

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra technologických zařízení staveb



Bakalářská práce

Návrh recyklační linky na zpracování odpadních kabelů

Roman Rada

© 2021-22 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Roman Rada

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Návrh recyklační linky na zpracování odpadních kabelů

Název anglicky

Design of a recycling line for the processing of waste cables

Cíle práce

Cíle diplomové práce vycházejí z literární rešerše současné problematiky technologických zařízení pro zpracování a využití odpadních kabelů. Metodický postup práce bude vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců, charakteristiky legislativy v dané oblasti odpadového hospodářství, popisu a návrhu technologie a techniky vhodné ke zpracování a využití odpadních kabelů.

Praktická část práce zahrnuje analýzu technických zařízení pro zpracování odpadních kabelů. Bude uskutečněn návrh technologie na zpracování odpadních kabelů s ekonomickým posouzením. Student vypracuje posouzení návrhu s ohledem na fyzikálně-chemické vlastnosti vzorků odpadních kabelů.

Metodika

Diplomová práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Výchozí podmínky řešení
5. Návrh řešení a dosažené výsledky
6. Diskuse a závěry
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

Měď, hliník, PVC, plastifikátory, drtič, separátor

Doporučené zdroje informací

Ducháček, V.; Hrdlička, Z.: Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.

Chotěborský, R. Nauka o materiálu. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.

Juchelková, D.; Fibinger, V.; Mika, J.: Metody nakládání s odpady. 1. vydání. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 1996. 62 s. ISBN 80-7078-309-5

Juchelková, D.: Likvidace a využití odpadů. Ostrava, VŠB TU Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-747-3

Muller, M.: Zpracovny nekovového odpadu. ČZU, Praha, 2008, 154 s.



Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 11. 10. 2021

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 11. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 24. 11. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Návrh recyklační linky na zpracování odpadních kabelů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28. 3. 2022



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Janu Malat'ákovi, Ph.D. za odborné vedení a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce.

Návrh recyklační linky na zpracování odpadních kabelů

Abstrakt

Práce si klade za cíl navrhnout, na základě poznatků o zpracování odpadů využitelných pro získání druhotných surovin, efektivní recyklační linku na zpracování odpadních kabelů z elektrotechnické a stavební výroby a z elektroodpadu. Zabývá se legislativními podklady pro nakládání s odpady a jejich zpracování. Objasňuje metody zpracování pevných odpadů a jejich přeměnu na dále využitelné zdroje materiálu a energie.

Praktická část práce se zabývá popisem a zhodnocením školní recyklační linky a jejím porovnáním s nově dostupnými technologiemi na zpracování vybraného druhu odpadu. Popisuje parametry vybraného vstupního materiálu do linky. Předkládá optimální technologickou sestavu strojů zařaditelných do linky tak, aby byla použitelná pro průmyslové zpracování odpadních kabelů a výstupním produktem linky byly dále využitelné kovy a energeticky využitelné plasty.

Přínosem práce je analýza materiálového složení vybraného druhu odpadu k recyklaci a zhodnocení a porovnání vybraných technologií separace. Návrh optimalizace linky a ekonomické zhodnocení nákladů. Po vyhodnocení hmotnostní analýzy bylo zjištěno, že vstupní odpadní směs kabelů se skládá z 29,4% odpadní mědi a 67,8% syntetických polymerů v podobě izolačních materiálů. K optimalizaci separačního úseku linky byla zvolena technologie magnetické separace na principu vířivých proudů.

Klíčová slova: měď, hliník, polymery, drtič, separátor, recyklace, elektroodpad, kabely, udržitelnost

Design of a recycling line for the processing of waste cables

Abstract

The work aims to design, based on knowledge about the processing of waste usable for the recovery of secondary raw materials, an efficient recycling line for the processing of waste cables from electrical and construction production and electrical waste. This work deals with legislative documents for waste management and processing. Clarifies the methods of solid waste treatment and their conversion into further usable sources of material and energy.

The practical part of the thesis deals with the description and evaluation of the school recycling line and its comparison with the newly available technologies for the processing of selected types of waste. Describes the parameters of the selected input material to the line. It presents the optimal technological set of machines that can be included in the line so that it can be used for industrial processing and the output product of the line are also usable metals and energy-usable plastics.

The benefit of the work is the analysis of the selected type of waste for recycling and the evaluation and comparison of selected separation technologies. Design of the optimization and economic evaluation of costs. After evaluating the mass analysis, it was found that the input waste cable mixture consisted of 29.4% waste copper and 67.8% synthetic polymers in the form of insulating materials. The technology of magnetic separation based on the eddy current principle was chosen to optimize the separation section of the line.

Keywords: copper, aluminum, polymers, crusher, separator, recycling, electrical waste, cables, sustainability

Obsah

Obsah	8
1 Úvod	10
2 Cíle práce a metodika	12
2.1 Cíle práce	12
2.2 Metodika práce.....	12
3 Přehled poznatků z literatury	13
3.1 Legislativa řešící nakládání s odpadem.....	14
3.1.1 Zákon o odpadech.....	14
3.1.2 Katalog odpadů	15
3.1.3 Norma ČSN EN 14899 o vzorkování odpadu	15
3.1.4 Zákon o výrobcích s ukončenou životností 542/2020	16
3.1.5 Nařízení Evropské komise 715/2013 o měděném šrotu	16
3.2 Popis jednotlivých skupin odpadů	18
3.2.1 Odpadní měď	19
3.2.2 Odpadní izolační materiály kabelů	20
3.2.3 Odpadní hliník	20
3.2.4 Optické kabely a jejich struktura	21
3.3 Problematika zpracování odpadních kabelů.....	23
3.3.1 Mechanické zpracování - dělení	24
3.3.1.1 Mechanické dělení stříháním nebo sekáním.....	24
3.3.1.2 Dělení drcením	25
3.3.1.3 Svílačky – oddělování odholováním izolace.....	26
3.3.2 Separace – rozdružování	27
3.3.2.1 Gravitační separace	27
3.3.2.2 Magnetická separace	28
3.3.2.3 Separace v elektrickém poli.....	29
3.3.2.4 Separace flotací	30
3.3.2.5 Odlučovače prachu	31
4 Výchozí podmínky řešení	32
4.1 Popis recyklační linky určené ke studijním účelům.....	32
4.1.1 Stroje zařazené v lince	34
4.2 Odpadní kabely k recyklaci.....	42
4.2.1 Hmotnostní analýza součástí vzorků odpadních kabelů.....	42
4.2.1.1 Metodika provedení hmotnostní analýzy	45

4.2.1.2	Vyhodnocení hmotnostní analýzy vzorků	46
5	Návrh řešení a dosažené výsledky	49
5.1	Praktická zkouška studijní recyklační linky	49
5.1.1	Dílčí závěry ze zkoušky studijní recyklační linky	53
5.2	Návrh optimalizace recyklační linky	54
5.2.1	Pneumatický dopravník	54
5.2.2	Pásové dopravníky	55
5.2.3	Úsek separace	55
5.2.4	Finanční analýza – ekonomické zhodnocení	58
5.2.4.1	Vyhodnocení finanční analýzy	60
6	Diskuze a závěry	61
6.1	Diskuse	61
6.2	Závěr	63
7	Seznam použitých zdrojů	64
7.1	Přehled použité literatury a zdrojů	64
7.2	Přehled obrázků	68
7.3	Přehled tabulek a grafů	69

1 Úvod

Odpadové hospodářství je průřezovým odvětvím, které se dotýká jak výroby a spotřeby, tak těžby surovin a jejich zpracování, přes výrobu až ke konečné spotřebě. Je to moderní technologické odvětví, které zahrnuje činnosti spojené s nakládáním, využitím a odstraňováním odpadů. Jedním z hlavních projevů moderní, na prosperitu orientované společnosti, je vysoká míra výstavby nemovité infrastruktury a sídel. Součástí výstavby a rozšiřování sídel je v moderním světě, vyjma ostatních inženýrských sítí, bez kterých si už nemůžeme tyto objekty představit, distribuce elektrické energie a výstavba fyzické vrstvy sdělovací infrastruktury. Rozvojem sídel současně vzrůstá spotřeba materiálů na výstavbu distribučních a sdělovacích rozvodů a vzrůstá i množství odpadu z nich. (HLAVATÁ, 2004)

Na odpad je potřebné, ve společnosti, která již natolik vyspěla, aby dokázala se zdroji nakládat environmentálně udržitelným způsobem, nahlížet jako na materiál – zdroj. Do budoucna je nutné počítat s tím, že se materiálová situace obrátí. Všechny odpad, který dnes představuje potencionální druhotné suroviny, se stane hlavním zdrojem surovin a nenačaté přírodní zdroje tak zůstanou rezervou pro budoucnost. (KURAŠ, 2014)

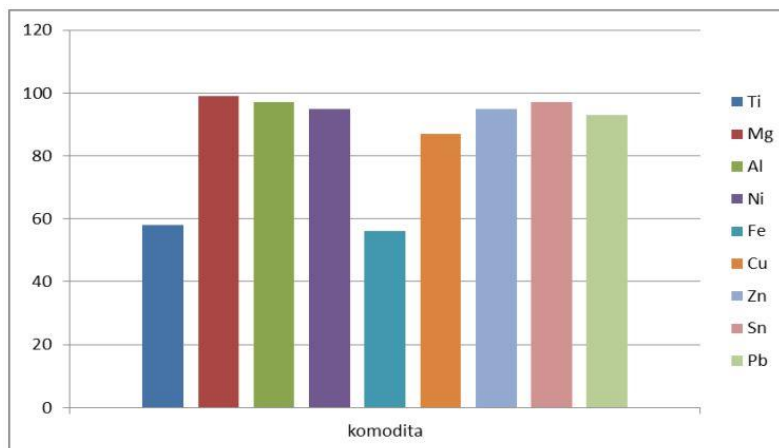
Zpracování kovových druhotných surovin významnou měrou vykrývá materiálovou spotřebu kovů. Česká republika nemá žádná významná ložiska rud, ze kterých je možné získat železné nebo neželezné kovy ve větší míře. Jediným a to velmi významným domácím zdrojem kovů jsou druhotné suroviny, které představují kovový šrot a materiály vytěžené z výrobků s ukončenou životností. Významnou předností kovového šrotu jako druhotné suroviny je relativně snadná recyklovatelnost, která dosahuje téměř 100 %. (Ministerstvo průmyslu a obchodu, ©2014)

Dosažení klimaticky neutrálního oběhového hospodářství vyžaduje úplnou mobilizaci průmyslu. K transformaci průmyslového sektoru bude třeba 25 let čili doba jedné generace. Od roku 1970 do roku 2017 vzrostl trojnásobně roční objem těžby a dále roste. Představuje to velké celosvětové riziko. Přibližně polovina celkových emisí skleníkových plynů a přibližně 90% úbytku biodiverzity je důsledek stále se zvyšující těžby zdrojů a zpracování materiálů. Pouze 12% materiálů zpracovávaných v průmyslu pochází z recyklovaných zdrojů. (Zelená dohoda pro Evropu, ©2019)

Jak uvedla Evropská komise (European parliament, ©2016) v dokumentu *Strategy for secondary raw materials* z roku 2016, druhotné suroviny jsou recyklované materiály, které lze použít ve výrobních postupech jako náhradu původních surovin nebo společně s nimi. Používání druhotných surovin představuje řadu výhod, včetně zvýšené bezpečnosti dodávek, snížené spotřeby materiálu a energie, snížení dopadů na klima a životní prostředí a snížených výrobních nákladů.

Měď a její slitiny pro elektrotechnické použití jsou významná součást sdělovacích i silových kabelů. V roce 2020 bylo pro použití v elektrozařízeních zpracováno 57% vyrobené mědi. Zpracováním odpadních kabelů jako zvláštního druhu elektroodpadu lze docílit úspory až 85% nákladů vynaložených na získání stejného množství mědi z rudy, přesto ale je běžnou praxí odpadní kabely používané zejména k realizaci podzemního vedení nechávat ležet v zemi a jako druhotnou surovinu je nevyužívat. Stejně tak není rozšířeno druhotné zpracování odpadních kabelů jako zdroje polymerních látek ke zpracování nebo využití jako paliva k pyrolýznímu zpracování nebo ve spalovnách. Je úkolem ekonomů posoudit, zda je výhodnější používat primární suroviny nebo suroviny druhotně zpracované, u kterých je třeba ohodnotit i nepeněžní zisk který získáme udržitelným hospodařením ve formě zhodnocení již zpracovaných primárních zdrojů. (Deutsches Kupferinstitut, ©2020)

Tato bakalářská práce se svým obsahem zařazuje do témat, která rozvíjí poznatky o odpadovém hospodářství a zhodnocují přínosy dalšího využívání materiálů označovaných za odpady. Hledá cesty, jak za stavu, kdy je společností kladen důraz na stálý ekonomický růst během rostoucí spotřeby energií a materiálů, nakládat s dostupnými zdroji trvale udržitelným způsobem.



Tabulka 1: úspora nákladů při výrobě kovů z odpadu. [%] (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2014)

2 Cíle práce a metodika

2.1 Cíle práce

Cílem práce je navrhnout recyklační technologickou linku na zpracování odpadních kabelů pro další využití druhotných surovin z nich získaných.

Dílčím cílem práce je zhodnotit efektivitu zpracování a využitelnost získaných druhotných surovin z odpadu, a to jak kovových, tak polymerních látek. Provést rešerši literatury a shrnout poznatky k tématu zpracování kovových odpadů a gumárenských odpadů obsahujících směs polymerních látek. Posoudit složení jednotlivých základních druhů kabelů používaných ve sdělovací a distribuční infrastruktuře. Provést posouzení ekonomického zhodnocení nákladů.

