyrolýza

Pyrolýza je tepelné spracovanie odpadových látok v pyrolýznej peci, alebo reaktore pri teplote 250 až 1650 $^{\circ}\text{C}$ bez prístupu vzduchu, alebo pri obmedzenom prístupe vzduchu a pri zníženom atmosférickom tlaku. Výsledkom pyrolýzneho rozkladu sú kvapalné látky (pyrolýzny olej), plynné látky (pyrolýzny plyn) a tuhý zvyšok.

Princípom tohto spôsobu energetického zhodnocovania plastového odpadu je polymérna degradácia, ktorá môže prebiehať za účasti katalyzátora, reakcia prebieha v uzatvorenom reaktore pôsobením tepla. Reakcia prebieha buď za prítomnosti malého množstva vzduchu alebo bez prítomnosti oxidačného činidla, ktoré je najčastejšie nahrádzané inertným plynom, najčastejšie dusikom a najčastejšie pri normálnom atmosférickom tlaku. Dávkovaná zmes plastového odpadu je v reaktore depolymerizovaná, štiepi sa na nižšie uhlíkovodíkové reťazce (rozklad dlhých reťazcov plastových materiálov na fluidnú zmes nasýtených uhlíkovodíkov). Odpadový plastový materiál sa premieňa na plyn a jeho následným ochladením sa mení na ropné frakcie, na surovinu, z ktorej bol pôvodne vyrobený a na syntézny plyn, ktorý obsahuje nekondenzovateľné molekuly. Ochladzovaním vzniknutej fluidnej zmesi nasýtených uhlíkovodíkov začne prebiehať proces frakčnej destilácie, čiže oddelovania jednotlivých ropných frakcií, keď sa plastové odpady späť premenia na základnú surovinu. Výsledným produktom procesu, ktorý sa nazýva katalytické krakovanie, je zmes ropných frakcií, obsahujúca naftové, benzínové a olejové zložky, parafín, vosk a ďalšie časti.

Depolymerizácia najčastejšie prebieha za prítomnosti katalyzátora. Plastové odpady pri pridaní katalyzátora získavajú elasticnosť už pri nízkych teplotách (okolo 200 $^{\circ}\text{C}$). Výhodou

katalytického procesu depolymerizácie pri nižších pracovných teplotách je aj nižšia spotreba palív potrebných na ohrev reaktora. Katalyzátor je do reaktora pridávaný kontinuálne, čím je zabezpečená jeho nepretržitá a stabilná aktivita a tým aj vyrovnané pracovné t.j. teplotné podmienky s priaznivým vplyvom na rovnomernú kvalitu produktu.

7.4.2 Vstupné suroviny a výstupné produkty

Popísanou technológiou je možné spracovávať rôzne druhy odpadu, komunálneho a priemyselného, biomasu, plasty, staré pneumatiky a pod. Z plastového odpadu sa najčastejšie danými technológiami spracovávajú odpadové polyolefiny (polyalkény) ako HDPE, LDPE a LLDPE t.j. polyetylén rôznych špecifických hmotností. Vhodnosť týchto polymérov vyplýva z faktu, že sú zložené výhradne z uhlíka a vodíka a ich základnými stavebnými jednotkami sú etylén $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ a propylén $\text{CH}_3 - \text{CH} = \text{CH}_2$.

Depolymerizáciou vyššie popísanými spôsobmi vzniká z vstupných materiálov syntézny plyn, ktorý je možné ochladením rozdeliť na kondenzovateľné a neskondenzovateľné molekuly (příklad zloženia syntézneho plynu v závislosti na vstupnej surovine ukazuje tab. 7.11). V závislosti na vstupnej surovine, ak sa jedná o plasty, obsahuje po ochladiení prevažne kvapalné depolymerizačné produkty – krakáty, ktoré majú v závislosti od podmienok rozkladného procesu, a to najmä v závislosti od výšky rozkladnej teploty, olejovitý, voskový, prípadne naftový charakter. Tieto vznikajúce produkty majú podobné frakčné zloženie ako tie, ktoré sú vyrábané primárne z ropy. Zostávajúca časť po depolymerizácii je voda a tuhý zvyšok vo forme cudzorodých zostatkov z pôvodnej odpadovej plastovej suroviny, v podobe napr. kovových zvyškov, skla, kameňov, zeminy a iných mechanických nečistôt. Vznikajúce kvapalné a plyné podiely neobsahujú významnejšie množstvo halogénov, síry, dusíka alebo kovov, nakoľko ich neobsahuje ani pôvodná surovina. Preto sú z hľadiska chemického zloženia v plynnom podiele prakticky len uhlíkovodíky C_1 až C_8 a výstupný produkt celej technológie je zmes kvapalných zlúčením uhlíka a vodíka, v hmotnostnom pomere 86 : 14 %, ktoré sú štruktúrne prevažne nenasýtenými uhlíkovodíkmi bez významnejšieho obsahu aromatických zlúčenín. Výstupný produkt zodpovedá frakčným zložením ľahkému vykurovaciemu oleju, motorovej naftě a voskom, to znamená surovinám, ktoré je možné ďalej spracovávať v petrochemickom priemysle ako hodnotnú surovinu, alebo sa môže priamo použiť na výrobu tepla a elektrickej energie.

Použitie daných technológií na iné typy plastového odpadu, napr. z automobilového priemyslu je problematické najmä pre rôznorodosť vstupného materiálu, čo má zásadný vplyv na voľbu depolymerizačnej teploty, dĺžku doby depolymerizácie, použitie katalyzátorov, kvalitu výsledného produktu a zvyškov po depolymerizácii.

Tab. 7.11 Příklad zloženia syntézneho plynu v závislosti na druhu vstupnej suroviny

	H ₂ [%]	CH ₄ [%]	C ₂ - C ₄ [%]	CO [%]	CO ₂ [%]	N ₂ [%]	Hustota [kg.Nm ⁻³]	Výhrevnosť [MJ.Nm ⁻³]	Výhrevnosť na tonu vstup. suroviny [kW/tona vstup]
biomasa	15	26	3	35	17	4	1,10	17,10	2591
plasty	25	38	18	9	5	5	0,80	28,00	7778
pneumatiky	19	40	28	3,5	6,5	3	0,90	36,00	3333

7.4.3 Splyňovacie a pyrolýzne zariadenie

Na splyňovanie a pyrolýzu sú využívané reaktory, najčastejšie valcového tvaru, v závislosti na množstve spracovávaného odpadu sú konštruované buď ako kontinuálne alebo diskontinuálne. Na oba technologické procesy je potrebné dodanie určitého množstva tepla, jeho množstvo je závislé na pracovnej teplote, množstve a druhu spracovávaného odpadu. Teplo do procesu je dodávané buď spaľovaním plyných a kvapalných palív, alebo elektrickým ohrevom. Ohrev elektrickou energiou je realizovaný priamo, cez elektrickú špirálu, ktorá môže byť umiestnená v podávacej závitovke. Ohrev spaľovaním kvapalných alebo plyných palív v horákoch je z bezpečnostných dôvodov najčastejšie realizovaný prostredníctvom medzimédia umiestnenom v dvojitej stene reaktora. Reaktor má kvôli ekonomike prevádzky tepelnú izoláciu. Kapacity reaktorov sa pohybujú od niekoľkých sto kilogramov do niekoľko ton spracovaného odpadu za hodinu. Zádržná doba vsádzky v reaktore a parametre prevádzky sú závislé na konštrukcii reaktora a druhu spracovávaného odpadu, príklad prevádzkových parametrov ukazuje tab. 7.12. Tuhý zvyšok po technologickom procese je odvádzaný spodkom reaktora chladeným závitkovým dopravníkom. Množstvo tuhého zvyšku je závislé od druhu spracovávaného odpadu, technológia a od prevádzkových parametrov.

Tab. 7.12 Príklady prevádzkových parametrov pyrolýznych reaktorov

	Biomasa¹	Polymérne plasty²	Staré pneumatiky
Pracovná teplota	250 – 700 °C	650 – 800 °C	650 – 800 °C
Zádržná doba vsádzky	5 – 15 min	15 – 25 min	15 – 25 min
Množstvo syntézneho plynu	15 – 80 %	60 – 95 %	30 – 60 %
Množstvo syntézneho oleja (po chladení)	5 – 40 %	5 – 30 %	20 – 40 %
Tuhý zvyšok³	15 – 90 %	2 – 30 %	35 – 45 %

¹ štiepka z drevin, poľnohospodárska dendromasa, piliny...

² plasty, energeticky významné zložky komunálneho a priemyselného odpadu,

³ zmeny v závislosti od prevádzkových podmienok (toREFIKÁCIA / pyrolýza / vysokoteplotná pyrolýza)

7.4.4 Príprava vstupnej suroviny

Ako vstupná surovina pre experimentálne pyrolýzne spracovanie odpadu boli zvolené rôzne odpadové plasty, z automobilového priemyslu a z triedeného komunálneho odpadu. Odpad z automobilového priemyslu reprezentovali časti vyradených automobilov po selektívnej demontáži. Tvorili ju najmä plasty z nárazníkov (lakované, aj bez povrchovej úpravy), plasty z oblasti motora (kryty motora, plastové časti nasávania vzduchu, a pod.) a časti interiéru. Typovo boli plasty tvorené najmä PE, PP a ABS. Ich podiel vo vytvorenej zmesi plastovej drviny percentuálne zodpovedal ich percentuálnemu hmotnostnému zastúpeniu v autovraku. Plasty boli selektívne podľa druhu plastu podrvené na rotačnom nožovom zariadení (obr. 7.1) a následne bola vytvorená pracovná zmes zmiešaním jednotlivých druhov plastu (obr. 7.2a). Z triedeného komunálneho odpadu boli použité rôzne obalové materiály, tvorené najmä PET fľašami (obr. 7.2b).

Frakčné zloženie pripravených plastov v zmesi bolo nerovnorodé, charakteristický rozmer bol od niekoľkých milimetrov po 5 centimetrov, väčšinou vo forme pášikov (tvar vyplýva zo spôsobu drvenia nožovou hlavou použitého mlecieho zariadenia). Ak boli spracovávané mäkké plasty, ich rozmer sa zväčšoval, niektoré veľmi mäkké a poddajné, ako napr. PET fľaše, prechádzali procesom mletia bez zmeny – vychádzali nepodrvené.