2.2 Metodika práce

Byly zvoleny následující metody zpracování práce:

1. Shrnutí legislativy řešící problematiku odpadového hospodářství
2. Popis jednotlivých vybraných skupin odpadů
3. Popis problematiky zpracování odpadních kabelů
4. Popis studijní recyklační linky
5. Hmotnostní analýza vzorků odpadních kabelů
6. Návrh optimalizace linky
7. Finanční analýza návratnosti investice

3 Přehled poznatků z literatury

Do pojmu odpad lze zahrnout mnoho druhů materiálů, přednostně by se ale měl používat pojem druhotná surovina. Zejména z toho důvodu, že zásoba primárních druhů surovin v přírodě není neomezená. Zajistit využívání druhotně zpracovatelných materiálů po co možná nejdelší dobu by mělo být jedním z hlavních cílů společnosti. (JUCHELKOVÁ, 2000)

Odpadové hospodářství jako legislativně podchycený obor je relativně mladé. Přestože postupnou industrializací společnosti vzrůstalo i množství vyprodukovaného odpadu nejen z výroby, ale i ze spotřeby, vyspělé země začaly řešit otázku nakládání s odpady relativně nedávno. V České republice došlo k legislativnímu zakotvení teprve zákonem o odpadech z roku 1991. Zákon ukládal povinnost původci odpadů zpracovat Program odpadového hospodářství, ve skutečnosti ale často nebyla tato povinnost ze strany původců odpadů dodržována. Nicméně tam, kde byly Programy zpracovány pečlivě, nejenom jako povinnost, splnily především ten účel, že se původci začali o odpady cíleně zajímat z ekonomického a environmentálního hlediska. (KURAŠ, 2008)

Soukromé firmy jsou obecně orientovány na zisk. Postupem času dochází k přijetí zásad *Corporate social responsibilities*, společenské odpovědnosti firem, která zahrnuje i zavedení zásad ekologického chování a trvale udržitelného využívání zdrojů surovin. Tato odpovědnost v konečném důsledku přinese i nárůst zisku. (HABISCH et al., 2004)

Nakonec i jedny z nejsilnějších nástrojů na podporu a prosazování strategie odpadového hospodářství jsou nástroje ekonomické. Jedná se o negativní motivaci formou poplatků, mezi které patří poplatky za skládkování odpadů, za znečišťování přírodního prostředí nebo za využívání neobnovitelných zdrojů, tak i o pozitivní motivaci ve formě nejrůznějších dotačních titulů na podporu environmentálně orientovaného chování hrazených z národních nebo evropských zdrojů. V současné době se využíváním odpadů pro získání dalších zdrojů materiálů zabývá množství institucí nebo organizací státních i soukromých subjektů. Důkazem je i to, že Ministerstvo průmyslu a obchodu zpracovává a vyhodnocuje akční plán implementace Politiky druhotných surovin České republiky, kde jedním z hlavních úkolů stanovuje možnosti definování pojmů „druhotná surovina“ a další práci s tímto pojmem v rámci dokumentů EU. (MPO, ©2014).

3.1 Legislativa řešící nakládání s odpadem

3.1.1 Zákon o odpadech

K moderní vyspělé společnosti neoddělitelně patří přijatá řešení, jak naložit se vzniklým odpadem. Způsoby zpracování vzniklého odpadu jsou zakotveny v systému odpadového hospodářství. Tento systém vychází z platné legislativy, která řeší způsoby předcházení vzniku odpadů, jejich využití a ukládání a i co vlastně odpadem je a co není. Odpadové hospodářství v České republice řeší Zákon o odpadech 541/2020 sb., kterým byl předchozí Zákon o odpadech z roku 2001 k 1. lednu 2021 zrušen.

Na to, jak se využívání a zpracovávání zdrojů společností vyvíjí, bylo potřeba reagovat i změnou v zákoně. Nový Zákon o odpadech už upřesňuje povinnosti původců odpadu a upřesňuje nakládání s odpady, kdy nově od roku 2030 zakazuje ukládání dál využitelných odpadů. V našem případě se jedná o materiály, které lze využít ke spalování nebo pyrolytickému zpracování – polymerní materiály. V příloze č. 2 k zákonu rozlišujeme dva způsoby využití odpadů, a to energetické využití a materiálové využití - recyklace. Na skládkování je zákonem pohlíženo jako až na poslední možnost nakládání s odpadem, který již není dále žádným způsobem využitelný.

Zároveň v roce 2020 nabylo účinnost několik dalších legislativních norem z odpadového hospodářství a řada dalších vyhlášek týkajících se zejména nakládání s vymezenými druhy odpadů.

3.1.2 Katalog odpadů

V České republice byly vybudovány během posledních desetiletí skládky odpovídající moderním standardům - *sanitary landfills*, (Conserve energy future, ©2020). Jejich kapacity jsou už dnes schopny v dostatečné míře pokrýt potřeby odpadového hospodářství. Pokud je ale cílem systému nakládání s odpady omezit množství skládkovaného odpadu jen na odpad dále skutečně nevyužitelný, je třeba jednoznačně stanovit jednotlivé skupiny odpadů, stanovit jejich vlastnosti a stanovit jejich názvy a čísla. (KURASĚ, 2014)

Katalog odpadů vyhláška 8/2021 sb. katalogizuje a zařazuje jednotlivé skupiny odpadů. Stanovuje kritéria pro zhodnocení nebezpečných vlastností odpadů, způsoby jak jednotlivé druhy odpadů ohodnotit a stanovuje postupy pro zařazování jednotlivých skupin odpadů do kategorií. V příloze č. 1 jsou vyjmenovány jednotlivé skupiny odpadů a jsou označeny kódem odpadu.

Zhodnocení odpadu pro jeho zařazení se provádí podle § 8 vzorkování a zkoušky odpadu. Pokud není stanoveno jinak, vzorkování odpadu pro účely zjištění přijatelnosti odpadu do zařízení pro zpracování odpadu, hodnocení nebezpečných vlastností odpadu a další zkoušky pro dokladování kvality odpadu pro další nakládání s ním nebo pro zjištění jeho vlastností a dokumentace tohoto vzorkování se provádí v souladu s technickou normou ČSN EN 14899 (Katalog odpadů, ©2021).

3.1.3 Norma ČSN EN 14899 o vzorkování odpadu

Norma ČSN EN 14899 stanovuje způsob, jak získat a vyhodnotit vzorky odpadu k určení konkrétních vlastností odpadního materiálu a volbě nejlepšího způsobu jeho využití. Norma stanoví postupné kroky pro přípravu a realizaci plánu vzorkování. Plán vzorkování popisuje metodu odběru laboratorního vzorku, který je nutný pro splnění cílů programu vzorkování.

3.1.4 Zákon o výrobcích s ukončenou životností 542/2020

Zákon č. 542/2020 Sb. vychází z předpisů EU a upravuje pravidla pro předcházení vzniku odpadu z vybraných výrobků, práva a povinnosti výrobců a osob při nakládání s výrobky s ukončenou životností a působnost správních orgánů v oblasti předcházení vzniku odpadu z a v oblasti nakládání s výrobky s ukončenou životností.

Pro problematiku zpracování odpadních kabelů je důležitý zejména pojem odpadní elektrozařízení a elektroodpad. Zákonem je stanovena definice elektrozařízení jako elektrické nebo elektronické zařízení, u kterého správná funkce závisí na elektrickém proudu nebo na elektromagnetickém poli, nebo zařízení k přenosu a výrobě elektrického proudu, k měření elektrického proudu nebo elektromagnetického pole, které se používá při napětí nepřesahujícím 1000 V pro střídavý proud a 1500 V pro stejnosměrný proud. (zákon č. 542/2020 Sb., 2020)

Zákon ukládá povinnost výrobcům elektrozařízení zajistit zpětný odběr a následné zpracování výrobků s ukončenou životností. Odpadní kabely, které byly součástí takového výrobku, tak mají šanci dostat se do zařízení ke zpracování a změnu odpadu na zdroj materiálu k dalšímu využití.

3.1.5 Nařízení Evropské komise 715/2013 o měděném šrotu

Nařízením evropské komise uveřejněným dne 25. 7. 2013, které je stále v platnosti, jsou stanovena kritéria, kdy a za jakých podmínek měděný šrot přestává být odpadem. Evropská komise došla k závěru, že pro usnadnění a zvýšení množství zpracované odpadní mědi jako strategické průmyslové komodity bude výhodné, když budou v legislativě zakotveny podmínky, kdy se z odpadu stává druhotná surovina. Tato kritéria by měla zajistit, aby měděný šrot získaný procesem využití odpadů splňoval technické požadavky pro hutnictví neželezných kovů, byl v souladu s platnými právními předpisy a normami pro výrobky a neměl celkově nepříznivé dopady na životní prostředí nebo lidské zdraví. (nařízení EK 715/2013, ©2013)

Nařízení definuje pojmy a procesy které souvisí se shromažďováním, nakládáním a zpracováním měděného šrotu jako sekundárního zdroje. Stavuje kritéria odpadu využitého pro získání měděného šrotu a základní techniky a postupy na zpracování takového odpadu. To vše s ohledem jak na celkovou rentabilitu získávání odpadní mědi k pozdějšímu využití, tak i s ohledem na ochranu životního prostředí a zdraví, aby nakonec celým procesem nevznikala další environmentální zátěž.

Směrnice odkazuje i na další nařízení Evropské komise a Evropského parlamentu zabývajícími se odpadovým hospodářstvím a komplexně stanovuje základní podmínky jak pro nakládání s odpadem pro získání sekundární komodity – mědi, tak i pro kvalitu takto získaného materiálu.

3.2 Popis jednotlivých skupin odpadů

Tato bakalářská závěrečná práce se zabývá využitím odpadních kabelů jako zdrojů surovin pro další využití. Z hlediska obsahu využitelného k dalšímu zpracování můžeme rozdělit odpadní kabely na dvě základní skupiny a další podskupiny. V následujícím přehledu je stručný popis kabelů tak, aby z něj vyplynuly rozdíly mezi jejich jednotlivými druhy.

skupina kabelů	popis
metalické kabely	
sdělovací	určeny pro vedení elektrické energie o malém výkonu ve sdělovací a informační technice
	vždy se jedná o bezpečné malé napětí
	stáčený do svazků s vyšším počtem metalických žil o malém průřezu
ovládací	jednotlivé vodiče, páry, čtyřky a svazky odděleny pomocí izolace z vhodných polymerních materiálů
	často obsahují stínící kovové fólie, přídavné izolační vrstvy, výplňové materiály
	charakteristický obsah velkého množství polymerních materiálů a menšího množství kovů
silové	určeny pro vedení elektrické energie pro ovládání a signalizaci
	nemusí být stáčené, mohou mít více žil jak ze slaněných, tak i z plných vodičů
	vodiče mají izolaci z vhodných polymerních materiálů bez nutnosti obsahovat dodatečné výplňové látky pro zvýšení izolačního odporu
optické	obsah většího množství kovu, ale stále převažuje obsah polymerních izolačních látek
	určeny k přenosu elektrické energie pro využití k napájení elektrických strojů a přístrojů
	mohou mít více žil jak ze slaněných, tak z plných vodičů
optické	vodiče nemusí mít shodný průřez
	vodiče s větším průřezem než vodiče kabelů sdělovacích a ovládacích
	určeny k přenosu signálu pro sdělovací a ovládací technologie
optické	obsahují jednotlivá optická vlákna ze skla o velmi malém průměru (μm)
	jednotlivá vlákna mají více vrstev polymerních obalových materiálů k ochraně skleněného vlákna
	obsahují velké množství přídavné výplně ke zpevnění, z odolnění při ohybu a tahu
hybridní kabely	mohou obsahovat malé množství kovových vodičů pro signalizaci nebo měření kabelu
	hybridní
	kombinují vlastnosti více druhů kabelů
hybridní	například optický kabel s metalickými páry vodičů pro sdělovací vedení a signalizaci, nebo silový kabel s mikrotubičkou pro zafouknutí optického vlákna

Tabulka 2: rozdělení druhů kabelů. (autor, 2022)

3.2.1 Odpadní měď

Jedním ze základních materiálů využívaných v elektrotechnice je měď. Jedná se o měkký, tažný a houževnatý kov červené barvy. Má velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. V kabelech používaných v elektro nebo sdělovací technice je zastoupen v jádrech kabelů jako vodič elektrické energie ve formě elektrovodné mědi. (HAMPL et al., 1996)

Hutnický rafinovaná měď dosahuje čistoty 99,6 %, elektrolyticky rafinovaná měď dosahuje čistoty až 99,99 %. Čistá elektrovodná měď se dodává s obsahem Cu od 99,85 % do 99,97 % (čemuž odpovídá měrná vodivost 96,5 % až 100 % měrné vodivosti IACS (International Annealed Cuprum Standard)). S rostoucím množstvím nečistot klesá její měrná vodivost, která je tak ukazatelem míry čistoty obdržené mědi. Měď má po stříbru nejvyšší vodivost. (DAVIS, 2001)

Recyklace mědi probíhá přetavením v hutích a následným zpracováním na hutnickou měď, která už sama o sobě musí dosahovat čistoty 97 – 99 %. (SAMUELSSON, BJÖRKMAN, 2014). Jak je uvedeno v nařízení komise EU 715/2013, kterým stanovuje kritéria, kdy měděný šrot přestává být odpadem, nesmí měď pro druhotné zpracování obsahovat více než 2% jiných kovů a dalších znečišťujících cizích látek.