Obr. 7.1 Rotačné mlecie zariadenie



a)



b)

Obr. 7.2 Vytvorená pracovná zmes plastového odpadu, a) zmes podvrveného automobilového odpadu, b) zmes podvrvených PET obalov

7.5 Experimentálna laboratórna pyrolýza

Pre testovanie procesu pyrolýzy bola použitá zostava diskontinuálneho laboratórneho pyrolyzného reaktora s kondenzačným výmenníkom tepla, meracou, regulačnou a bezpečnostnou aparaturou (obr. 7.3). Pyrolyzný reaktor je dvojkomorové zariadenie ohrievané spaľovaním plynu. Vnútrotná komora – pracovný priestor, je valcová nádoba uzatvorená vekom s prírubami a tesneniami. Do nádoby sa umiestňuje vzorka odpadu pre spracovanie a zvyšný priestor je vyplnený ochrannou inertnou atmosférou CO_2 . Inertná atmosféra je použitá z bezpečnostných dôvodov, pretože pracovná teplota reaktora môže byť mnohonásobne vyššia ako je teplota samovznietenia uvoľňujúcich sa produktov. Pracovný priestor je ohrievaný prestupom tepla spalín zo spaľovania plynu v blokovom horáku cez stenu, spaliny prúdia v priestore medzi vonkajším plášťom a vnútornou komorou. Spaľovaný môže byť buď zemný plyn, alebo syntézny plyn vznikajúci v pyrolyznom procese.

Kondenzačný výmenník je ochladzovaný teplotnosným médiom, ktoré sa volí podľa požadovanej teploty kondenzácie. Ak je požadovaná úplná kondenzácia všetkých kondenzovateľných látok za atmosférického tlaku, za teplotnosné médium sa volí voda, ktorá je chladená prietokovým chladiacim termostatom. Ak je požadovaná parciálna kondenzácia len niektorých zložiek, upravuje sa teplota chladiacej vody podľa charakteristických teplôt kondenzácie konkrétnej zložky, podľa tabuľky kondenzačných teplôt [12]. Ak sú vo výmenníku požadované teploty nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, volí sa ako chladiace médium olej, ktorý je na požadovanú teplotu ohrievaný elektrickou špirálou. Kondenzát je zachytávaný do zbernej nádoby, jeho prírastok je zaznamenávaný vážením na laboratórnej váhe. Nekondenzovateľné časti sú odvádzané buď do blokového horáku na spaľenie, alebo sú spaľované na fakli mimo zariadenia bez využitia tepelnej energie. Množstvo vyprodukovaného syntézneho plynu nie je merané

priamo, je dopočítané ako zvyšková hmotnosť, ktorá ostane po odčítaní hmotnosti kondenzátu a tuhého zvyšku od hmotnosti vstupnej vsádzky.

Počas laboratórnej prevádzky sú zaznamenávané dôležité prevádzkové parametre procesu, najmä teploty. Významnými teplotami sú:

- teplota v pracovnej komore pyrolytického reaktora,
- teplota ohrevu a komínová teplota,
- teploty v kondenzačnom výmenníku na primárnej a sekundárnej strane.

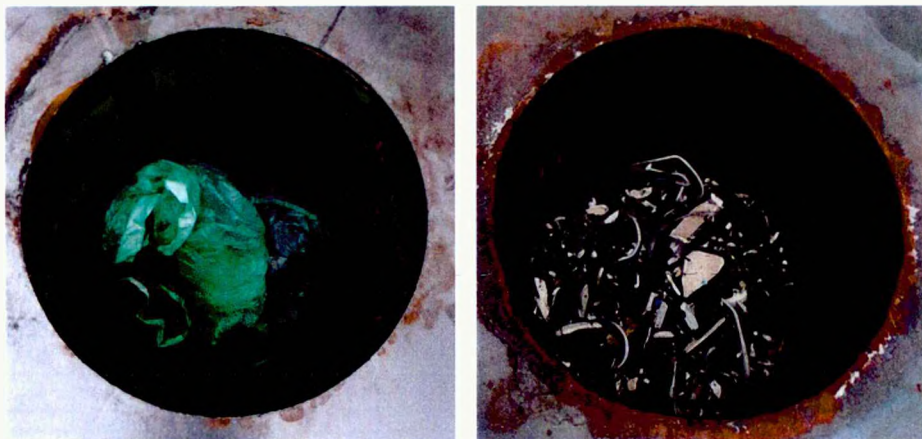


Obr. 7.3 Experimentálny pyrolytický reaktor s príslušenstvom

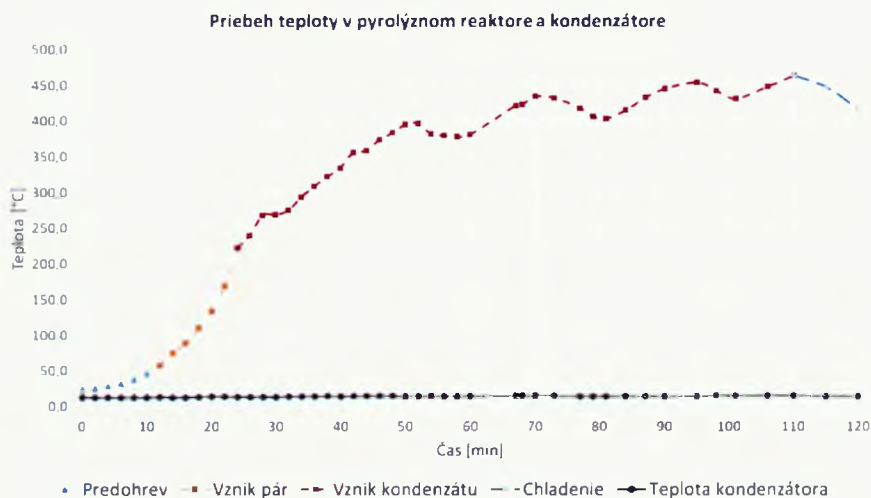
Laboratórny diskontinuálny pyrolytický reaktor bol naplnený zmesou pripraveného plastového odpadu (obr. 7.2), jedna pracovná dávka bola o hmotnosti 3,5 až 4 kg. Reaktor bol naplňovaný v studenom stave, pri teplote okolia (obr. 7.4), kondenzačný výmenník bol vychladený na priemernú teplotu 13,5 °C. Pre pyrolyzu boli zvolené rôzne pracovné teploty v rozmedzí 300 až 600 °C. Priebeh pracovných teplôt v komore pyrolytického reaktora počas vybraného cyklu je ukázaný na obr. 7.5. Pyrolytický proces prebiehal bez pridaného katalyzátora. Na obr. 7.5 je možné pozorovať 4 fázy pyrolytického procesu:

- Fáza predohrevu – pracovný priestor je naplnený inertnou atmosférou, pozorovateľný je nárast teploty pyrolytického reaktora a vsádzky z teploty okolia, fáza predohrevu je ukončená pri uvoľňovaní prvých pár.
- Fáza vzniku pár – prvé pary sa začali uvoľňovať pri teplote 62 °C, dodávanie inej inertnej atmosféry z tlakovej fľaše bolo zastavené, rozbehnutie procesu pyrolyzy už nedovoľuje vstup atmosférickému kyslíku, pary prúdia cez kondenzačný výmenník, ale sú nekondenzovateľné.
- Fáza tvorby kondenzátu – kondenzát sa začal tvoriť pri pracovnej teplote 240 °C, pri pracovných teplotách pod 350 °C má kondenzát voskovitý charakter s vysokou viskozitou, pri vyšších pracovných teplotách viskozita klesá.

- Chladenie – po ukončení pyrolýzneho procesu (keď sa uvoľňuje minimálne množstvo vznikajúceho kondenzátu) je reaktor ochladený na teplotu okolia aby bolo možné otvoriť ho a odstrániť tuhé zvyšky.



Obr. 7.4 Náplň pyrolýzneho reaktora



Obr. 7.5 Priebeh pracovných teplôt počas procesu pyrolýzy

Výslednými produktmi pyrolýzneho spracovania plastov boli pyrolýzny olej a syntézny plyn, vedľajším produktom bol tuhý zvyšok. Tabuľka 7.13 ukazuje ich zastúpenie vo vybraných cykloch pyrolýzy. Priemerný hmotnostný podiel pyrolýzneho oleja bol 60,44 %, pyrolýzneho plynu 29,74 % a tuhého zvyšku 9,81 %. Surový pyrolýzny olej bol tvorený všetkými kondenzovateľnými uhl'ovodíkmi, ktoré boli vytvorené počas pyrolýzy, boli v ňom zastúpené frakcie s nízkou viskozitou (tvorené benzínovými a naftovými podielmi, obr. 7.6a) až po frakcie s vysokou viskozitou (voskovité, pripomínajúce mazut, obr. 7.6b). Všetky kvapalné podiely boli prefiltrované (obr. 7.7), upravené vzorky boli následne opäť odvážené. Příklad výsledkov spracovania vzorky po procese pyrolýzy je ukázaný v tabuľke 7.14. Počas prvých testovacích pyrolýz prebiehalo filtrovanie až po ukončení procesu, v chemickom laboratóriu za izbovej teploty, čo malo vplyv na priechodnosť vzorky filtrom. Všetka časť vzorky, ktorá neprešla

filtrum, bola zahrnutá ako odpad z procesu. V neskorších pyrolýzách bol priamo do technologického reťazca zaradený vyhrievaný filter, proces filtrácie prebiehal za teploty kondenzácie na výstupe z kondenzačného výmenníka. Táto optimalizácia mala za následok minimalizáciu odpadu. Zvyšok zachytený na filtri je taktiež tvorený energeticky využiteľnými zložkami, čo bolo potvrdené hodnotením výhrevnosti a následnou spaľovacou skúškou.

Po otvorení pyrolýzneho reaktora bol odstránený tuhý zvyšok (obr. 7.8), ktorý okrem uhlíka pravdepodobne obsahuje aj iné zložky (kovové kúsky zo vstupného materiálu, ťažké kovy z povrchových úprav a pod.). Tuhý zvyšok je použitý v nasledujúcom cykle pyrolýzy ako katalyzátor.