Z kabelů získáváme měď mechanickou cestou, pomocí drticích a třídících zařízení určených k tomuto účelu. Je velmi důležité zajistit co nejvyšší čistotu odpadní mědi určené k druhotnému zpracování, která musí vyhovovat nejen nařízení evropské komise, ale zejména požadavkům hutních zpracovatelských závodů. To klade vysoké nároky hlavně na separaci drtě získané z odpadních kabelů.

3.2.2 Odpadní izolační materiály kabelů

Základním materiálem, který je použit na výrobu izolací a výplní elektrotechnických kabelů, jsou plasty. V minulosti, kdy zpracování ropných látek nebylo na tak vysoké technologické úrovni jako dnes, se využívaly pro výrobu plášťů kabelů kovy, zejména olovo a jako izolační materiály papír. Tyto materiály měly některé vlastnosti pro izolaci a opláštění kabelů vhodné, ale postupným vývojem technologií zpracování polymerních látek byly nahrazeny použitím různých druhů plastů.

Plasty jsou polymerní látky organického původu, vyznačující se dlouhými řetězci opakujících se struktur makromolekul, které jim dávají specifické vlastnosti pro využití při výrobě kabelů, jako elasticitu, odolnost v tahu a ohybu, chemickou a biologickou inertnost a nejdůležitější vlastnost - vysoký izolační odpor. (MANAS, SALIL, 2006) K výrobě izolací kabelů jsou použity výhradně syntetické polymerní látky - plasty. Mezi základní druhy izolačních materiálů plášťů kabelů řadíme PVC a jeho směsi (například bezhalogenové PVC pro použití u kabelů se zvýšenou požární odolností), PE v různých variantách, PUR polyuretany.

Recyklační technologické postupy zpracování odpadních plastů, kterými nejsou termoplasty použitelné k další výrobě, spočívají v energetickém nebo materiálovém využití. Po mechanickém zpracování odpadních kabelů a oddělení kovové složky z odpadní drtě, zůstane směs složená z izolačních plastů a výplňových materiálů kabelů. (KURAŠ, 2014)

3.2.3 Odpadní hliník

Postupným vývojem elektrotechniky, stavebnictví a přechodem na otevřený hospodářský systém po roce 1989 postupně došlo k ukončení používání hliníkových kabelů v běžných domovních rozvodech nízkého napětí pro jejich některé nevhodné vlastnosti a k jejich nahrazení vodiči z mědi. Například pro jejich tvarovou nestálost nebo nízkou pevnost, ale hlavně pro jejich nežádoucí schopnost vytvořit galvanický článek při kontaktu s měděnou částí

elektrických rozvodů a následném rozpadu hliníku oxidací, čímž vzniká riziko, že protékající zkratový proud způsobí požár. (odborný časopis ELEKTRO, 2009)

V současnosti, dle normy ČSN 332000-5-52, je aplikace hliníkových kabelů s průřezem menším než 16mm² pro použití v elektrotechnice zakázána a nové realizace se provádí z kabelů měděných. Tato skutečnost nám dává možnost získat ke zpracování odpadní hliníkové kabely z realizací oprav a náhrad nevyhovujících bytových a distribučních rozvodů elektrické energie.

Hliník má chemickou značku Al - Aluminium. Jedná se o lehký kov bílé barvy s dobrou vodivostí a nízkou teplotou tavení. Primární výroba je hlavně z bauxitu. Chemicky čistou cestou se vyrobí oxid hlinitý, z něhož se elektrolýzou vyrobí Al o čistotě 99,5 %, který odpovídá čistotě požadované pro elektrovodný hliník. (PIETSCHMANN, 2019) Sekundární výroba pro svoji výrazně nižší energetickou náročnost nabývá v posledních letech stále většího významu. Recyklace odpadního hliníku je stále důležitější pro snížení negativních dopadů výroby na životní prostředí.

Primární produkce hliníku je v současnosti zodpovědná za 1% celosvětové produkce skleníkových plynů. Při výrobě jedné tuny hliníku z materiálově využitelného odpadu dosahuje úspora energie, proti výrobě z primární suroviny, až 95% a vyprodukuje pouze 5% emisí skleníkových plynů. (SEDLAČÍK, 2018)

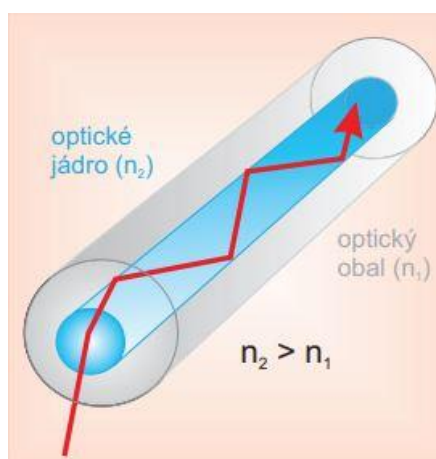
Zpracováním odpadních kabelů s hliníkovými vodiči uvnitř získáváme směsnou drť plastů a hliníku. Po vytrídění získáme hliníkovou drť znečištěnou cizími prvky a zbytky organických látek z obalů kabelů. K přípravě pro zpracování je možné proces separace, který má za úkol vyčistit a připravit materiál pro využití do výrobních procesů, opakovat.

3.2.4 Optické kabely a jejich struktura

Se zvyšujícími se požadavky na přenosovou kapacitu dat a rychlost odezvy nutnou pro rozvoj a využití telekomunikačních a datových aplikací je nezbytné používat v technické infrastruktuře pro sdělovací vedení optické kabely. Optická síť může odstranit omezení datových přenosů na dlouhých vzdálenostech a umožnit provoz datových aplikací. (CHARBONNEAU-LEFORT, YADLOWSKY, 2015)

Hlavní a nejdůležitější součástí optických kabelů jsou vidová vlákna. Tato vlákna mají průřez srovnatelný s lidským vlasem, jsou vyrobena z vrstveného skla o vysoké čistotě pro omezení nežádoucího útlumu optického paprsku. Optické kabely neobsahují kov pro svoji funkci, ale vedou využitelný signál ve formě světelného laserového záření, které je převáděno na modulované elektrické napětí. Princip vedení světla v optických vláknech je velmi jednoduchý. Jde o využití jevu úplného odrazu. Paprsek se tedy šíří na základě odrazů mezi optickým jádrem vidového vlákna a jeho skleněným obalem. (KASÍK, PETERKA, 2011) Vlákno je vyrobeno tak, aby sneslo ohyb o určitém poloměru a i tah při technologickém postupu instalace. I tak ale musí kabel jako celek obsahovat výrazně větší množství výplně a plastů, které v tomto případě nemají za účel zvýšení izolačního odporu, ale mají zajistit ochranu a dostatečnou mechanickou odolnost pro skleněná vlákna. Pro účely zpracování odpadních optických kabelů lze konstatovat, že obsahují hlavně plasty.

Například při opravách optických tras se z technologických důvodů mění nebo vkládají celé nové úseky o značných délkách, řádově desítky až stovky metrů. Takto vzniká množství odpadních optických kabelů, které dále nelze v komunikační a sdělovací technice aplikovat, ale lze je použít pro další zpracování nebo energetické využití.



Obrázek 1: optický kabel a princip jeho funkce. (KASÍK, PETERKA, 2011)

3.3 Problematika zpracování odpadních kabelů

Protože na odpad se mění i většina nedostatkových surovin, je nezbytně nutné omezit neúčelnou spotřebu surovin a nedostatkových materiálů. Veškerá výrobní i nevýrobní činnost je doprovázena vznikem odpadů. Jejich využití je prvořadým úkolem z hlediska ekonomiky ale i ochrany životního prostředí. (VOŠTOVÁ, 2003)

Odpadní kabely obsahují velké množství různorodých látek, které mohou představovat dobře využitelný zdroj sekundárních surovin. Abychom ale tyto suroviny získali, je potřeba odpadní materiál vhodným způsobem zpracovat tak, aby bylo možné od sebe oddělit materiál, který je ještě využitelný a odpad který tvoří již dále nevyužitelný zbytek. Tento zbytek se stane již skutečným odpadním materiálem, který je potřeba deponovat tak, aby dále nemohl způsobovat ekologickou zátěž. Je zájmem společnosti, aby takových nevyužitelných zbytků, bylo po zpracování vstupního materiálu co nejméně. (KURAS, 2014)

Tato práce se zabývá návrhem recyklační linky na principu fyzikálních metod získávání druhotných surovin z odpadních kabelů. Pro zpracování lze využít ale také metody termochemické, mezi které patří pyrolytické zpracování, dále pyro-metalurgické a hydro-metalurgické metody. (DEBNATH et al., 2018) Tyto metody mohou být efektivní, jedná se ale o způsoby zpracování, které jsou nákladné na přípravu zařízení. Jsou efektivně využitelné jen za určitých podmínek, jako je druhově homogenní vstupní materiál a velký objem zpracovaného odpadního materiálu. Příkladem je odpad přímo z výroby zpracovaný ve výrobním závodě.

Fyzikální metody zpracování odpadních materiálů, které jsou určeny k recyklaci, se nejčastěji používají k získávání drahých kovů z elektroodpadu – *e-waste*. Jedná se o účinný a nenáročný způsob získávání druhotných surovin pro následnou výrobu kovů. Fyzikální recyklace zahrnuje rozdužení, sekání, drcení, separaci. Tyto kroky jsou realizovány pomocí strojů, jako jsou drtiče, svlíkačky, granulátory a separátory na principu různých technologií. (DEBNATH et al., 2018)

Vstupní materiál, který má podobu směsi kusových kabelů stejných nebo různých druhů je potřeba zpracovat takových způsobem, aby byl strojově roztříditelný. Je potřeba dosáhnout

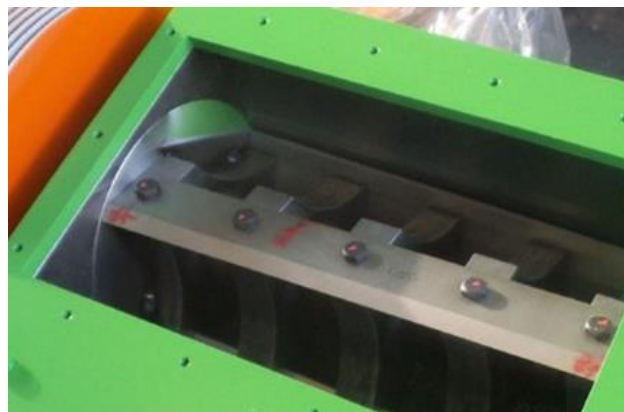
potřebné velikosti zrn, struktury, konzistence ale i teploty nebo vlhkosti směsi, která bude použitelná pro technologické zpracování v recyklačních linkách.

3.3.1 Mechanické zpracování - dělení

Základním způsobem zpracování směsi odpadních kabelů je mechanické dělení, které má za cíl zmenšit části odpadních kabelů do takové míry, že bude možné jejich další zpracování v recyklační lince. Tento proces zpracování vstupního materiálu lze nazývat také zdrobňováním. Vstupní materiál je rozrušován působením pracovních částí strojů na odpad tlakem, smykem, úderem. Zjednodušeně je odpad rozstříhán, rozřezán a drcen.

3.3.1.1 Mechanické dělení stříháním nebo sekáním

Na mechanické dělení se používají jednoúčelové stroje, které jsou zařazeny vždy na začátek zpracovávacího procesu nebo jsou na začátku recyklační linky. Stroje pro využití v průmyslových linkách určených pro zpracovávání většího objemu dodaného materiálu musí mít dostatečně robustní konstrukci, která vydrží trvalou zátěž v provozu. K pohonu se využívá nejčastěji 3 fázových asynchronních elektromotorů. Základní pracovní části těchto strojů jsou pracovní nože nebo sekací čelisti. Pro specifické zpracovávání plastových odpadů mohou být používány nůžky nebo pily. Pracovní části jsou vyrobeny z vysokouhlíkaté nástrojářské oceli, mají vysokou tvrdost a houževnatost. Obsahují 0,8 až 1,5% uhlíku, legování manganem, chromem nebo vanadem zvyšuje podstatně tvrdost použití oceli. Vynikající vlastnosti mají slitiny obsahující 3 až 6% wolframu. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)



Obrázek 2: sekací komora drtiče firmy Guidetti. (JPR service, 2022)

3.3.1.2 Dělení drcením

Většinou se jedná o elektricky poháněné stroje s dostatečně velkým výkonem pro zpracování většího množství vstupního materiálu a zajištění odolnosti celého zařízení. Odpadní kabely se jednotlivě nebo ve svazcích ručně nebo strojově podávají do násypky drtiče. Rotační nože umístěné na hřídeli materiál nasekají a přes síto dopadá směs do sběrné nádoby nebo na pás.



Obrázek 3: drtič kabelů Wagner-Simenia.(Simenia.com, 2022)

Faktorem pro výběr a zařazení určitého typu drtičky do recyklační linky je možnost zařazení do linky a parametry vstupního materiálu a výstupní směsi z drtičky. Možností zařazení do linky se rozumí to, jak je možné zapojit konkrétní stroj do zpracovatelské linky – jestli má uzpůsobený podavač nebo násypku na materiál na ruční nebo automatické pásové podávání, jestli je možné celý stroj napojit na sdružené ovládání linky, jaký stupeň automatizace drtícího procesu stroj umožňuje. Stejně tak, je-li možné připojit k výstupní části automatický dopravník nebo technologické řešení automatizace celého procesu dopravy zpracovaného materiálu. Parametry vstupního materiálu a výstupní směsi se rozumí velikost a tvar částí, jaké lze do drtičky podávat jako vstupní materiál, a stejně tak jakou velikost, hrubost nebo stupeň zdrobnění bude mít výstupní směs. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

3.3.1.3 Svlíkačky – oddělování odholováním izolace

Velmi specifickým strojem, který se využívá výhradně pro zpracování odpadních kabelů, jsou svlíkačky. Nejedná se o ruční svlíkačku kabelů, která je také v odborném slangu nazývána *odholovačka*, ale o strojní technologické zařízení, které má za úkol oddělit izolaci a vodiče v kabelu. Výrobci a prodejci řešení pro recyklaci tyto stroje označují také *páračky* nebo *loupačky kabelů*.

Tyto stroje jsou určeny pro zpracovávání kusových kabelů, které se ručně podávají k pracovním částem, a výstupní produkt ze svlíkačky je odizolované kovové jádro vodiče a rozříznutá izolace. Samotné svlečení kabelu je prováděno pomocí rotačních nožů nebo drtících válečků. (BRONNENBERG, 2012)

Zpracování odpadních kabelů v těchto strojích je velmi efektivní. Výstupním produktem je téměř 100% čistý vodič – kovové jádro a plasty. Vstupní materiál je ale náročný na přípravu, protože se jedná o kusové podávání jednotlivých kabelů. Vstupní odpad i výstupní produkty se musí dopravovat ručně, stroj proto nelze zařazovat do recyklačních linek a ani k tomu není určen.

Strojní svlíkačky nebo páračky či loupačky nejsou vhodné pro zpracovávání velkého množství odpadních kabelů. Jako řešení pro zpracování „v malém“ lokálně přímo v dílně nebo ve firmě, která se zabývá prací s elektrotechnickými kabely, ho lze ale využít s větší efektivitou než drtiče a separátory.



Obrázek 4: elektrická svlíkačka Bronnenberg. (Bronnenberg, 2012)

3.3.2 Separace – rozdružování

Výstupní meziprodukt po mechanickém zpracování dělením - odpadní směs, která je ale stále ještě nevhodná pro konečné využití jako sekundární surovina, musí mít takové parametry, aby mohla postoupit do strojů určených k oddělení jednotlivých částí směsi. Jedná se o proces separace, při kterém dojde k rozdělení směsi nadrcených kabelů, která obsahuje jak kov, tak plasty-polymery všeho druhu, na dvě základní složky – kov a plasty. Proces, při kterém dojde k odloučení jednotlivých složek vstupního materiálu (výstupního produktu z drtičů a sekacích linek), probíhá na základě rozdílných vlastností základních částí rozdružovaných směsí.

Postup rozdružování	Dílčí dělení
Gravitační (na základě různé skutečné hustoty)	Separace v těžkých kapalinách Separace ve vodě (sazečky, splavy, žlaby, šroubovicové rozdružování, ve vzestupném vodním proudu) Pneumatické rozdružování Zvláštní způsoby separace
Magnetické (na základě rozdílné magnetické susceptibility)	Slabě magnetické rozdružování za sucha i za mokra Silně magnetické rozdružování pro drobná zrna (0,15 až 15 mm) a jemnozrné rmuty
Elektrické (na základě rozdílné elektrické vodivosti složek)	Rozdružování s různým uspořádáním elektrického pole Rozdružování s různým uspořádáním elektrod Rozdružování s různým pohybem materiálu
Flotace (na základě rozdílných vlastností zrn)	Pěnová flotace: - přímá (užitkový materiál je v pění) - nepřímá (v pění je hlušina) Agglomerční flotace (při tvorbě pěny spolupůsobí olej) Flotace na nošiči (jemné částice adsorbují na povrchu hrubších) Elektroflotace (probíhá na základě elektrolytického procesu)

Tabulka 3: přehled metod rozdružování. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

3.3.2.1 Gravitační separace

Tato metoda separace využívá rozdílné hmotnosti jednotlivých částí, které směs obsahuje, a působení kapalin nebo plynů v separačním zařízení na tyto části. Separace v různých separačních kapalinách využívá rozdílu hustoty prostředí, kdy kovové části směsi s vyšší hustotou padají v separátoru ke dnu, kde jsou oddělovány. Plastové části směsi jsou na povrchu kapaliny, protože mají nižší hustotu – plavou a tvoří druhou oddělovanou složku. Rozdružování s využitím vody, respektive vodního proudu, který má různé rychlosti, bylo

v minulosti často využíváno například při rozdružování rud při získávání barevných kovů nebo nerostných surovin. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

Pneumatické rozdružování pomocí proudu vzduchu na pneumatických fluidních separátorech, někde nazývaných fluidních splavech, je velmi efektivní metoda s ohledem na jednoduchost separačního zařízení a nízké náklady na provoz. Nevyužívá vodu ani jinou kapalinu, ale proud vzduchu. Základní nevýhodou separace za pomoci kapaliny nebo vody je absorpce vody do výstupního produktu ze separačního zařízení a nutnost jeho vysoušení. Tento proces je zdouhavý a energeticky náročný, tudíž značně nevýhodný. Separace pomocí proudu vzduchu tyto nevýhody nemá. Suchý sypký materiál je profukován proudem vzduchu o určité síle a rychlosti. Oddělení probíhá na základě rozdílných vah jednotlivých zrn rozdružované směsi při působení proudu vzduchu, kdy lehčí části jsou nadlehčovány a těžké padají do záchytné nádoby. Je to nejvhodnější metoda pro zpracování drtě z odpadních kabelů. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

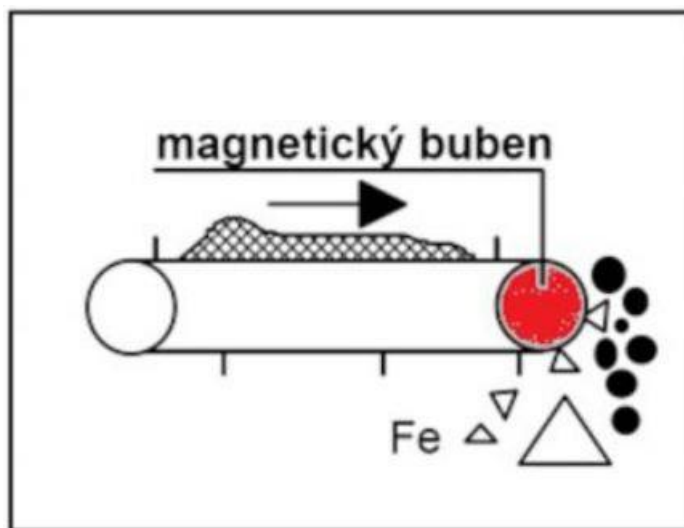


Obrázek 5: fluidní splav. (Jelínek-Stroje, 2022)

3.3.2.2 Magnetická separace

Magnetická separace využívá rozdílných vlastností zrn směsi nadrceného odpadu při působení magnetického pole. Měď je považována za kov diamagnetický, zatímco hliník je sice

kov paramagnetický, ale působení magnetického pole na něj je velmi slabé. Moderní separátory dokáží zachytit feromagnetické materiály o velikosti od 1 μm . Jsou konstruovány tak, aby mohly být zařazeny do zpracovatelských linek, připojeny k podávacím pásům vstupní suroviny a separované části vstupní frakce potom mohly být odebírány. (SEDLÁK, ŠTOLL, 2017)



Obrázek 6: princip magnetického separátoru. (Deostech.cz, 2022)

Zvláštním druhem je magnetického separátoru je ECS (*eddy current separator*) separátor neželezných kovů, který funguje na principu vířivých proudů. Separace vířivými proudy se v recyklačním průmyslu využívá stále častěji. Je tak možné získávat neželezné kovy, které mají vysokou hodnotu, a lze dosahovat vysoké úspory nákladů proti získávání neželezných kovů z rud. (ZHANG et al., 1999) Magnetické póly rotují v dosahu pásového podavače a vytváří na velmi krátkou dobu magnetické pole, které zmagnetizuje každou částici frakce která je vodivá. Ve vodivých nekovových částech se indukují vířivé proudy v důsledku změny magnetického pole a získávají vlastní polaritu. Zmagnetizovaná částice má stejný elektrický náboj, jako náboj rotujícího magnetického pole a je z podávacího pásu odpuzována. (SCHLETT, LUNGU, 2002)

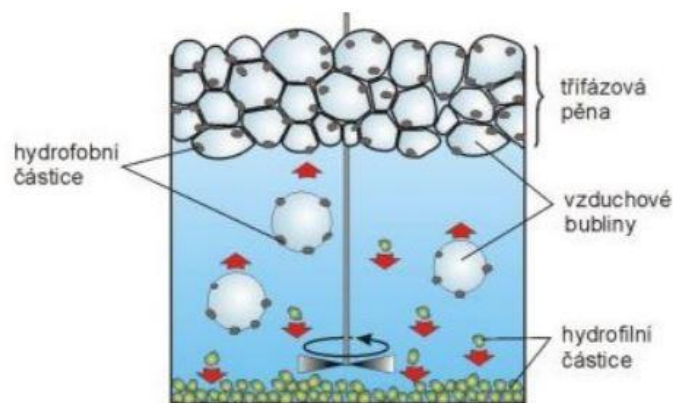
3.3.2.3 Separace v elektrickém poli

Tato metoda separace je založena na principu působení elektrostatického pole na vodivé nebo nevodivé materiály. Velikost působení elektrostatického pole na jednotlivé vodivé části směsi je různá a této vlastnosti se využívá při oddělování jednotlivých složek odpadní směsi.

Tato metoda není příliš často využívána, lze jí užít jen v některých případech. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

3.3.2.4 Separace flotací

Metoda odlučování jednotlivých složek materiálu flotací je v průmyslových linkách velmi často používána. Jedná se o metodu, kdy se uplatňují rozdílné vlastnosti při kontaktu s vodou, zejména smáčitelnost povrchu. Některé druhy materiálu jsou smáčitelné více, pro některé je nutné upravit roztok, ve kterém je směs smáčena. Jedná se o vlastnost jako hydrofobnost, kdy materiál vodu odpuzuje, nebo hydrofilnost kdy ji naopak na svůj povrch přitahuje. Hydrofilní materiály s dobrou smáčitelností, jsou unášeny proudem, který prochází separátorem. Hydrofobní materiály, ty které na sebe vodu nenavážou, padají na dno. Vstupní směs je tak rozdělována na dvě složky. Pro efektivní využití je potřeba zajistit určitou maximální velikost částic, která je závislá na hmotnosti materiálu, aby mohl být oddělován. Výstupní složky – výstupní produkt a vedlejší výstupní produkt – je nutné podle způsobu dalšího zpracování vysušit. (VOŠTOVÁ, FRIES, 2003)

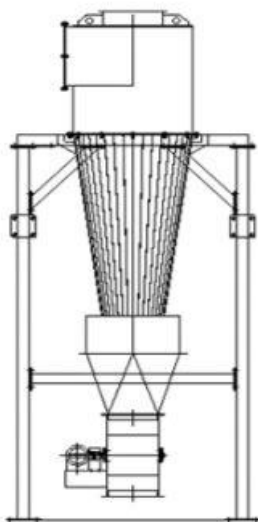


Obrázek 7: separace flotací. (Ožana, 2015)

3.3.2.5 Odlučovače prachu

Jedná se o technologická zařízení, která směsi zpracovaného materiálu pomocí odlučovačů prachu odstraňují jemné prachové částice. Pracují nejčastěji na principu pneumatického odlučování (např. cyklony) a jsou často doplněny záchytným filtračním zařízením, které zachycuje emise prachu uvolněného při oddělování. V praxi se vyskytují i další způsoby odlučování prachu jako elektrostatické nebo kapalinové, nejsou ale příliš vhodné a odprášení sypkých materiálů.

Separovaný roztríděný materiál je nutné připravit pro další zpracování v požadované čistotě a kvalitě. Mechanickým zpracováváním sypké směsi dochází k vytváření velmi malých prachových částí. Sypký materiál je tak velmi znečištěn což snižuje jeho kvalitu, využitelnost a i hodnotu. Z tohoto důvodu se na konce linek na zpracování odpadu zařazují odlučovače prachu nazývané někdy odprašovače. Pneumatické cyklonové odsavače prachu s filtrem nasávají sypkou suchou směs, ta prochází skrz cyklonový odstředivý filtr. Těžší části jsou vynášeny na okraj filtru, kde po kontaktu se stěnou filtru ztrácí kinetickou energii, kterou jim udělil proud profukujícího vzduchu, a padají dolů do záchytné nádoby. Vzduch s prachem je čištěn pomocí prachového filtru a odváděn do okolního prostředí. (G&G filtration, 2022)



Obrázek 8: odlučovač prachu. (G&G filtration, 2022)

4 Výchozí podmínky řešení

Recyklační linka, která je umístěná v dílenské hale katedry technologických zařízení a staveb ČZU, je určena pro studijní realizace recyklačních postupů. Bude sloužit jako výchozí sestava recyklační linky, která bude porovnávána a hodnocena s nevhodnějšími technologickými řešeními. Obsahuje všechny základní prvky recyklační linky a je využívána ke studijním a experimentálním účelům. Vychází ze sestav recyklačních linek v komerčních provozech, ve kterých probíhá praktické zpracování vhodných odpadů, jako je zejména elektroodpad.

Linka je sestavena z předdrtiče směsi odpadu, drtiče, pneumatického dopravníku, cyklónového odlučovače prachu, magnetického separátoru, pásového dopravníku, zásobníku s vibračním podavačem, fluidního splavu. Takto sestavená linka je vhodná nejen k recyklaci odpadních kabelů, ale i elektroodpadu nebo plastů a kombinací magnetického separátoru a fluidního splavu je zajištěna vysoká čistota separované směsi. U předdrtiče a drtiče lze vyměnit pracovní elementy, a tím přizpůsobit linku zpracovávanému odpadu.