Tab. 7.13 Hmotnosti a percentuálny hmotnostný podiel vo vybraných vzorkách

	1. vzorka		2. vzorka		3. vzorka		4. vzorka		5. vzorka		Priemer
	Hmotnosť [g]	%	Hmotnosť [g]	%	Hmotnosť [g]	%	Hmotnosť [g]	%	Hmotnosť [g]	%	
Pyrolýzny olej	2140,0	59,3	2459,0	61,5	2118,4	60,1	2218,7	57,4	2534,8	63,9	60,44
Pyrolýzny plyn	1139,8	31,6	1186,8	29,7	998,2	28,3	1196,6	31,0	1115,2	28,1	29,74
Tuhý zvyšok	329,1	9,1	345,2	8,9	406,2	11,5	446,8	11,60	317,0	8,0	9,81
Vsádzka	3608,9	100,0	4000,0	100,0	3522,8	100,0	3859,1	100,0	3967,0	100,0	



a)



b)

Obr. 7.6 Vzorky pyrolýzneho oleja; a) nízkoviskózná frakcia, b) vysokoviskózná frakcia

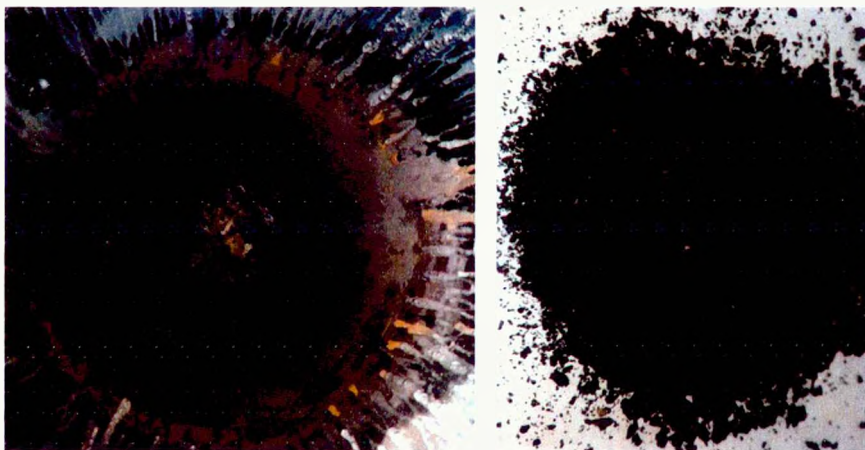
- Optimalizácia prechodkových parametrov pyrolýzneho reaktora na energetické zhodnocovanie odpadu z automobilového priemyslu



Obr. 7.7 Filtrovanie vzoriek

Tab. 7.14 Příklad výsledkov spracovania vzorky po pyrolýze

Vzorka	Hmotnosť [g]	
Pyrolýzny olej	2140,0	g
Ľahká frakcia	873,7	g
Ťažká frakcia	699,2	g
Odpad	567,1	g



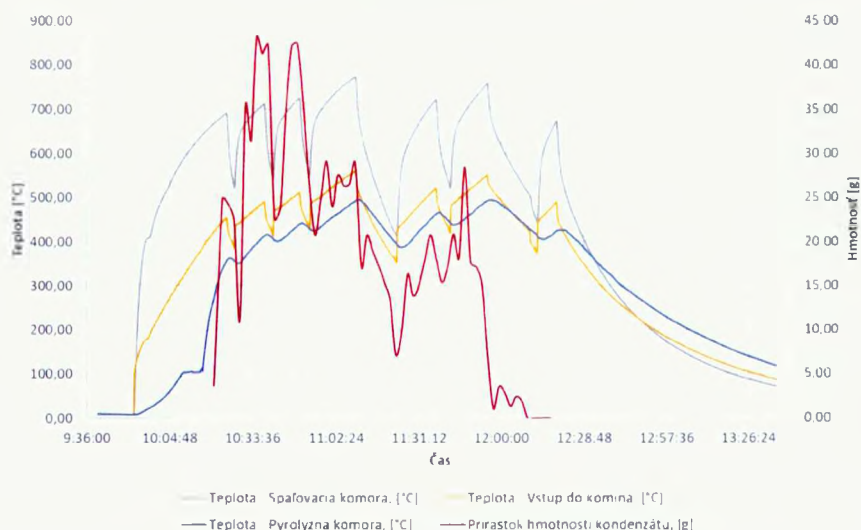
Obr. 7.8 Tuhý zvyšok po procese pyrolýzy

Na obr. 7.9 a 7.10 je možné podrobnejšie pozorovať priebeh pyrolýzneho procesu vybraného cyklu spracovania plastového odpadu. Priebeh teploty ohrevu pyrolýzneho reaktora spaľovaním zmesi zemného plynu a vznikajúceho syntézneho plynu poukazuje na rozdielne vlastnosti v zložení zmesi a vplyv regulácie dodávaného tepelného výkonu. Pre tento nepriaznivý skokovitý priebeh teploty bolo v neskorších experimentoch upustené od primiešavania syntézneho plynu a ten bol spaľovaný len na fakli, bez využitia uvoľnenej tepelnej energie. Priebeh teploty v pyrolýznej komore kopíruje teplotu ohrevu s menším oneskorením vplyvom

akumulácie tepla a s nie tak výrazným kolísaním. Pre tento cyklus pyrolýzy sa prvý kondenzát začal tvoriť pri teplote 337 °C a kontinuálne narastal až do vyčerpania kapacity náplne pyrolýzneho reaktora. Nárast hmotnosti kondenzátu bol ukončený po približne 107 minútach, kedy bol pyrolýzny proces ukončený a nasledovala fáza ochladzovania reaktora.



Obr. 7.9 Priebeh teplôt a hmotnosti kondenzátu z vybraného cyklu pyrolýzneho spracovania plastového odpadu



Obr. 7.10 Priebeh teplôt a prírastku hmotnosti kondenzátu z vybraného cyklu pyrolýzneho spracovania plastového odpadu

Pre optimalizáciu pyrolýzneho procesu je dôležité nájsť optimálnu teplotu v pyrolýznej komore pre daný vstupný materiál. Pracovná teplota je najdôležitejším prevádzkovým parametrom. Technologický problém hľadania optimálnej pracovnej teploty je o to zložitejší, pretože zastúpenie jednotlivých druhov plastov je vo vstupnej vsádzke premenlivé. Preto je optimálna

pracovná teplota určená ako priemerná teplota z viacerých meraní, pri ktorých bol dosahovaný optimálny výsledný kvapalný produkt – pyrolýzny olej.

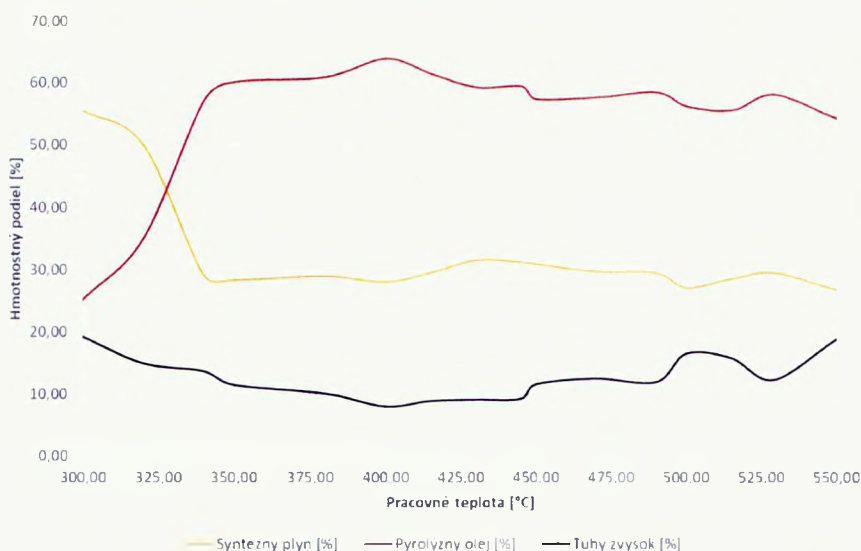
Z priebehu hmotnostného prírastku kondenzátu je zrejmé, že optimálna teplota v komore pyrolýzneho reaktora je pre konkrétny cyklus v rozmedzí teplôt 350 až 450 °C. Táto hypotéza bola potvrdená opakovanými meraniami. Zvyšujúca sa pracovná teplota nemala za následok zvýšenie hmotnostného prírastku za časovú jednotku.

Tab. 7.15 a obr. 7.11 ukazujú hmotnostné podiely produkovaného syntézneho plynu, pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku v závislosti na pracovnej teplote v komore pyrolýzneho reaktora. Rýchlosť ohrevu vsádzky reaktora bola pri každom z meraní konštantná, 35 °C.min⁻¹. Pri nízkych teplotách bol produkovaný najmä syntézny plyn a podiel tuhého zvyšku bol pomerne vysoký. So zvyšujúcou sa teplotou rýchlo narastal hmotnostný podiel produkovaného pyrolýzneho oleja, podiel syntézneho plynu a tuhého zvyšku klesal. Z rozptylu teplôt pri danej rýchlosti ohrevu možno konštatovať, že optimálna teplota, kedy je zakaždým dosahovaný optimálny (maximálny) podiel pyrolýzneho oleja, je 400 °C. Ďalšie zvyšovanie teploty nad optimálnu teplotu nemalo želaný efekt, nastal postupný pokles produkovaného pyrolýzneho oleja a nárast hmotnostného podielu tuhého zvyšku, ktorý mal charakter škvary s výrazným obsahom spekančov teplotne degradovaného vstupného materiálu. Pre spracovanie plastového odpadu z automobilov po dobe životnosti je rozhodujúca produkcia čo najmenšieho podielu tuhých zvyškov, pretože okrem uhlíka je v nich obsiahnutých veľa nežiadúcich látok, napríklad z náterov a lakov, zmäkčovadiel, UV stabilizátorov, spomaľovačov horenia a pod. Tieto tuhé zvyšky, môžu byť pre svoje chemické zloženie klasifikované ako nebezpečný odpad. Chemický rozbor tuhých zvyškov, ktorý poukáže napríklad na obsah ťažkých kovov bude zhodnotený v neskoršom texte.

Tab. 7.15 Vplyv pracovnej tepoty v komore pyrolýzneho reaktora na produkciu syntézneho plynu, pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku.

Pracovná teplota [°C]	Syntézny plyn [%]	Pyrolýzny olej [%]	Tuhý zvyšok [%]
300	55,58	25,12	19,30
320	50,17	34,83	15,00
340	29,25	57,04	13,71
350	28,40	60,10	11,50
380	29,00	60,90	10,10
400	28,10	63,90	8,00
415	29,60	61,50	8,90
430	31,60	59,30	9,10
445	31,30	59,45	9,25
450	31,00	57,40	11,60
470	29,78	57,69	12,53
490	29,54	58,49	11,97
500	27,18	56,23	16,59
515	28,59	55,61	15,80
529	29,57	58,13	12,30
550	26,84	54,26	18,90

Optimalizovaný prevádzkový parameter procesu: rýchlosť nárastu 35 °C.min⁻¹ z teploty 300 °C na požadovanú, odpad z autoakelácie neprijateľný.



Obr. 7.11 Vplyv pracovnej teploty v komore pyrolýzneho reaktora na produkciu syntézneho plynu, pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku

Ďalší výskum bol venovaný vplyvu rýchlosti ohrevu vsádzky pyrolýzneho reaktora – gradientu nárastu teploty za čas a dĺžke zádržnej doby pri nastavenej pracovnej teplote. Dá sa predpokladať podľa [12, 13], že oba parametre tohto procesu nebudú mať na proces taký zásadný vplyv ako pracovná teplota v reaktore.

Viacere literárne zdroje [12, 13] uvádzajú, že gradient teploty za čas nie je taký významný prevádzkový parameter a významne neovplyvňuje hmotnostný podiel jednotlivých produktov procesu. Príliš rýchly ohrev vsádzky reaktora mal za následok tvorbu spekančov a neskôr škvary tuhých zvyškov, ale hmotnostne sa odlišovali od priemernej hmotnosti tuhého zvyšku len o 4 %. Experimenty prebiehali s nastaveným požadovaným gradientom nárastu teploty až po dosiahnutie optimálnej pracovnej teploty 400 °C s rovnakou zádržnou dobou na tejto teplote po dobu 60 minút. Za optimálny nárast teploty možno pokladať 35 °C.min⁻¹, kedy je proces pyrolýzy dostatočne rýchly a podiel tuhého zvyšku je minimálny (tab.7.16).

Zádržná doba má vplyv na dĺžku prebiehajúcich depolymerizačných procesov, kvalitu a pomer výsledných produktov. Počas praktických experimentov bolo meranie ukončené vždy v čase jednej minúty po tom, čo bolo ukončené vytekanie pyrolýzneho oleja z kondenzačného výmenníka. Pre priemernú hmotnosť vsádzky 3,5 kilogramov bola priemerná dĺžka pyrolýzneho procesu 110 minút.

Z experimentálnych meraní sú zrejmé závery o optimálnych parametroch pyrolýzneho procesu:

- optimálna pracovná teplota je 400 °C;
- optimálny gradient nárastu pracovnej teploty je 35 °C.min⁻¹;
- proces pyrolýzy možno charakterizovať ako nízkoteplotná pomalá pyrolýza.

Tab. 7.16 Vplyv rýchlosti ohrevu vsádzky v komore pyrolýzneho reaktora na produkciu syntézneho plynu, pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku

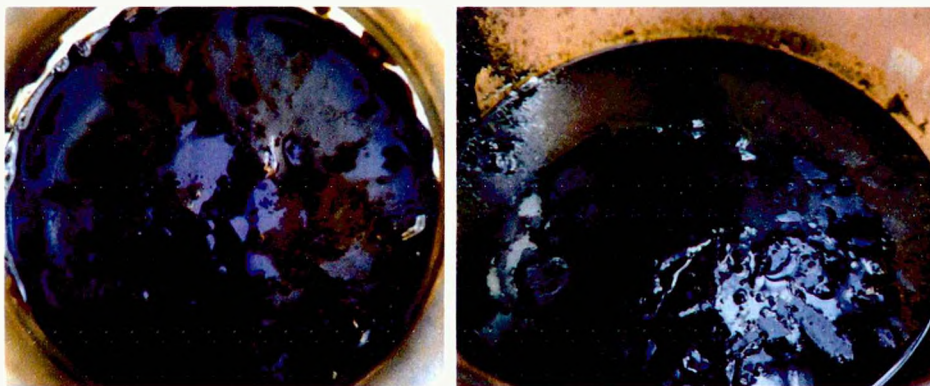
Rýchlosť ohrevu [°C.min ⁻¹]	Syntézný plyn [%]	Pyrolýzný olej [%]	Tuhý zvyšok [%]
5	31,25	59,45	9,30
10	29,38	61,12	9,50
22	31,05	60,50	8,45
31	28,64	62,96	8,40
35	28,06	63,84	8,10
42	29,86	60,94	9,20
54	29,46	58,64	11,90
71	32,58	54,72	12,70

7.6 Chemická analýza produktov pyrolýzneho procesu

Za najdôležitejší produkt pyrolýzneho zhodnocovania plastov z automobilového priemyslu je považovaný pyrolýzný olej, ktorý je možno ďalej využiť:

- priamo ako palivo;
- alebo ako vstupnú surovinu pre petrochemický priemysel na výrobu ušľachtilých palív a mazív, alebo surovinu pre výrobu nových plastov.

Vzorky vyprodukovaného pyrolýzneho oleja boli podrobené analýzam, najdôležitejšie boli analýzy chemického zloženia a výhrevnosti. Už počas procesu boli vzorky rozdelené podľa viskozity na ľahkú a ťažkú frakciu (obr. 7.6), farebne sa jednalo o tekutiny modro-zelenej až čiernej farby (obr. 7.12). Ťažkú frakciu možno hustotou prirovnáť k mazutu, alebo ťažkému vykurovaciemu oleju, ľahkú frakciu možno hustotou prirovnáť k benzínu, naftu alebo petroleju.



Obr. 7.12 Vzorky pyrolýzneho oleja

Vzorky boli podrobené chromatografickej analýze chemického zloženia a analýze na obsah vybraných chemických prvkov. Příklad chromatografickej analýzy pre vzorku pyrolýzneho oleja ľahkej frakcie je ukázaný v prílohe 7.1. Příklad chromatografickej analýzy pre vzorku pyrolýzneho oleja ťažkej frakcie je ukázaný v prílohe 7.2. Tabuľka 7.17 ukazuje príklad výsledku chromatografickej analýzy, ukazuje niektoré významne zastúpené chemické zlúčeniny

vo vzorke. Za povšimnutie stojí vysoký obsah styrénu¹², ktorý je zdraviu nebezpečnou látkou. Pri bližšej analýze chemického zloženia a štúdiom dostupnej literatúry, ktorá sa zaoberá petrochémiou [12, 13] je možné konštatovať, že dané kvapaliny z pyrolýzneho procesu je možné spracovať frakčnou destiláciou do podoby ušľachtilých palív pre energetiku a dopravu, prípadne mazív, alebo ďalším spracovaním na nové plasty. Podľa viacerých autorov [12] sa pyrolýzny olej svojim chemickým zložením a vlastnosťami podobá na ropu a frakčnou destiláciou je možné z neho oddeliť zložky, ktorých následným spracovaním a miešaním môžu vzniknúť palivá pre energetiku a dopravu.

Tab. 7.17 Obsah niektorých chemických zlúčenín vo vzorke pyrolýzneho oleja – ľahká frakcia

Názov chemickej zlúčeniny	Percentuálny obsah v zmesi [%]
Benzén	2,93
Benzenbutan-nitril	7,91
Cyklohexán	3,78
Dipenylmetán	14,68
Etylbenzén	6,16
Heptán	1,32
Kyselina benzoová	5,9
Metyldekanol	3,64
Nonadekán	4,71
Styrén	10,22

Vstupný materiál pre proces pyrolýzy bol rôznorodý a z pohľadu chemickej čistoty to neboli čisté uhľovodíky, bol kontaminovaný rôznymi inými chemickými látkami, ktoré pochádzali napríklad z farieb a lakov, lepidiel, zmäkčovadiel plastov a UV stabilizátorov, spomaľovačov horenia a pod. Tieto kontaminujúce chemické látky často obsahujú napríklad ťažké kovy. Pre vyššie spomenuté dôvody bolo potrebné vzorky pyrolýzneho oleja podrobiť analýzam na prítomnosť niektorých vybraných chemických prvkov. Tab. 7.19 a tab. 7.20 ukazujú príklad zistených koncentrácií vybraných nežiadúcich chemických prvkov, ktoré sú považované za

¹² **Styrén** (fenyletylén, etylénbenzén, vinylbenzén) je nenasýtený uhľovodík, ktorý sa používa ako surovina na výrobu polystyrénu a syntetického kaučuku. Styrén je organická zlúčenina, chemický vzorec $C_6H_5CH=CH_2$. Tento derivát benzénu je bezfarebná olejovitá kvapalina sladkastej vône, ktorá sa ľahko vyparuje, na vzduchu oxiduje za tvorby peroxidov. Styrén je zle rozpustný vo vode, avšak dobre sa rozpúšťa v organických rozpúšťadlách (alkoholy, acetón a pod.).