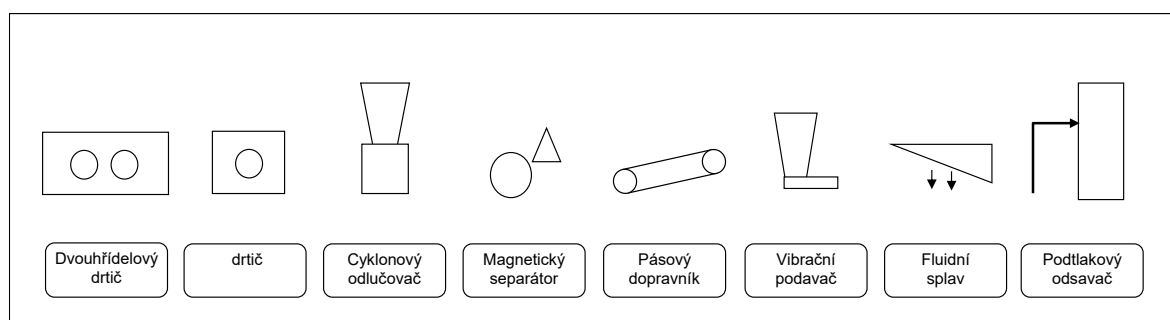
4.1 Popis recyklační linky určené ke studijním účelům

Linka, která je k dispozici, nevytváří ucelený recyklační celek, který by byl propojen automatickými podavači a mechanismy takovým způsobem, aby nevyžadoval ruční manipulaci s odpadní směsí, její přenos a přípravu pro další krok zpracování. Všechny stroje nejsou propojeny dopravními pásy a směs se musí ručně přenášet a podávat do navazujícího zařízení.

Na prvním místě je zařazen dvouhřídelový předdrtič, který je ale do linky přidán jako nejnovější stroj a na linku nenavazuje žádným dopravníkem. Zde je materiál připraven na kusovou velikost vhodnou pro podávání do drtiče. Z předdrtiče je materiál dopravován ručně, v nádobách, do nožového mlýna, drtiče Terier G-GH 200/300.

V drtiči je vstupní materiál mechanicky upraven na takovou velikost, aby mohla nadrcená směs být dopravována pneumatickým dopravníkem a separována v separátorech. Nadrcená směs je pneumatickým dopravníkem přemísťována do cyklónového odlučovače prachu. Zde se odděluje od směsi prach a lehké nečistoty. Ty jsou zachycovány v prachovém filtru.

Z cyklonového odlučovače materiál propadává do zásobníku. Ze zásobníku, který obsahuje již vyčištěný materiál, připravený k dalšímu zpracování v separátorech, je materiál vibračním podavačem podáván do magnetického separátoru. Zde je oddělena kovová složka od plastů a ostatních nekovových materiálů. Vedlejším výstupním produktem jsou plasty, které putují do záchytné nádoby, a kovová složka směsi je pásovým dopravníkem dopravena do zásobníku. Odtud je materiál ruční manipulací podáván do fluidního splavu, kde jsou odděleny jednotlivé složky podle nastavení míry separace. Jednotlivé části vyseparované ze vstupní směsi jsou zachycovány odděleně do záchytných nádob. Dále je už možné separované složky materiálu považovat za druhotnou surovinu, vhodnou ke zpracování na finální produkt.



Obrázek 9: blokové schéma stávající linky. (autor, 2022)

4.1.1 Stroje zařazené v lince

Dvouhřídelový drtič Pavel Jelínek – Stroje D4



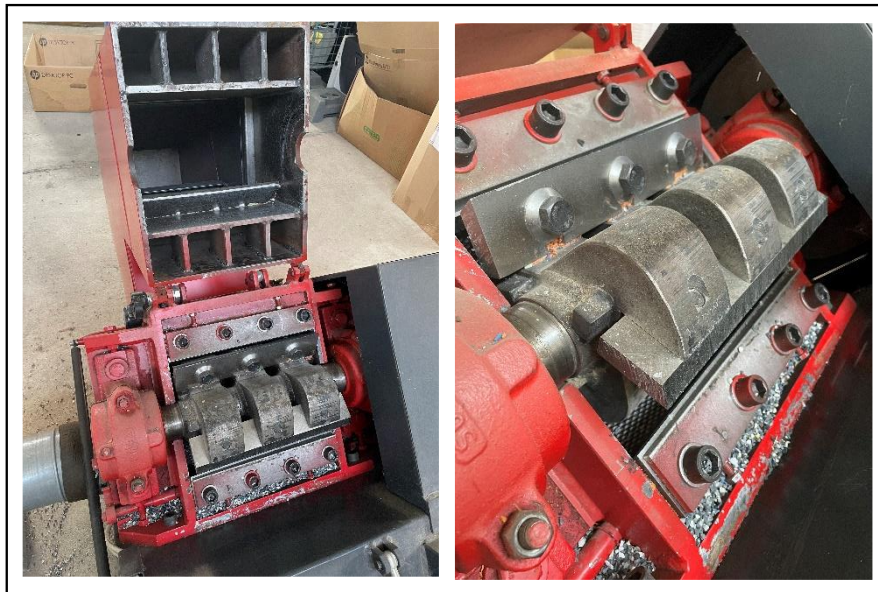
Obrázek 10: dvouhřídelový hrubý drtič. (jelínek-stroje.cz, 2022)

Jedná se o dvouhřídelový hrubý drtič poháněný dvěma asynchronními elektromotory pro provoz v linkách pro zpracování pevných odpadů, zmenšení objemů odpadů se samočinným provozem s hlídáním stavu provozních hodin, přetížení pohonů a počtů reverzací. Výstupní frakce 50-130 mm. (JELÍNEK STROJE, 2022)

Technické parametry:

- Příkon: 2 x 4 kW
- Napětí: 400 V / 50 Hz
- Hodinový výkon stroje: 600 kg/hod
- Velikost mlecího prostoru: 360 x 360 mm
- Hmotnosti stroje: 350 kg

Drtič - nožový mlýn Terier G-GH 200/300 mini 5,5 kW



Obrázek 11: drtič Terier G-GH 200/300 mini 5,5 kW. (Terier.cz, 2022)

Technické parametry:

- Napětí: 400 V / 50 Hz
- Příkon 5,5 kW
- Otáčky rotoru 900 ot/min
- Hodinový výkon stroje: 50 – 80 kg/hod
- Průměr rotoru: 200 mm
- Šířka rotoru: 300 mm
- Počet nožů na rotoru: 3 ks
- Počet nožů na statoru: 2 ks
- Rozměr mlecího prostoru: 200 x 300 mm
- Celková hmotnost: 250 kg

Pneumatický dopravník s cyklonovým odlučovačem



Obrázek 12: pneumatický dopravník s cyklonovým odlučovačem. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Příkon: 4 kW
- Napětí: 400 V
- Objemový průtok vzduchu 4500 m³/hod
- Průměr přípojovacího hrdla 250 mm
- Celková hmotnost 76 kg

Magnetický separátor WAMAG SRTK040034



Obrázek 13: magnetický separátor Wamag SRTK040034. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Napětí: 400/230V
- Příkon 0,37 kW
- Otáčky: 1380/25 / min
- Hodinový výkon stroje: 35 m³/hod
- Průměr bubnu: 150 mm
- Hmotnost: 160,5 kg

Pásový dopravník ODES DPK 400/3,5



Obrázek 14: pásový dopravník ODES DPK 400/3,5. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Napájení: 230 / 400 V
- Příkon: 0,55 kW
- Rychlost posuvu: 0,39 m/s
- Délka a šířka pásu: 7400 x 400 mm
- Rozměry: 3650 x 780 x 1590 mm
- Maximální náklon: 45 °
- Hmotnost: 380 kg

Vibrační podavač se zásobníkem ROX MX 200



Obrázek 15: vibrační podavač ROX MX 200. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Příkon 0,06 kW
- Napětí: 230 V
- Amplituda dráhy vibrační desky: 0,1-1 mm
- Objem násypky: 100 dm³

Fluidní splav FS-1 výrobce Aquatest a.s.



Obrázek 16: fluidní splav FS-1. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Napětí: 400 / 230 V
- Příkon: 0,9 kW
- Pracovní frekvence: 16,6 Hz
- Vstupní kapacita: 150 - 400 kg/hod
- Granulometrie vstupní směsi: 0,2 – 15 mm
- Velikost separační plochy: 0,34 m²
- Amplituda dráhy kmitů 0,5-15 mm
- Rozměry: 1350 x 1370 x 1560 mm
- Hlučnost: 66 dB
- Hmotnost: 370 kg

Průmyslový podtlakový odsavač k fluidnímu splavu VZDUCHOTECHNIK s.r.o. POC – 20 JET



Obrázek 17: podtlaková odsavač POC – 20 JET. (autor, 2022)

Technické parametry:

- Napětí: 400 / 230 V
- Příkon: 2,2 kW
- Objemový průtok vzduchu: 2000 m³/hod
- Maximální podtlak: 1800 kPa
- Rozměry: 750 x 850 x 3050 mm
- Hmotnost: 280 kg


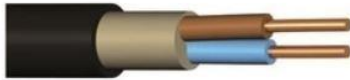



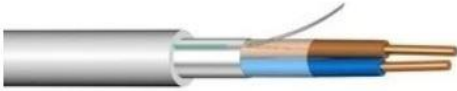

4.2 Odpadní kabely k recyklaci

Jako vstupní materiál určený k recyklaci budou použity odpadní kabely, které byly již dále nevyužitelné pro použití ve sdělovací nebo napájecí technické infrastruktuře. Pro účely této práce a posouzení nebo návrh recyklační linky, budou použity vzorky základních nejpoužívanějších kabelů.

Vzorky kabelů budou rozděleny na jednotlivé součásti – izolaci, výplňové materiály a kovy. Jednotlivé součásti převáženy. Na vybraných vzorcích bude provedena elementární analýza složení, pro stanovení nejvhodnějšího recyklačního postupu a dalšího energetického využití.

4.2.1 Hmotnostní analýza součástí vzorků odpadních kabelů

Na vzorcích kabelů byla provedena hmotnostní analýza jednotlivých částí. Úkolem této analýzy je stanovit počet jednotlivých složek materiálu v kabelech a jejich množství, výsledky vyhodnotit a stanovit využitelnost a výtěžnost zpracovávaného materiálu v recyklační lince. Použité vzorky kabelů jsou popsány a znázorněny v tabulce číslo 4.

Kabely použité ke hmotnostní analýze			
číslo kabelu	Druh kabelu	popis	
1	CYKY 5Cx2,5	pro pevné uložení, počet žil 5, průřez vodiče 2,5 mm ² , materiál jádra měď (Cu), barva vodičů zeleno-žlutá, modrá, hnědá, černá, šedá	
2	CYKY 2x2,5	pro pevné uložení, počet žil 2, průřez vodiče 2,5 mm ² , materiál jádra měď (Cu), barva vodičů modrá, hnědá	
3	FTP 6e	stíněný, pro vnitřní rozvody, šířka pásma 250 MHz, typ stínění CAT6, kategorie FTP, průřez 0,565 mm ² , izolační materiál PVC	
4	FTP	stíněný, pro vnitřní rozvody, šířka pásma 100 MHz, typ stínění CAT5E, kategorie FTP, průřez 0,50 mm ² , izolační materiál PVC	
5	Prakab 4x2x0,8	bezhalogenový, oheň retardující, se zachováním funkčnosti kabelové trasy při požáru, počet žil 4x2, průřez vodiče 0,8 mm ² , materiál jádra měď (Cu)	
6	JYTY 2x1	pro měřicí, řídicí a automatizační systémy, určen pro pevné uložení, stíněný laminovanou Al fólií, pevná kruhová měděná jádra, 2 žily (hnědá, modrá), průměr jádra vodičů 1 mm.	
7	Optický kabel 24x50/125 OM LSOH	Univerzální optický kabel s LSOH pláštěm a třídou reakce na oheň Eca 24 vláken OM3 50/125.	

Tabulka 4: kabely použité k hmotnostní analýze. (DEK.cz, 2022)

Jako základní jednotku pro stanovení velikosti složky jsem zvolil 1000g. Obvykle při praktickém použití kabelů se jako měrná jednotka používá jednotka délky. Při analýze odpadních kabelů by to ale nebylo příliš praktické ani proveditelné. Nelze totiž spolehlivě stanovit, jak určit délku kabelu takovým způsobem a s takovou přesností, aby to bylo využitelné pro rozbor a analytické stanovení množství jednotlivých částí kabelu.

Na rozdíl od měření délky je ale možné a i dobře prakticky proveditelné, určit hmotnost jednotlivých vzorků kabelů. Tuto veličinu stanovit s dostatečnou přesností na to, aby bylo možné provést přepočet u všech vzorků, ať mají jakoukoliv hmotnost, na 1000g, a to považovat za základní jednotku pro účely této analýzy. S takto přepočtenou velikostí jednotlivých složek kabelu je možné dále pracovat. Je možné dále porovnat zastoupení jednotlivých složek v kabelech a vyhodnotit celkové zastoupení jednotlivých složek ve směsi vstupního odpadního materiálu do linky.