Táto látka sa používa pri výrobe produktov ako sú náterové látky, plnidlá, tmely, v plastikárskom a gumárskom priemysle. Látka je využívaná tiež ako tzv. medziprodukt – teda pri výrobe ďalších látok. Najvýznamnejšie je využitie styrenu ako monoméru pre výrobu polystyrénu, príp. kopolymérov styrenu. Vyskytuje sa v produktoch ako guma, plasty, izolačné materiály, lamináty, rúry, súčasti automobilov a člnov, nádoby na potraviny a výstuže kobercov. Z vplyvu na životné prostredie je nutné si uvedomiť, že najpravdepodobnejšie uvoľňovanie tejto látky je v rámci priemyselného použitia styrenu: pri výrobe a spracovaní polymérov. Pri uvoľnení do ovzdušia sa styren mení v benzaldehyd a formaldehyd. Počas rozpadu v ovzduší je cca 2h. Na zdravie ľudí vplyva svojimi narkotickými a lokálne dráždivými účinkami. Koncentrácia 70 ppm ešte nevyvoláva podráždenie, koncentrácia 200 ppm až 400 ppm vyvoláva neprijemný pocit zápachu, nad 800 ppm sa prejavuje narkotický účinok, pri koncentrácii nad 1 300 ppm je dýchanie pár styrenu nezniesiteľné.

Klasifikácia a označovanie: V súlade s harmonizovanou klasifikáciou schválenou EÚ je styren horľavou kvapalinou s parami a zároveň predstavuje nasledujúce nebezpečenstvá pre zdravie ľudí: spôsobuje poškodenie orgánov pri dlhšej alebo opakovanej expozícii, spôsobuje vážne podráždenie očí, dráždi kožu, je škodlivý pri požití a je podozrenie, že spôsobuje poškodenie nenarodeného dieťaťa.

nebezpečné a pri ďalšom spracovaní pyrolýzneho oleja musia byť odstránené. Za najproblematickejší je považovaný vysoký obsah chlóru¹³, ktorý pravdepodobne pochádza zo vstupných materiálov na báze polystyrénu a PVC (táto hypotéza je potvrdená aj chemickou chromatografickou analýzou tab. 7.17 a 7.18). Obsah chlóru je vyšší v ťažkej frakcii pyrolýzneho oleja a vo všeobecnosti možno konštatovať, že obsah všetkých sledovaných chemických prvkov narastá s hustotou vzorky.

Tab. 7.18 Obsah niektorých chemických zlúčenín vo vzorke pyrolýzneho oleja – ťažká frakcia

Názov chemickej zlúčeniny	Percentuálny obsah v zmesi [%]
Benzén	9,60
Benzenbutan-nitril	1,72
Cyklohexán	10,38
Dipenylmetán	5,00
Heptán	1,68
Hexán	1,41
Dekanol	3,90
Nonadekán	3,87
Styrén	1,72

Za najdôležitejšiu vlastnosť z pohľadu energetického využitia pyrolýzneho oleja je hodnotenie výhrevnosti paliva. Výhrevnosť vzoriek bola vykonaná na kalorimetri Leco s kalorimetrickou bombou, kde spaľovanie vzorky prebieha v čistej kyslíkovej atmosfére, vzorka je zapáľovaná žeraviacim drôtikom. Tabuľka 7.21 ukazuje reprezentatívny výber odmeraných výhrevností pyrolýzneho oleja ľahkej a ťažkej frakcie (ľahká frakcia – označenie L, ťažká frakcia – označenie H). Z výsledkov analýz vyplýva, že priemerná výhrevnosť ľahkej frakcie je 42,81 MJ.kg⁻¹ a ťažkej frakcie 42,68 MJ.kg⁻¹, obe palivá majú vysoký priemerný energetický obsah. Porovnaním hodnôt z literatúrou [12] vyplýva, že vzorky pyrolýzneho oleja sú svojím energetickým obsahom porovnateľné s automobilovým benzínom, motorovou naftou alebo ťažkým vykurovacím olejom a mazutom.

¹³ Chlór je veľmi reaktívny prvok, priamo sa zlučuje s väčšinou prvkov periodickej tabuľky. S vodíkom reaguje za vzniku chlorovodíka, reakcia je katalyzovaná svetlom. Rovnako odoberá vodík z uhľovodíkov, až napokon ostáva iba elementárny uhlík. Viaceré prvky sa v chlóre spaľujú (napr. fosfor, antimón, niektoré kovy). Reakciu medi, resp. železa iniciujú už stopové množstvá vody, v suchom stave tieto prvky s chlórom nereagujú. Viaceré organické zlúčeniny chlóru majú toxické účinky na rastliny, živočíchy aj na človeka. Napr. DDT, masívne používaný insekticíd v 50. rokoch 20. storočia sa akumuluje v potravinovom reťazci a naruša funkciu androgénnych hormónov. V potravinovom reťazci sa rovnako kumulujú aj dioxíny, skupina polychlórovaných dibenzo-p-dioxínov a dibenzofuránov, ktorá vzniká ako produkt nedokonalého spaľovania aromatických chlórderivátov a má silné mutagénne účinky. Rozpad väzby C-Cl vo vrchných vrstvách atmosféry, vedúci k vzniku voľných Cl radikálov, viedol k zákazu používania chlór-fluorovaných uhľovodíkov, známych pod komerčným názvom freóny, nakoľko radikály Cl následne reagujú s ozónom a narušajú ozónovú vrstvu. Pri likvidácii odpadov s obsahom PCB spaľovanie prebieha pri teplote nad 1 200 °C s dobou zdržania spalín v dopaľovacej komore 2 až 3 sek. a prebytkom kyslíka min. 6 %. Problém s PVC nastáva v okamihu jeho horenia alebo tepelného rozkladu, za vysokých teplôt začína tepelne degradovať, pričom sa uvoľňuje široké spektrum veľmi toxických organických zlúčenín (najznámejší je asi fosgén). Aj pri riadenom spaľovaní sa do plynných spodín dostávajú atómy chlóru, ktoré pôsobia silne korozívne na spaľovacie aparatúry vďaka vznikajúcemu chlorovodíku. Reakciou chlóru s aromatickými uhľovodíkmi dochádza ku vzniku zvlášť nebezpečných dioxinov.

Tab. 7.19 Obsah vybraných chemických prvkov vo vzorke pyrolýzneho oleja – ľahká frakcia

Chemický prvok	Obsah [%]
Cl	1,48
Mg	1,36
Si	0,040
Fe	0,0178
Br	0,00078
Zn	0,00045
Cu	0,00018

Tab. 7.20 Obsah vybraných chemických prvkov vo vzorke pyrolýzneho oleja – ťažká frakcia

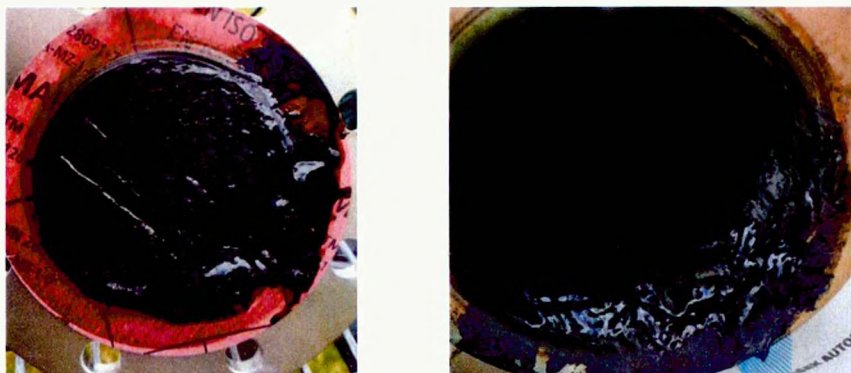
Chemický prvok	Obsah [%]
Cl	2,36
Mg	1,37
Fe	0,0586
Sb	0,0049
Br	0,0041
Cr	0,0027
Ni	0,0016
Zn	0,00052
Cu	0,00039

Tab. 7.21 Hodnotenie výhrevnosti vybraných vzoriek pyrolýzneho oleja

Vzorka	Výhrevnosť [MJ.kg ⁻¹]
1 _L	41,87
1 _H	43,01
2 _L	42,61
2 _H	41,62
3 _L	43,59
3 _H	42,73
4 _L	43,50
4 _H	44,82
5 _L	41,90
5 _H	42,54
6 _L	43,56
6 _H	41,97
7 _L	42,64
7 _H	42,05
Priemer_L	42,81
Priemer_H	42,68

Problematická prevádzka zariadenia na pyrolýzne zhodnocovanie plastov z automobilového priemyslu ako celku nastávala pri hľadaní optimálnych parametrov pyrolýzneho procesu a to najmä kvôli zanášaniu kondenzačného výmenníka voskovitými zložkami z pyrolýzneho oleja. Zanášanie sa prejavovalo najmä na najstudsenej – výtokovej časti výmenníka, nastávalo upchávanie výtokového otvoru, čím sa znižoval jeho prietokový prierez, čo malo za následok

nárast pracovného tlaku v komore pyrolýzneho reaktora nad únosnú hranicu, čo spôsobovalo havarijné prerušenie procesu a jeho predčasné ukončenie. Optimalizáciou riadenia teplôt pri kondenzácii sa podarilo problém vyriešiť. Příklad upchávania pri nesprávne zvolenej teplote kondenzácie je ukázaný na obr. 7.13.



Obr. 7.13 Voskovité zložky pyrolýzneho oleja

Za produkt pyrolýzneho spracovania plastov z automobilového priemyslu s najnižším potenciálom využiteľnosti možno považovať tuhý zvyšok, ktorý pre svoje chemické zloženie môže byť klasifikovaný ako nebezpečný odpad. Za tuhý zvyšok z procesu je možné považovať popol po procese pyrolýzy ale aj tuhý podiel zachytený vo filtračnom zariadení. Tieto zvyškové produkty obsahujú veľké množstvo uhlíka, sú ešte energeticky hodnotné a preto by mohli byť využité v spaľovacom zariadení. Obsahujú ale aj množstvo iných chemických prvkov (často nebezpečných), preto musí mať spaľovacie zariadenie prispôbený systém čistenia a neutralizácie spalín.

Tuhý zvyšok zachytený vo filtri bol preto podrobený analýze na obsah vybraných chemických prvkov (tab. 7.22). Opäť sa ukazuje veľký obsah chlóru, ale aj iných chemických prvkov, ktoré zhoršujú prípadné ďalšie energetické zhodnotenie tohto materiálu napríklad spaľovaním.

Pre popol, ako tuhý zvyšok z pracovnej komory pyrolýzneho reaktora bola urobená chromatografická analýza na obsah chemických látok (příklad analýzy pre vybranú vzorku popola je ukázaný v prílohe 7.3). V tejto vzorke je okrem uhlíka väčšia zmes cyklických, aromatických uhľovodíkov – hlavne zlúčeniny benzénu, fenylu a pod. Tab. 7.23 ukazuje analýzu obsahu vybraných chemických prvkov v popole. Opäť sa ukazuje veľký obsah chlóru, ale aj iných chemických prvkov, ktoré zhoršujú prípadné ďalšie energetické zhodnotenie tohto materiálu napríklad spaľovaním. Zvyšný obsah chemických prvkov bol hodnotený analýzou CHNO, kde pre tieto prvky vyšla hodnota 79,20 %. Obsah jednotlivých prvkov CHNO analýzy pre vybranú vzorku je ukázaný v tab. 7.24. Dosiahnutie optimálnych podmienok pri pyrolýznom procese je možné pozorovať aj po otvorení komory pyrolýzneho reaktora. Obr. 7.14a) ukazuje tuhý zvyšok – popol po pyrolýze pri optimálnych pracovných podmienkach, popol je tvorený jemnými časticami, rovnomernej zrnitosti a frakcie, popol je viac-menej čiernej farby. Pri iných ako optimálnych pracovných podmienkach (obr. 7.14b) má vznikajúci popol iný charakter, obsahuje jemné častice, ale aj spekance a škvaru, popol je sivej farby.

Z výsledkov predchádzajúcich chemických analýz možno vyvodit' teóriu, že čím má daný produkt pyrolýzy vyššiu hustotu, tým je obsah nežiadúcich chemických prvkov, napr. chlóru, vyšší. V kvapalnej fáze pyrolýzneho oleja ľahkej frakcie bol obsah chlóru najnižší, v tuhej fáze – popole z pyrolýzneho reaktora je obsah chlóru najvyšší.

Tab. 7.22 Obsah vybraných chemických prvkov vo vzorke tuhého zvyšku zachyteného vo filtračnom zariadení

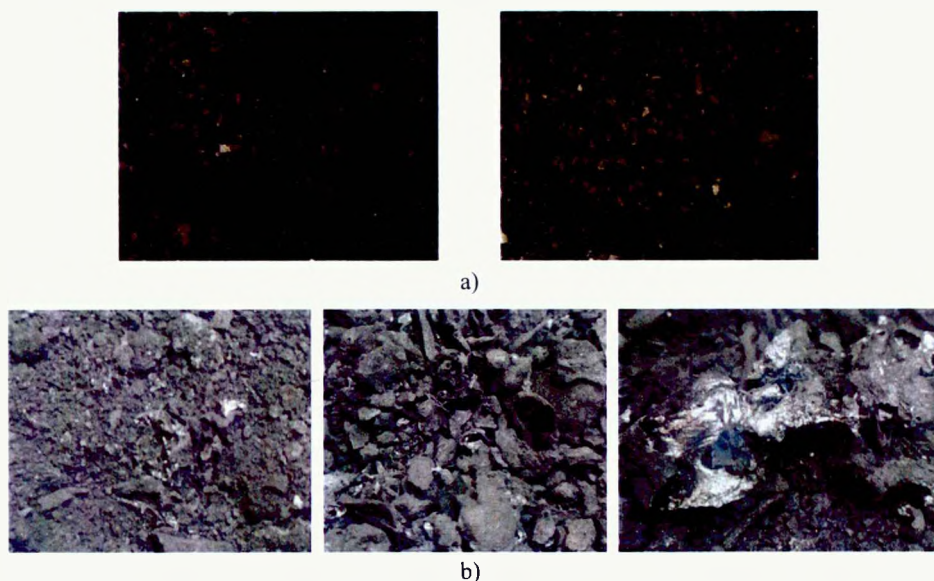
Chemický prvok	Obsah [%]
Cl	3,58
Mg	0,92
Fe	0,144
Cr	0,0209
Sb	0,0164
Ni	0,0090
Br	0,0031
Zn	0,0015
Cu	0,00076
Mo	0,00038

Tab. 7.23 Obsah vybraných chemických prvkov vo vzorke tuhého zvyšku – popola z pracovnej komory pyrolýzneho reaktora

Chemický prvok	Obsah [%]
Cl	7,93000
Fe	2,33000
Ca	2,21000
Na	2,16000
Ti	2,03000
Si	1,26000
Mg	1,18000
Al	0,50000
Cr	0,29400
Sb	0,28400
Ba	0,26300
Zn	0,10300
Sx	0,07060
K	0,05080
Ni	0,04510
Mn	0,04350
Br	0,03050
Cu	0,01170
Sr	0,00490
Mo	0,00180
Nb	0,00170
Pb	0,00150

Tab. 7.24 CHNO analýza tuhého zvyšku – popola z pracovnej komory pyrolýzneho reaktora

Chemický prvok	Sušina	Pôvodný stav
N	1,79	1,62
C	64,87	62,12
H	3,44	3,44
CHNO-XRF	79,20	
O ₂ - vypočítané	9,11	



Obr. 7.14 Tuhý zvyšok – popol po pyrolýze: a) pyrolýza prebiehala za optimálnych podmienok, b) pyrolýza prebiehala pri príliš vysokých teplotách

7.7 Záver

Pyrolýzne spracovanie odpadov v budúcnosti zohrá významnú úlohu pri využívaní odpadov, nielen na priame energetické využitie, ale aj ako zdroj vstupného materiálu pre výrobu ušľachtilých palív a mazív a aj pre chemický priemysel na opätovnú výrobu nových materiálov. Perspektívny výskum v tejto oblasti ukazuje, že je možné spracovať aj zmesový viacdruhový plastový odpad, pri priemernom zisku približne 90 % pôvodnej hmotnosti použiteľnej na energetické a iné účely (kvapalná a plynná fáza produktov pyrolýzy). Tuhý zvyšok je vhodný ako katalyzátor nasledujúceho cyklu pyrolýzy, pre svoj zvýšený obsah škodlivých látok je potom vhodné jeho spaľovanie v špeciálne upravenom spaľovacom zariadení, prípadne jeho uloženie na skládku odpadov.

Experimentálnymi meraniami boli nájdené optimálne parametre pyrolýzneho procesu, pracovná teplota 400 °C a rýchlosť ohrevu vsádzky 35 °C.min⁻¹. Chemickými analýzami produktov pyrolýzneho zhodnocovania odpadu z automobilového priemyslu (pyrolýzneho oleja a tuhého zvyšku) bolo potvrdené, že:

- pyrolýzny olej je vhodný ako palivo buď priamo, pre svoju vysoký energetický obsah, alebo na ďalšie spracovanie a vytvorenie ušľachtilých palív, ako benzínu, nafty alebo vykurovacieho oleja;
- tuhý zvyšok je taktiež energeticky využiteľný pre svoje vhodné chemické zloženie, priaznivé pre spaľovanie v špeciálnom spaľovacom zariadení;
- vznikajúci pyrolýzny olej je vhodné pri procese filtrovať a deliť na ľahkú a ťažkú frakciu, toto rozdelenie uľahčuje následné využitie a spracovanie.

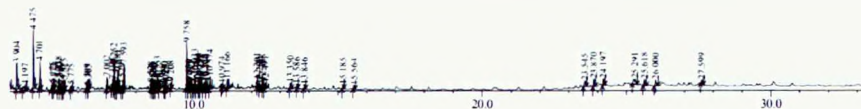
Takéto spracovanie odpadov si vyžaduje ešte ďalší výskum v oblasti použitia rôznych katalyzátorov na zlepšenie ekonomiky prevádzky pyrolýzneho reaktora a takisto v oblasti následného spracovania pyrolýzneho oleja a plynu.