Tímto způsobem provedená, přepočtená a vyhodnocená analýza vzorku bude obsahovat určitou chybu měření. Tato nepřesnost bude ale výrazně menší, než kdyby byla jako výchozí veličina zvolena délka a k délce by byla všechna měření vztažena. Hmotnost vstupního materiálu může být během praktického využití recyklační linky automaticky kontrolována na vstupu do zařízení a lze takto kvantifikovat využitelnost a efektivitu zpracování vstupního materiálu. Jak je vidět v tabulce číslo 5 výpočtu chyby měření, kontrolním převážením vzorků a porovnáním s celkovou hmotností byla chyba měření 0,09 %.

odchylka součtu hmotností částí kabelu od jeho celkové hmotnosti	
číslo kabelu	odchylka[%]
1	0,43
2	0,01
3	-0,03
4	0,09
5	0,01
6	0,06
7	0,00
odchylka celková [%]	
	0,09

Tabulka 5: výpočet chyby měření. (autor, 2022)

Pakliže by to bylo účelné, vhodnějším laboratorním postupem stanovení hmotností jednotlivých složek by bylo dosaženo odchylky nižší. Jako důvod chyby měření lze uvést ruční zpracování vzorků kabelů, ruční odholování a opakovanou manipulaci s jednotlivými součástmi kabelu pro zvážení a kontrolu. Měření probíhalo v prostorách Fakulty technologických zařízení a staveb ve společenské místnosti.

4.2.1.1 Metodika provedení hmotnostní analýzy

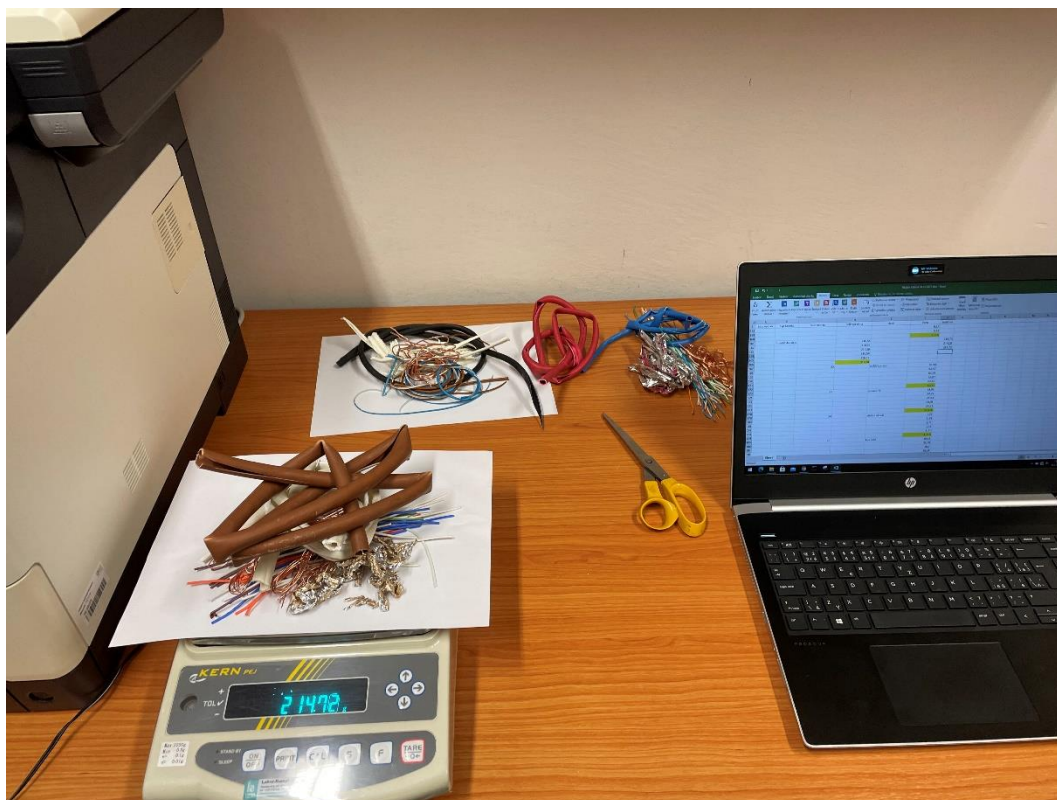
Po shromáždění vzorků jsem zvolil následující postup práce:

1. Zkrácení vzorků jednotlivých kabelů na jednotnou délku jednoho metru. Zde není nutné dosahovat nějaké zvláštní přesnosti.
2. Označení číslem a mechanické rozdělení na jednotlivé součásti kabelu – rozholení. Při této činnosti je třeba pečlivě oddělit všechny části složky, nic nepoztrácet, dbát na to, aby se jednotlivé složky vzájemně nepromíchaly a neznečistily.
3. Příprava váhy.
Stanovení hmotnosti probíhá na čistém listu běžného kancelářského papíru a na laboratorní váze KERN PEJ 2200-2M. Váhu je třeba před použitím očistit, uvést do vodorovné polohy a vytárovat. Váha tak zobrazuje hmotnost vzorku netto. (KERN, ©2017)
4. Vážení vzorku.
Vážení je zahájeno opatrným vložením všech částí vzorku do středu plochy váhy. Po ustálení váhy lze odečíst hmotnost a zapsat do tabulky.
5. Pro dosažení co největší přesnosti se proces vážení opakuje 5x, a to z toho důvodu, aby se zabránilo chybě měření.
6. Očištění váhy a příprava na další vážení.

Ke stanovení hmotnosti byla použita laboratorní váha:

KERN PEJ 2200-2M, serial number: 088780033.

Metrologická zkouška a kalibrace nedoložena - použito v režimu pracovního měřidla.



Obrázek 18: měření hmotnosti složek. (autor, 2022)

Všechny naměřené hodnoty byly zapsány do výsledkové tabulky pod číslem vzorku k příslušnému kabelu. Měření každého vzorku bylo podle metodiky opakováno 5x. Tímto způsobem byly zpracovány všechny naměřené veličiny a výsledky byly zapsány do tabulky vyhodnocení hmotnostní analýzy kabelů.

4.2.1.2 Vyhodnocení hmotnostní analýzy vzorků

Výsledková tabulka hmotnostní analýzy obsahuje vypočtenou průměrnou naměřenou hmotnost jednotlivých složek kabelů. Vypočtené hodnoty jsou přiřazeny k číslu kabelu, typu kabelu a číslu vzorku, které je přiřazeno ke každé součásti kabelu jako například vnější izolace, výplň a kovová složka kabelu.

číslo kabelu	typ kabelu	číslo vzorku	celková váha [g]	druh části kabelu	váha [g]	kontrolní váha [g]	přepočet na 1000g [g]	zastoupení složky [%]
1	CYKY 5Cx2,5		238,212			237,19		100,0
		1		kov měď	103,872		436,05	43,6
		2		izolace vnější	48,26		202,59	20,3
		3		izolace žil	45,492		190,97	19,1
		4		vnitřní výplň	39,526		165,93	16,6
2	CYKY 2x2,5		119,724			119,71		100,0
		5		izolace vnější	32,798		273,95	27,4
		6		vnitřní výplň	32,358		270,27	27,0
		7		izolace žil	15,006		125,34	12,5
		8		kov měď	39,544		330,29	33,0
3	FTP 6e		44,614			44,63		100,0
		9		izolace vnější	14,22		318,73	31,9
		10		izolace žil	5,374		120,46	12,0
		11		kov měď	18,088		405,43	40,5
		12		hliníková folie	5,71		127,99	12,8
		13		ocelový drátek	1,13		25,33	2,5
		14		provázek	0,11		2,47	0,2
4	FTP		84,392			84,32		100,0
		15		izolace vnější	44,036		521,80	52,2
		16		izolace žil	13,958		165,39	16,5
		17		kov měď	16,836		199,50	19,9
		18		hliníková folie	2,146		25,43	2,5
		19		oplet	4,672		55,36	5,5
		20		ocelový drátek	2,556		30,29	3,0
		21		provázek	0,116		1,37	0,1
5	PrakabF 4x2x0,8		216,58			216,57		100,0
		22		izolace vnější	62,91		290,47	29,0
		23		izolace žil	24,916		115,04	11,5
		24		hliníková folie	1,716		7,92	0,8
		25		kov měď	38,216		176,45	17,6
		26		ocelový drátek	1,218		5,62	0,6
		27		vnitřní výplň	85,686		395,63	39,6
		28		hliníková folie	1,846		8,52	0,9
6	JYTY		26,812			26,80		100,0
		29		izolace vnější	11,86		442,34	44,2
		30		izolace žil	3,39		126,44	12,6
		31		kov měď	10,642		396,91	39,7
		32		hliníková folie	0,522		19,47	1,9
		33		provázek	0,108		4,03	0,4
		34		hliníková folie - stínění	0,288		10,74	1,1
7	optický 24 vláken	35	44,296	izolace, výplň, vlákna	44,296			100,0

Tabulka 6: vyhodnocení hmotnostní analýzy vzorků kabelů. (autor, 2022)

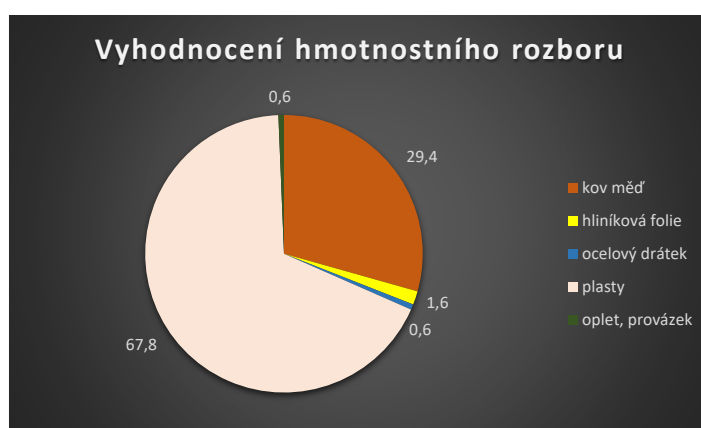
Vyhodnocením vypočtených hodnot z výsledkové tabulky hmotnostní analýzy jsem získal jednotlivé zastoupení složek ve vstupní směsi odpadních kabelů. Pro snadnější přehled jsem výsledky zanesl do souhrnné tabulky číslo 7 suma hmotností všech součástí kabelů a vygeneroval výšečový graf vyhodnocení hmotnostního rozboru (viz tabulka 8).

Z grafu vyplývá, že největší část, a to 67,8% ze vstupní směsi odpadních kabelů, tvoří polymery – plasty. Druhé nejvyšší zastoupení ve směsi má kovová složka, 29,4% – v případě použitých kabelů převažuje měď, při jiné skladbě vstupní směsi odpadních kabelů by se mohlo jednat o kombinaci mědi a hliníku nebo převážně hliníku.

Kovy lze označit jako hlavní produkt. Pokud budeme hlavní produkt považovat za sekundární zdroj mědi nebo hliníku, tak potom převažující plastovou složku výstupního materiálu lze označit jako vedlejší produkt zpracování.

Σ všech vzorků druh části kabelů	celková hmotnost složky [g]	celkové zastoupení složky [%]
kov měď	227,2	29,4
hliníková folie	12,2	1,6
ocelový drátek	4,9	0,6
plasty	524,1	67,8
oplet, provázek	5,0	0,6
Σ celkem	773,4	100,0

Tabulka 7: suma hmotností všech součástí kabelů. (autor, 2022)



Tabulka 8: výšečový graf vyhodnocení hmotnostního rozboru. (autor, 2022)

5 Návrh řešení a dosažené výsledky

5.1 Praktická zkouška studijní recyklační linky

Studijní linka na zpracování odpadních kabelů není propojena do souvislého řetězce na sebe navazujících strojů. I tak bylo ale nutné udělat funkční zkoušku celku, aby bylo možné posoudit efektivitu a kvalitu zpracování a separace. Mezi jednotlivými stroji na zpracování bylo nutné materiál manuálně přesunovat.

Dvojhřídelový hrubý drtič zpracovává kusové kabely podávané do násypky. Velikost výstupní frakce je mezi 50 – 130 mm. Zpracovává podaný materiál na takové kusy, které lze dál podávat například pásovým podavačem do nožového mlýna – drtiče.



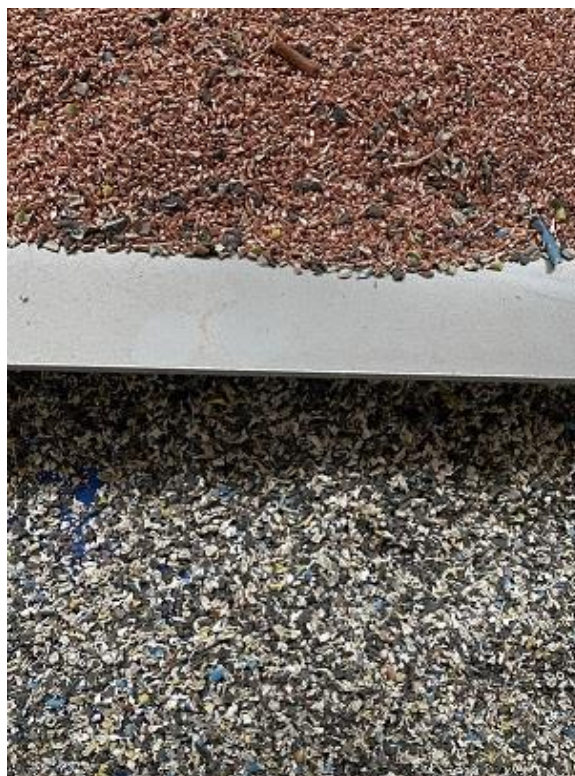
Obrázek 19: podávání kusových kabelů do hrubého drtiče. (autor, 2022)

Do nožového mlýna jsou ručně nasypávány nadrcené kusy z hrubého drtiče. Mlýn je zpracovává na frakci 1-5mm. Velikost výstupní frakce lze měnit výměnou pracovních nástrojů – nožů. Pro separaci je ale nutné zvolit takovou velikost, aby použitá technologie byla schopna oddělit jednotlivé části s co největší efektivitou. Nože mlýna jsou značně opotřebený, z toho důvodu, že ve stroji je drcen i materiál, na který nejsou tyto nože vhodné.