Príloha 7.1 Chromatografická analýza vzorky pyrolyzného oleja – ľahká frakcia

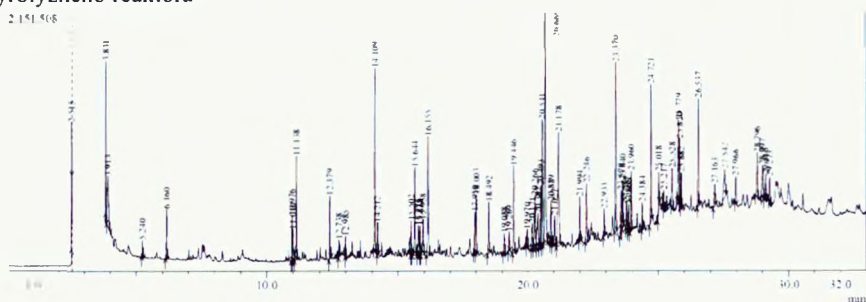


Peak#	R Time	I Time	F Time	Area	Area%	Height	Height%	A.H	Mark	Name
1	3.106	3.055	3.285	253562.17	1.86	4547777	1.32	5.48		2,4-Dimethyl-1-heptene
2	3.330	3.285	3.355	285284.79	2.09	11461973	3.33	2.49		Ethylbenzene
3	3.395	3.355	3.575	7181040.5	5.27	9734869	2.93	7.38	V	Ethylbenzene
4	3.655	3.575	3.875	2247283.39	16.49	24130185	7.01	9.31	V	Styrene
5	3.905	3.875	4.085	2486392.7	1.82	4254173	1.24	5.84	V	Benzene, (1-methylethyl)-
6	4.470	4.395	4.685	8342999.7	6.12	11046194	3.21	7.55		alpha-Methylstyrene
7	4.705	4.685	4.855	11839990	0.87	2878834	0.84	4.11	V	1-Decene, 2,4-dimethyl-
8	4.935	4.865	5.065	6564946	0.48	1206016	0.35	5.44		Benzene, 1-ethenyl-2-methyl-
9	5.175	5.065	5.285	20201344	1.48	2605050	0.76	7.75	V	5,4-Indecanol, 2-methyl-
10	5.377	5.285	5.455	1735640.5	1.27	2993779	0.87	5.80	V	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-
11	5.540	5.455	5.675	24589765	1.80	4450053	1.30	6.51	V	Benzene, (1-methylethyl-1-methylthyl)-
12	5.795	5.675	5.825	8550563	0.63	1825500	0.53	4.68	V	7-Heptadecene, 1-chloro-
13	5.865	5.825	5.945	3452095	0.25	1010811	0.29	3.42	V	5,4-dihydro-5-methyl-2-phenyl-2-oxazoline
14	6.015	5.945	6.085	12005626	0.88	2535715	0.74	4.73		1,2,4,6-Trimethylcyclohexylmethanol
15	6.147	6.105	6.185	6608918	0.48	2061034	0.60	3.20	V	11-Indene, 3-methyl-
16	6.377	6.185	6.425	21543996	1.58	2980125	0.87	7.23	V	1-Tridecene
17	6.508	6.425	6.625	15760693	1.16	2294003	0.67	6.87	V	Anulene
18	6.715	6.625	6.755	6688808	0.49	1542163	0.45	4.34	V	1-Decanol, 2-methyl-
19	6.885	6.755	6.925	8844299	0.65	1407490	0.41	6.28	V	11-Methyldodecanol
20	7.015	6.925	7.055	1375644	0.97	6710617	1.95	1.98	V	Oxalic acid, cyclohexyl tetradecyl ester
21	7.264	7.055	7.295	42730859	3.13	11754282	3.41	3.64	V	11-Methyldodecanol
22	7.328	7.295	7.355	7437979	0.55	4309871	1.25	1.73	V	11-Methyldodecanol
23	7.394	7.355	7.455	16584760	1.22	9131111	2.65	1.82	V	2,4-dipropyl-5-methyl-1-heptanol
24	7.605	7.455	7.635	41250953	3.03	17287220	5.02	2.39	V	Benzenebutanenitrile
25	7.715	7.635	7.735	3681259	0.27	667235	0.19	5.52	V	
26	7.754	7.735	7.805	5386987	0.40	1112228	0.32	4.84	V	1-Heptanol, 2,4-diethyl-
27	7.914	7.805	7.945	12003520	0.88	3040186	0.88	3.95	V	1-Hexadecanol
28	8.005	7.945	8.045	3724934	0.27	1145448	0.33	3.25	V	Biphenyl
29	8.348	8.045	8.415	20181271	1.48	1817791	0.56	10.52		Diphenylmethane
30	8.455	8.415	8.505	3717788	0.27	1033848	0.30	3.60	V	
31	8.535	8.505	8.675	15244764	1.12	4038299	1.17	3.78	V	Cyclohexane, exocyclo-
32	8.762	8.675	8.795	15683858	1.15	6472854	1.80	2.42	V	2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetramethyl-, [R]-[R*]
33	8.935	8.795	8.985	13330377	0.98	2260858	0.66	5.90	V	Benzenecarboxylic acid, 4-tridecyl ester
34	8.995	8.985	9.055	7234731	0.53	4179216	1.21	1.73	V	Cyclobutanecarboxylic acid, undec-2-enyl ester
35	9.217	9.105	9.245	9806117	0.72	4575484	1.33	2.14	V	Cyclopentane, 1-pentyl-2-propyl-
36	9.265	9.245	9.315	1369404	0.10	828901	0.24	1.65	V	Tetralone
37	9.775	9.695	9.805	47628502	3.49	27097779	7.87	1.76		Benzene, 1,1,4,4,3-propanedithiol-
38	9.839	9.805	9.895	158017653	1.16	5446869	1.58	2.90	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
39	10.045	9.895	10.065	22277846	1.63	8134583	3.36	7.74	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
40	10.244	10.065	10.305	307538526	2.26	6492065	1.65	5.40	V	1,2-Dicyclohexylbutane
41	10.347	10.305	10.425	14210140	1.04	3293266	0.95	4.33	V	Isobutyric acid, 2-penten-10-yl ester
42	10.445	10.425	10.535	8379658	0.61	4639001	1.35	1.81	V	Naphthalene, decahydro-1,4a-dimethyl-7,4,1-m
43	10.583	10.535	10.665	10840741	0.80	5773739	1.68	1.89		Benzene, 1,1,4,3-methyl-1-propenyl-1,3-dithiol-
44	10.904	10.825	10.965	11028595	0.81	2339130	0.68	4.71		1-Nonadecene
45	10.985	10.965	11.125	10354379	0.76	3887962	1.13	2.66	V	Cyclobutanecarboxylic acid, 6-hexyl-1-octyl ester
46	11.174	11.125	11.235	11689215	0.86	6601660	1.92	1.77	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
47	11.361	11.235	11.465	16298128	1.20	4304359	1.25	3.79	V	Cyclohexane, 1,5-dimethyl-2,3-dimethyl-
48	11.543	11.465	11.695	10609521	0.78	2996415	0.87	3.44	V	Cyclohexane, 1,2,3,5-tetraisopropyl-
49	11.895	11.825	11.965	6620795	0.44	1675798	0.49	3.59		n-Tetradecanol
50	12.024	11.965	12.085	7209307	0.53	2834109	0.82	2.54	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
51	12.208	12.085	12.275	21323468	1.56	5473576	1.59	3.90	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
52	12.304	12.275	12.345	8561029	0.63	3981690	1.16	2.15	V	Bicyclo[4.4.1]undec-2,4,8-triene
53	12.395	12.345	12.445	14506378	1.06	6195492	1.81	2.34	V	Cyclohexane, 1,5-dimethyl-2,3-dimethyl-
54	12.597	12.445	12.665	11725644	0.86	3065286	0.89	3.81	V	Cyclohexane, 1,2,3,5-tetraisopropyl-
55	12.925	12.855	12.975	6202973	0.46	1820005	0.53	3.41		Hexenonitril trifluoroacetate
56	13.131	12.975	13.205	7433382	0.55	2007320	0.58	3.70	V	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
57	13.358	13.205	13.425	12112640	0.89	4113131	1.19	2.64	V	Tetraacetonitril pentafluoropropionate
58	13.595	13.425	13.665	1380438	1.02	3636470	1.06	3.82	V	1,3-Dioxolane, 4-hept-6,5-methyl-2,2-bis(trifluoromethyl)-
59	14.852	14.805	14.945	7235893	0.53	2255741	0.66	3.21		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
60	15.196	15.155	15.305	6158814	0.45	2568231	0.75	2.40		1,3-Dioxolane, 4-hept-5,5-methyl-2,2-bis(trifluoromethyl)-
61	17.038	16.975	17.125	6490159	0.48	1283110	0.37	5.06		Cyclohexane, 1,5-dimethyl-2,3-dimethyl-
62	17.575	17.515	17.655	5303472	0.39	1831311	0.53	2.90		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
63	18.166	18.095	18.225	3487316	0.26	1171785	0.34	2.98		Cyclohexane, 1,2,3,5-tetraisopropyl-
64	21.289	21.195	21.365	5065175	0.37	1184304	0.34	4.28		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
65	22.157	22.085	22.225	3688403	0.27	1039257	0.30	3.55		Cyclohexane, 1,2,3,5-tetraisopropyl-
66	23.247	23.195	23.355	5055512	0.37	1617923	0.47	3.12		Triacetonitril heptafluorobutyrate
67	23.558	23.505	23.725	1380415	1.03	3064403	0.89	4.46		Tetraacetonitril pentafluoropropionate
68	23.883	23.845	23.965	8253483	0.61	3764272	1.09	2.19		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
69	24.209	24.155	24.385	5359787	0.39	2339217	0.68	2.29		Cyclohexane, 1,2,3,5-tetraisopropyl-
70	24.939	24.895	25.045	6362522	0.47	5001936	0.58	1.18		Triacetonitril heptafluorobutyrate
71	25.308	25.225	25.425	10103108	0.74	2401343	0.70	4.21		Dotriaconitril pentafluoropropionate
72	25.636	25.585	25.715	10030417	0.74	3768846	1.04	2.66		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
73	26.017	25.965	26.155	9613501	0.71	2626400	0.76	3.66		Octatriaconitril trifluoroacetate
74	26.810	26.745	26.925	8143790	0.60	1877016	0.55	4.34		Tricetonitril heptafluorobutyrate
75	27.002	26.925	27.085	6355987	0.47	1743623	0.51	3.64	V	Octatriaconitril trifluoroacetate
76	27.165	27.085	27.305	6249555	0.46	1943212	0.56	3.22	V	(E)-Dodec-2-enyl (E)-2-methylbut-2-enolate
77	27.244	27.205	27.385	10093566	0.74	2366154	0.69	4.27	V	Hexacetonitril
78	27.622	27.555	27.745	10214747	0.75	3153645	0.92	3.24		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
79	28.100	28.015	28.185	7076342	0.52	1980719	0.58	3.57		Octatriaconitril trifluoroacetate
80	29.531	29.585	30.585	5066410	0.42	1529884	0.44	3.72		Oxalic acid, hexadecyl-1-methyl ester
81	29.642	29.585	29.785	7558475	0.55	1428069	0.41	5.29	V	Hexacetonitril
82	30.131	30.055	30.275	9861390	0.72	2327969	0.68	4.24		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
83	30.769	30.685	30.865	5274479	0.39	1296838	0.38	4.07		Octatriaconitril trifluoroacetate
84	33.499	33.405	33.605	6038512	0.44	1234725	0.36	4.93		Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexaethyl-
				1363093515	100.00	344231561	100.00			

Príloha 7.2 Chromatografická analýza vzorky pyrolýzneho oleja – ťažká frakcia



Príloha 7.3 Chromatografická analýza zvyšku – popola z pracovnej komory pyrolýzneho reaktora



Peak#	R Time	I Time	F Time	Area	Area%	Height	A/H	Mark	Name
1	2.515	2.500	2.525	66640*	1.14	681422	2.49	0.98	Carbanic acid, monoammonium salt
2	3.831	3.805	3.860	121670*	2.09	1294191	4.54	0.94	Butane, 2-chloro-2-methyl-
3	3.913	3.860	4.005	1587344	2.72	414171	1.4*	0.8	2-Pentanone, 4-methyl-
4	4.240	4.21*	4.280	172654	0.30	139017	0.49	1.24	2-Hexanol, (S)-
5	6.160	6.120	6.19*	560515	0.96	411748	1.44	1.36	Styrene
6	10.976	10.935	10.995	592223	1.02	175346	1.32	1.58	Phthalic anhydride
7	11.010	10.99*	11.060	476629	0.82	258838	0.91	1.84	Benzenesulfonamide
8	11.138	11.060	11.185	1286663	2.21	859206	3.01	1.50	Benzenesulfonamide
9	12.379	12.340	12.430	717088	1.35	625714	1.83	1.12	Phthalimide
10	12.738	12.710	12.77*	192066	0.33	143083	0.50	1.34	1-Naphthalenesulfonamide
11	12.985	12.96*	13.020	223501	0.48	177450	0.62	1.26	1-Naphthalenesulfonamide
12	14.109	14.050	14.160	2595221	4.45	1511104	4.40	1.72	Benzene, 1,1'-[3,3'-oxybis(4-phenyl)-
13	14.212	14.180	14.240	375672	0.64	265515	0.93	1.41	1-Naphthaleneacetamide
14	15.402	15.470	15.535	481216	0.83	283962	1.00	1.69	Benzene, 1,1'-[1,4-bis(methylthio)-
15	15.644	15.535	15.720	1578012	2.71	725701	2.54	2.18	Benzenesulfonamide
16	15.775	15.720	15.810	574181	0.98	244345	0.86	2.15	
17	15.538	15.810	15.565	444347	0.76	240061	0.84	1.85	2,3,4-Trimethyl-N-[2-(2-methyl-1H-indol
18	15.955	15.865	16.015	813932	1.30	286489	1.00	2.84	Benzenesulfonamide
19	16.155	16.090	16.225	2567101	3.40	983492	1.45	2.61	4-Isopropyl-2-methyl-1H-indol-3-yl
20	17.950	17.89*	17.97*	805342	1.38	337036	1.18	2.39	4-Hydroxy-1,2-dihydro-4-oxo-1H
21	18.930	17.97*	18.955	1073242	1.84	462249	1.49	2.25	4-Methyl-1-methylpiperidin-4-yl)benze
22	18.492	18.440	18.555	876106	1.50	424865	1.49	2.06	Naphthalene, 2-phenyl-
23	19.088	19.045	19.140	887825	0.66	174698	0.61	2.22	4-Methyl-1-methylpiperidin-4-yl)benze
24	19.269	19.225	19.305	298819	0.51	156901	0.55	1.90	4-Methyl-1-phenanthrene
25	19.446	19.390	19.505	1516289	2.60	718944	2.52	2.11	1H-indole-1,3-bis(1-dione, 2-phenyl-
26	19.979	19.935	20.030	331919	0.57	148543	0.52	2.20	
27	20.171	20.120	20.210	478839	0.82	204168	0.72	2.35	Benzaldehyde, 4-benzoyloxy-2-fluoro-4-m
28	20.266	20.210	20.315	1107563	1.90	341212	1.51	2.57	Benzene, 1,1'-bis(methylthio)-
29	20.387	20.315	20.425	945708	1.64	275415	0.96	3.18	Naphthalene, 2-phenylthiophenyl-
30	20.495	20.425	20.510	1027925	1.76	399041	1.75	2.06	1,8-Anticarsinene
31	20.541	20.510	20.585	2176944	3.73	1040971	1.65	2.09	Benzene, 6-benzoyl-
32	20.669	20.585	20.760	4716013	8.09	1935685	6.78	2.44	Benzenesulfonamide
33	20.889	20.855	20.930	679965	1.17	347614	1.22	1.96	4-Methyl-3-(3-oxo-1-phenyl-1-pentameth
34	21.027	20.930	21.080	641532	1.10	251539	0.85	2.55	p-Terphenyl
35	21.178	21.095	21.260	2990355	5.13	938178	1.29	3.19	3-Cyclohepten-1-ol, 3-phenyl-
36	21.994	21.960	22.030	634660	1.09	161099	1.27	1.76	(2,3-Diphenylcyclopropyl)methyl phenyl
37	22.246	22.190	22.310	1278763	2.19	484763	1.70	2.64	
38	22.933	22.895	22.97*	418047	0.72	227685	0.80	1.84	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexamethyl-
39	23.070	23.020	23.430	2855585	4.90	1995604	4.39	2.05	Succinimide, 2-benzyl-3-phenyl-
40	23.579	23.515	23.610	621828	1.07	347782	1.22	1.79	
41	23.640	23.610	23.670	654779	1.12	179218	1.33	1.74	Cyclopentane, 1-phenyl-3-phenylthiophen
42	23.787	23.770	23.825	314343	0.71	219858	0.77	1.89	Cyclohexane, 1,5-bis(1,2,3-dimethyl-3-
43	23.865	23.825	23.905	411225	0.71	221417	0.78	1.86	
44	23.960	23.905	24.005	916043	1.57	499522	1.75	1.83	
45	24.484	24.440	24.415	408018	0.70	226049	0.80	1.78	Benzene, 1,1'-[4-(4-phenylthiophenyl)-1,7-bis
46	24.721	24.665	24.775	1931373	3.32	1135961	3.98	1.70	Acridone, 9-phenyl-
47	25.013	24.985	25.045	499268	0.86	113025	1.10	1.89	Succinimide, 1-(4-cyclohexen-1-yl)-N-ph
48	25.217	25.165	25.275	284902	0.39	149017	0.46	1.78	
49	25.528	25.480	25.585	807904	1.39	324244	1.13	2.40	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexamethyl-
50	25.779	25.730	25.800	1488146	2.55	658671	2.31	2.26	(1-Benzyl-2-(4-hydroxyethyl)-isonitrile
51	25.820	25.800	25.850	873365	1.50	516329	1.88	1.63	(1-Benzyl-2-(4-hydroxyethyl)-isonitrile
52	25.882	25.855	25.915	469494	0.81	266982	1.01	1.64	Cyclohexane, 1,5-dimethyl-2,3-dimethyl-
53	26.537	26.495	26.575	1684175	2.89	890429	3.12	1.89	2-Naphthalen-2-yl-isonitrile-1,3-dione
54	27.163	27.105	27.205	481507	0.83	179632	0.63	2.68	Cyclohexane, 1,2,3,4,5,6-hexamethyl-
55	27.542	27.450	27.605	976732	1.67	234401	0.82	4.17	Oxalic acid, hexadecyl 1-methyl ester
56	27.966	27.930	28.010	454633	0.78	219179	0.77	2.07	Cyclohexane, 1,5-dimethyl-2,3-dimethyl-
57	28.796	28.740	28.850	879270	1.51	365546	1.25	2.41	
58	28.987	28.945	29.045	695536	1.19	261511	0.92	2.66	Benzene, 1,1'-[4-(4-phenylthiophenyl)-1,7-
59	29.110	29.045	29.160	512814	0.88	209239	0.73	2.45	Benzenesulfonamide
60	29.273	29.235	29.325	449353	0.77	205925	0.72	2.18	Phthalimide, N-(2-benzylthiophenyl)-
				48322013	100.00	28512639	100.00		

Literatúra

- [1] BEUKENS, A. 2013. Incineration Technologies, Springer 2013. 90 s. ISBN 978-1-4614-5751-0.
- [2] BRIGWATER, A., V. 2002. Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste. Strasbourg: CPL Press, 2003. ISBN 978-1-872691-77-0.
- [3] ČARNOGURSKÁ, M. – LAZÁR, M. 2013. Plazmové spracovanie a zhodnocovanie odpadu. Košice: Strojnícka fakulta Technickej univerzity v Košiciach. 2013. 164 s. ISBN 978-80-553-1541-0.
- [4] ČERMÁK, O. a kol. 2008. Životné prostredie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2008. 390 s. ISBN 978-80-227-2958-1.
- [5] HESTER, R.E. – HARRISON, R.M. 1994. Waste Incineration and the Environment. Royal Society of Chemistry 1994. 158 s. ISBN 0-85404-205-9.
- [6] JANDAČKA, J. a kol. 2014. Energetické využitie komunálneho odpadu. Žilina: UNIZA – edis, 2014. 170 s. ISBN 978-80-554-0923-8.
- [7] JANDAČKA, J. a kol. 2014. Produkcia komunálneho odpadu. Žilina: UNIZA – edis, 2014. 113 s. ISBN 978-80-554-0897-2.
- [8] KARAGIANNIDIS, A. 2012. Waste to Energy, Opportunities and Challengers for Developing and Transition Economies, Springer 2012. 370 s. ISBN 978-1-4471-2305-7.
- [9] KNAPČIKOVÁ, L. – ORAVEC, P. 2009. Využitie pyrolýzy pri zhodnocovaní odpadových plastov. In: Najnovšie trendy, v strojárstve a odpadovom hospodárstve [zborník na CD ROM]. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2009, s. 190-194. ISBN 978-80-552-0208-2.
- [10] KISHORE-NADKARNI, R. A. 2000. ASTM – Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants. ASTM, 2000. ISBN 0-8031-2087-7.
- [11] LIPTÁKOVÁ, T. – ALEXÝ, P. – GONDÁR, E. – KHUNOVÁ, V. 2012. Polymérne konštrukčné materiály, UNIZA – edis 2012, ISBN 978-80554-0505-6.
- [12] LYONS, W. 2010. Petroleum and Natural Gas Production Engineering. Gulf Publishing, 2010. ISBN 978-1-85617-845-7.
- [13] MATAR, S. 2000. Chemistry of Petrochemical Processes, 2nd Edition. Gulf Publishing, 2000. ISBN 978-0-88415-315-3.
- [14] PUIGJANER, L. 2011. Syngas from Waste, Emerging Technologies, Springer 2011. 327 s. ISBN 978-0-85729-539-2.
- [15] Plasty používané na výrobu automobilu – Dostupné na internete: <http://www.plasticportal.sk/sk/progresivne-vyvijane-polymerne-kompozity-v-automotive.html/c/1945>
- [16] <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [17] www.enviroportal.sk
- [18] www.odpady-portal.sk
- [19] www.techplasty.sk

UNIVNET 2023

UNIVNET – Univerzitná a priemyselná výskumno-edukačná platforma recyklujúcej spoločnosti

Editor: Dr.h.c. prof. Ing. Ľubomír Šooš, PhD.
Ing. Marek Patsch, PhD.

Technická úprava: Ing. Marek Patsch, PhD.
Ing. Peter Pilát, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline



ISBN 978-80-227-5377-7