Na nožový mlýn přímo navazuje pneumatický dopravník s cyklonovým odlučovačem a filtrem odprášení. Pneumatický dopravník nemá dostatečný tah na transport všech částí výstupní frakce a většina kovového materiálu zůstává ve svodu materiálu před cyklonovým odlučovačem. Svod materiálu o průměru 150mm bylo potřeba rozebrat a materiál z ní vysypat. V cyklonovém odlučovači je materiál složený převážně jen z plastové složky, kovové části jsou tam do velikosti 1mm. Větší kovové části pneumatický dopravník kvůli malému tahu není schopen dopravit. Odprášení a filtrace funguje spolehlivě, materiál je čistý.



Obrázek 20: detail trubky pneumatického dopravníku. (autor, 2022)



Obrázek 21: detail výstupní frakce z nožového mlýna. (autor, 2022)

Po mechanickém zpracování vstupní směsi odpadních kabelů následuje proces separace, který je klíčový pro dosažení výsledné kvality výstupních produktů linky. Proces separace se skládá z magnetického separátoru, kde jsou ze směsi odděleny kovové magnetické částičky a z fluidního splavu FS-1, který je považován za hlavní část studijní recyklační linky.



Obrázek 22: magnetická separace. (autor, 2022)

Fluidní splav FS-1 je považován za klíčovou část linky. Pracuje na principu rozdílných měrných hmotností jednotlivých složek podávané vstupní frakce. Nadrcené odpadní kabely se

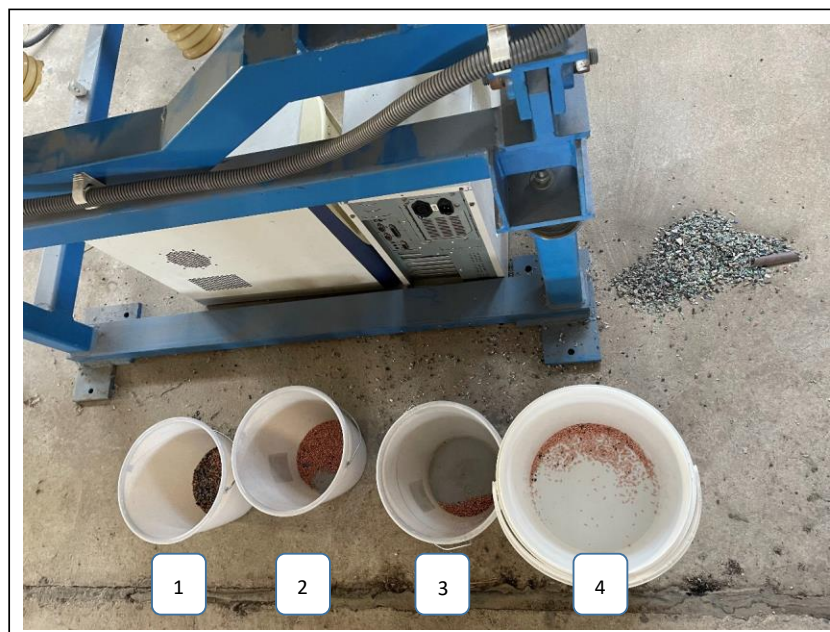
tak zdají ideálním materiálem pro využití fluidního splavu. Do fluidního splavu je materiál podáván vibračním podavačem, který zajišťuje optimální rychlost podávání nadrcené směsi a stálý přísun. Splav má 4 výstupní přepážky, kdy každá je určená pro jiný druh směsi. K nastavení splavu byly využity závěry práce Ing. Podlešáka, který se ve své diplomové práci v roce 2014 zabýval ideálním nastavením fluidního splavu.



Obrázek 23: separace fluidním splavem. (autor, 2022)

Separovaný materiál byl zachytáván do záchytných nádob. Z praktické zkoušky vyplynulo, že fluidní splav nelze ani v jednom případě nastavit tak, aby nebylo nutné opakovaně výstupní směs z fluidního splavu separovat pro dosažení požadované čistoty směsi. Nedochozí ke spolehlivé separaci jednotlivých složek.

Ani po úpravě nastavení stroje nedosahuje separace výsledků vhodných pro zařazení separátoru do průmyslové linky. Na první výpadové klapce vzniká směs, na druhé 95% čistota kovové složky, na třetí a čtvrté klapce 99% čistota. Materiál z první klapky je tak potřeba znovu podat do vstupu do FS-1 a opakovat proces separace. (PODLEŠÁK, 2015)



Obrázek 24: směs na výstupu z jednotlivých klappek FS-1. (autor, 2022)

5.1.1 Dílčí závěry ze zkoušky studijní recyklační linky

- Hrubý drtič je vhodný pro zařazení do linky – frakce na výstupu má vhodné parametry pro automatickou dopravu do dalšího stroje drtiče.
- Do nožového mlýnu lze podávat jen předdrcené části kabelů, jinak pracuje nespolehlivě a hrozí zastavení stroje. Pracovní nože je potřeba nabrousit nebo vyměnit.
- Pneumatický dopravník má malý tah na dopravu všech složek výstupní frakce z nožového mlýnu.
- Magnetický separátor, pásový dopravník a vibrační podavač pracují v souladu s parametry fluidního splavu správně.
- Fluidní splav neseparuje spolehlivě všechny složky směsi. Z první výstupní klapky je nutné směs opakovaně separovat.
- Stroje linky nejsou propojeny dopravníkovým systémem a je nutné materiál ručně přenášet a podávat ke zpracování.

5.2 Návrh optimalizace recyklační linky

Praktickou zkouškou provozu studijní recyklační linky bylo zjištěno, že jako zásadní limitující faktor nasazení linky v průmyslovém provozu lze označit chybějící pásové dopravníky mezi jednotlivými stroji a z toho vyplývající nutná ruční manipulace s odpadní směsí. Jako další omezující faktor je nutná opakovaná separace výstupního materiálu z první klapky fluidního splavu. Optimalizace je tedy zaměřena na propojení jednotlivých strojů zařazených do recyklační linky vhodným automatickým dopravníkovým systémem a návrhem vhodné technologie separačního úseku.

5.2.1 Pneumatický dopravník

Po uvedení do provozu bylo zjištěno, že pneumatický dopravník nemá dostatečný tah, aby dopravil všechny složky výstupní frakce z nožového mlýna. Odprášení a cyklonový odlučovač fungují správně, ale výkon sacího ventilátoru, který je 4 kW, 5500 m³/hod není dostatečný.

Pro spolehlivou funkci je vhodné provést náhradu za sací ventilátor stejného výrobce, Urban Technik VE 10000 o výkonu 7,5 kW, 9300 m³/hod. Tento ventilátor dosahuje o 44% vyššího podtlaku než v současnosti použitý typ ventilátoru. (Urban technik, ©2022)



Obrázek 25: ventilátor VE-10000. (Urban –technik.cz, 2022)

5.2.2 Pásové dopravníky

Z důvodu propojení jednotlivých strojů zařazených do recyklační linky je nutné doplnit chybějící dopravníkový systém. Jako nejvhodnější řešení se prokázalo propojení pásovými dopravníky. Zajistí spolehlivou dopravu materiálové směsi v požadovaném objemu pro celkovou rychlost zpracování na lince.

Pro doplnění je vhodné využít šikmý pásový dopravníkový systém firmy Das s.r.o. Frýdek Místek, který má PVC dopravníkový pás a který lze upravovat podle výškových rozdílů výstupních a vstupních otvorů do jednotlivých zpracovatelských strojů. (Das s.r.o., ©2022)



Obrázek 26: pásový dopravník šikmý. (Das spol. s.r.o., 2022)

5.2.3 Úsek separace

Separační úsek je nejdůležitější část recyklační linky. Odpovídá za oddělení jednotlivých složek odpadní směsi. Složky musí mít požadovanou kvalitu a čistotu, a zároveň musí separace probíhat efektivně, aby kovová část složky nezůstávala zamíchaná v plastech a naopak. Docházelo by tak ke snížení výtěžnosti odpadního materiálu, snížení množství výstupního produktu a snížení ekonomické rentability linky. Cílem je ze zpracovaného odpadu vytvořit druhotnou surovinu, která bude použitelná při materiálové recyklaci v dalším výrobním procesu. (SLAVÍK et al., 2004)

Fluidní splav FS-1 nezaručuje rozdělení v požadované výstupní kvalitě, výstupní materiál z první klapky je nutné opakovaně separovat, což komplikuje nasazení v lince. Jako efektivnější technologii separace byla vybrána separace vodním splavem a separace na principu vířivých proudů. Tyto principy jsou pro separování neželezných kovů, jako je měď a hliník, efektivnější než separace fluidním splavem.

Vodní splav využívá technologii gravitačního rozdělení ve vodě, která přes nevýhodu vlhkosti výstupní směsi a nutnosti vodního hospodářství poskytuje nejvyšší čistotu výstupního produktu ze všech dostupných technologií. *Eddy current separator* svou funkcí vytváří v neželezných kovech magnetické pole o shodném náboji jako náboj magnetu separátoru a tyto neželezné kovy jsou potom odpuzovány od magnetického válce separátoru. (SCHLETT, LUNGU, 2002)

Pro zařazení do linky byly vybrány separátor firmy Wamag s.r.o. typ Locust, který umožňuje separaci frakce 0,5 - 5,0 mm a vodní splav firmy Ing. Častulík s.r.o. typ MS - 0 - 10102. V tabulce číslo 9 je porovnání technických parametrů obou navržených strojů a jejich ceny.

Porovnání technických parametrů		
	MS-0-10102	Wamag Locust
Příkon [kW]	1,7	2,2
Kapacita [kg.h ⁻¹]	200	2000 - 5000
Cena [kč]	455 000	850 000

Tabulka 9: porovnání technických parametrů a ceny. (autor, 2022)

Pro zařazení separačního zařízení do linky je rozhodující praktická zkouška nebo ověření efektivity stroje v provozu. Tabulka vychází z katalogových údajů výrobce poskytnutých pro účely závěrečné práce a předpokládá se čistota výstupní směsi v souladu s ČSN EN 12861, což představuje kovový granulát o čistotě 99,8%. (ČSN EN 12861, ©2018)



Obrázek 27: separátor ECS Locust. (Wamag s.r.o., 2022)



Obrázek 28: mokrý splav MS -0-10102. (Ing. Častulík s.r.o., 2022)

5.2.4 Finanční analýza – ekonomické zhodnocení

Pro celkovou výtěžnost linky je důležitá kapacita zpracování separační linky. Zároveň se jedná o nejdůležitější a nejdražší část recyklační linky protože na kvalitě a efektivitě separace záleží celkový finanční výnos. Podle výsledku hmotnostní analýzy směsi použitých kabelů je výtěžnost mědi 29,4% z celkové hmotnosti zpracovaných odpadních kabelů. Náklady na provoz linky budou zanedbány, protože při porovnání obou variant bude rozdíl jen v použité separační technologii, kdy zvolený vodní splav má nižší příkon než separátor Locust. Je ale nutné vypořádat se s vodním hospodářstvím splavu, což zvýšené množství odběru energie vyrovná. Náklady na zaměstnance, údržbu a další infrastrukturu nebudou při výpočtu zohledněny.

U linky se počítá s jednosměrným provozem vyjma státních svátků, to znamená 2016 hodin pro rok 2022. Požadovaný úrokový výnos je 10% a doba životnosti 6 let. Pro vyhodnocení výnosu investice byla zvolena metoda čisté současné hodnoty (ČSH) *Net Present Value*. Tato metoda vypočítává rozdíl mezi diskontovanými peněžními příjmy, které reprezentují výnosy z investice a kapitálovými výdaji. Jako výhodnější investice je pak vyhodnocena ta, která má vyšší hodnotu ČSH. (ROSOCHATECKÁ, 2014)

Předpokládaný roční příjem je vypočten ze součinu maximální kapacity stroje a ceny měděného mixu stanovené k 7. 3. 2022 na 180,- czk/kg. (Kurzy.cz, ©2022)

Vodní splav MS-0-10102 <i>Net Present Value</i>		
Kapacita stroje max.	200	[kg/hod]
Doba provozu stroje	2016	[hodin/rok]
Doba životnosti	6	[roky]
Poměr obsahu Cu směsi	29,4	[% Cu]
Cena Cu mix	180	[kč/kg]
Zpracováno celkem ročně	403 200,00	[kg]
Výtěžek Cu ročně	118 540,80	[kg]
Roční výnos	21 337 344,00	[kč]
Diskontní sazba	10	[%]
Počáteční investice	455 000,00	[kč]
Výnos rok 1	21 337 344,00	[kč]
Výnos rok 2	21 337 344,00	[kč]
Výnos rok 3	21 337 344,00	[kč]
Výnos rok 4	21 337 344,00	[kč]
Výnos rok 5	21 337 344,00	[kč]
Výnos rok 6	21 337 344,00	[kč]
NPV	92 474 695,75	[kč]
$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^t \frac{C_i}{(1+r)^i}$		

Tabulka 10: výpočet ČSH pro vodní splav. (autor, 2022)

Wamag Locust <i>Net Present Value</i>		
Kapacita stroje max.	5000	[kg/hod]
Doba provozu stroje	2016	[hodin/rok]
Doba životnosti	6	[roky]
Poměr obsahu Cu směsi	29,4	[% Cu]
Cena Cu mix	180	[kč/kg]
Zpracováno celkem ročně	10 080 000,00	[kg]
Výtěžek Cu ročně	2 963 520,00	[kg]
Roční výnos	533 433 600,00	[kč]
Diskontní sazba	10	[%]
Počáteční investice	850 000,00	[kč]
Výnos rok 1	533 433 600,00	[kč]
Výnos rok 2	533 433 600,00	[kč]
Výnos rok 3	533 433 600,00	[kč]
Výnos rok 4	533 433 600,00	[kč]
Výnos rok 5	533 433 600,00	[kč]
Výnos rok 6	533 433 600,00	[kč]
NPV	2 322 392 393,85	[kč]
$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^t \frac{C_i}{(1+r)^i}$		

Tabulka 11: výpočet ČSH pro ECS. (autor, 2022)

5.2.4.1 Vyhodnocení finanční analýzy

Výpočtem ČSH pro obě separační technologie v tabulkách 10 a 11 se prokázalo, že varianta rozduřování pomocí ECS separátoru WAMAG Locust, přestože má vyšší vstupní investici, je při zajištění dostatečného množství vstupní odpadní směsi výhodnější.

6 Diskuze a závěry

6.1 Diskuse

Na základě získaných výsledků hmotnostní analýzy odpadních kabelů a zhodnocení efektivity zpracování odpadní směsi v recyklační lince, byly navrženy změny ve složení strojů v lince a jiné, efektivnější technologické postupy, které mají rozdužit odpadní směs na dále využitelné složky druhotných surovin. Správné složení linky je důležité pro její efektivní funkci a pro zajištění návratnosti vynaložených finančních prostředků na její výstavbu a provoz.

Evropská komise k dosažení cílů v rámci klimatické neutrality předpokládá snížení emisí a energetické náročnosti až o 60%, a to za současného trendu trvalého růstu a udržení ekonomické prosperity. Využívání druhotných surovin je sice pouze dílčí částí výrobní a průmyslové sféry, ale postupným rozšířením recyklačních linek bude docházet ke snížení energetické náročnosti získávání materiálů pro průmyslovou výrobu. Bude tak docházet ke snížení zátěží, které představuje těžba, zpracování a výroba kovů z primárních zdrojů ale i skládkování materiálů, které by bylo možné dále energeticky nebo materiálově využít. (Evropská komise, ©2019)

Postupným vývojem technologií zaměřených na recyklaci se bude snižovat cena recyklačních linek, a tím se otevrou cesty k většímu rozšíření a dostupnosti i tam, kde vstupní investice do pořízení a provozu linky představuje neúnosné náklady, přestože je v konečném důsledku finančně výhodná. Práce svými poznatky a návrhem efektivnější linky přispívá k tomuto rozšíření a nabízí možnosti využití i alternativních technologií a postupů. Práce tak navazuje na poznatky o odpadech a jejich zpracování (KURAŠ, 2014) a poznatky o likvidaci a využití odpadů. (JUCHELKOVÁ, 2000)

Studijní recyklační linka byla již v minulosti předmětem experimentu v rámci diplomových prací a byla podrobena detailnímu rozboru jednotlivých strojních částí. Ing Podlešák (2015) ve své diplomové práci navrhoval nastavení fluidního splavu a došel ke shodnému výsledku, přestože provedl nespočet měření nastavení, a to že fluidní splav FS-1 není optimální zařízení pro separaci odpadních kabelů a je třeba pro efektivnější funkci navrhnout technologii jinou.

Pro další rozvedení tématu návrhu recyklačních linek by bylo vhodné využít poznatků ze zavedených průmyslových provozů na zpracování odpadů. Získat tak praktické zkušenosti s provozem linek a specifik zpracování jednotlivých druhů dále recyklovatelných směsí materiálů, protože za odpad by mělo být označováno jen to, co nelze dále energeticky ani materiálově využít.

Pro hmotnostní analýzu byla záměrně využita nehomogenní směs různorodých kabelů, která se má co nejvíce přiblížit vstupnímu materiálu zpracovávanému v recyklačních provozech. Složení a výtěžnost kovové složky ze vstupní směsi ovlivňuje celkovou efektivitu linky a návratnost finanční investice do jejího pořízení. Jiným složením analyzovaného materiálu tak lze významně ovlivnit výsledek finanční analýzy a výhodnost investice do linky. Náklady nebo přínosy vstupující do reálného provozu linky, jako je údržba strojů nebo environmentální přínosy, pro které ale nebylo možné v rámci experimentu získat relevantní podklady, nebyly při výpočtu zohledněny. Během praktického provozu ale můžou náklady spojené s provozem, údržbou nebo obsluhou linky dosáhnout takové výše, že provoz linky bude finančně ztrátový. Provedená finanční analýza je tak jen vodítkem pro návrh technologie linky a počítá s maximálním využitím vstupní kapacity strojů, čehož bude ale v praktickém provozu málokdy dosaženo.

Provedením elementární analýzy materiálového složení polymerní výstupní složky z recyklační linky by bylo možné stanovit její základní vlastnosti pro energetické využití a navrhnout další postup zpracování. Takto by došlo teoreticky ke 100% využití vstupní směsi odpadních kabelů, které by přestaly být odpadem a staly by se sekundárním zdrojem neželezných kovů a energeticky využitelných materiálů. Polymerní materiály sice nejsou tak energeticky náročné na výrobu jako kovy, ale vyznačují se velmi špatnou rozložitelností. S navyšováním produkce syntetických polymerů dochází k akumulaci těchto materiálů na skládkách a zpracování těchto materiálů tak nabývá na důležitosti. (VALÁŠEK, 2014)

6.2 Závěr

Z předložených výsledků práce vyplývá, jaké legislativní normy se zabývají odpadovým hospodářstvím a ve kterých je kladen důraz na využívání sekundárních zdrojů surovin nejen na úrovni obcí a krajů. Hmotnostní analýza složení vstupní odpadní směsi zobrazuje hmotnostní poměry jednotlivých složek, které lze energeticky nebo materiálově využít. Praktická zkouška recyklační linky určené ke studijním účelům ukazuje, že je nutné vždy posoudit dané recyklační technologie v praktickém provozu, protože ne vždy jsou vhodné nebo výhodné pro zpracování konkrétního druhu nebo složení odpadu.

Návrh optimalizace linky ukazuje možnost využití technologických zařízení a postupů recyklace a jejich vzájemné propojení do funkčního celku. Finanční analýza za využití dostupných podkladů prokazuje návratnost vynaložených prostředků, nelze však racionálně ohodnotit nepeněžní přínos, v podobě snížení environmentální zátěže a s tím spojené zlepšení životních podmínek společenství. Trvale udržitelný rozvoj by měl být cílem všech vyspělých společenství, které dokážou vnímat a posoudit svůj vliv na budoucí životní podmínky a s tím spojenou prosperitu.

7 Seznam použitých zdrojů

7.1 Přehled použité literatury a zdrojů

- Bronnenberg, 2012: Návod k páračce kabelů (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.rpjr.cz/katalog/recyklacni-technika/svlikacky-paracky-kabelu/> >.
- Conserve energy future, ©2020: What is sanitary landfill (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.conserve-energy-future.com/what-is-sanitary-landfill> >.
- ČSN 332000 – 5 – 52: Výběr a stavba elektrických zařízení – elektrická vedení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 119 s.
- ČSN EN 12 861: Měď a slitiny mědi - odpad (421330). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 32 s.
- ČSN EN 14 899: Charakterizace odpadů. Český normalizační institut, Praha, 2006. 27 s.
- Das s.r.o., ©2022: Šikmé dopravníkové pásy (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.dasfm.cz/cz/produkty/dopravniky/pasove-dopravniky/pasovy-dopravnik-sikmy/70.html#> >.
- Davis J. R., 2001: Copper and Copper Alloys. ASM International, Novelt, Ohio, 652 s. ISBN 0871707268, 9780871707260.
- Debnath B., Chowdhury R., Ghosh S.K., 2018: Sustainability of metal recovery from E-waste. Frontiers of Environmental Science & Engineering volume 12. P 2.
- Deutsches kupferinstitut, ©2020: Elektrotechnik und energie (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.kupferinstitut.de/elektrotechnik-und-energie/> >.
- European parliament EU, ©2016: STRATEGY FOR SECONDARY RAW MATERIALS (on-line) [cit. 2022. 10. 01.], dostupné z < <http://www.europarl.europa.eu/strategy> >.

- Evropská komise, 2019: Zelená dohoda pro Evropu. Evropská komise, Brusel, 25 s.
- G&G filtration ©2022: technical data sheet cyclone separator (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.ggfiltration.cz/katalog/cyklonove-odlucovice> >.
- Habisch A., Jonker J., Wegner M., Schmidpeter R., 2004: Corporate Social Responsibility Across Europe. Springer Science & Business Media, Heidelberg, 398 s., ISBN 3540232516, 9783540232513.
- Hampl J., Lipták J., Sedláček J., Štupl K., 1991: Materiály pro elektrotechniku. ČVUT, Praha. 145 s. ISBN 80-01-01544-0.
- Hlavatá M., 2004: Odpadové hospodářství. Vysoká škola báňská – technická univerzita, Ostrava. 174 s.
- Charbonneau-Lefort M. et Yadlowsky M. J., 2015: Optical Cables for Consumer Applications. J. Lightwave Technology 33. 872-877.
- Juchelková D., 2000: Likvidace a využití odpadů. Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Ostrava. 73 s.
- Kasík I., Peterka P., 2011: Optická vlákna – páteř moderních komunikací (online) [cit. 2022. 10. 01.], dostupné z < https://www.ufe.cz/kasik_peterka_ccf_opticka_vlakna >.
- KERN & Sohn GmbH, 2017: Návod k přesné váze Kern PES/PEJ (on-line) [cit. 2022. 17. 02.], dostupné z < [kern_pes/pej - KERN & SOHN GmbH \(kern-sohn.com\)](https://www.kern-sohn.com/kern_pes/pej) >.
- Košťál J., 2009: Správné spojování hliníku a mědi. Odborný časopis Elektro 11. 19-20.
- Kuraš M., 2008: Odpadové hospodářství. Vodní zdroje Ekomonitor, Chrudim, 143 s.
- Kuraš M., 2014: Odpady a jejich zpracování. Vodní zdroje Ekomonitor, Chrudim, 343 s.
- Kurzy.cz, ©2022: Komodity, měď, výkup (on-line) [cit. 2022. 07. 03.], dostupné z < <https://www.kurzy.cz/komodity/med/vykup/> >.

- Manas Ch., Salil K. R., 2006: Plastics Technology Handbook. Imprint CRC Press, Boca Raton. 896 s. ISBN 9780429124020.
- Metalcentrum.cz, ©2022: Měď (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z <https://www.metalcentrum.cz/med/> <
- Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2014: Politika druhotných surovin, příloha k usnesení vlády ČR 755/2004.
- Nařízení EK č. 715/2013, směrnice stanovující kritéria kdy měděný šrot přestává být šrotem, v platném znění.
- Odborný časopis elektro, ©2005: Technologie získávání drahých a obecných kovů z odpadních elektrických a elektronických zařízení (on-line) [cit. 2022. 20. 02.], dostupné z < <http://www.odbornecasopisy.cz/technologie-ziskavani-drahych-a-obecných-kovu-z-odpadnich-elektrických-a-elektronických-zarizení--13630> >.
- Pietschmann D., ©2019: Materiály pro elektrotechniku (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.vovcr.cz/odz/tech/395/page00.html> >.
- Podlešák L., 2015: Návrh projektu linky na zpracování vybraného elektroodpadu. Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, Katedra technologických zařízení staveb, Praha. 58 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.
- Rosochatecká E., 2014: Ekonomika podniků. Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, Praha. 201 s. ISBN 9788021322592.
- Samuelsson C., Björkman B., 2014: Handbook of Recycling Chapter 7 - Copper Recycling. Elsevier, Amsterdam. 85-94. ISBN 9780123964595.
- Sedlačík M., 2018: Možnosti využití solných strusek z výroby hliníku. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů, Brno. 40 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. Ústav chemie materiálů v Brně.

- Sedlák B., ŠTOLL I., 2017: Elektřina a magnetismus. Karolinum, Praha, 600 s. ISBN 9788024631462.
- Schlett Z., Lungu M., 2002: Eddy-current separator with inclined magnetic disc. Minerals Engineering, Volume 15, Issue 5. 365 – 367.
- Slavík J., Veverková S., Doležal M., 2004: Ekonomické modely hodnocení komplexních nákladů v odpadovém hospodářství. IREAS o.p.s, Praha, 231 s.
- Urban Technik, ©2022: transportní ventilátory (on-line) [cit. 2022. 15. 01.], dostupné z < <https://www.urban-technik.cz/produkty-a-sluzby/ventilatory/> >.
- Valášek P., 2014: Polymerní materiály. Česká zemědělská univerzita, Praha. 67 s. ISBN 978-80-213-2489-3
- Voštová V. et Fries J., 2003: Zpracování pevných odpadů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 157 s.
- Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů, v platném znění.
- Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností.
- Zhang S., Forssberg E., Arvidson B., Moss W. D., 1999: Separation mechanisms and criteria of a rotating eddy-current separator operation. Resources, Conservation and Recycling, Volume 25, Issues 3–4. 215 – 232.

7.2 Přehled obrázků

- Obrázek 1: optický kabel a princip jeho funkce. (KASÍK, PETERKA, 2011)
- Obrázek 2: sekací komora drtiče firmy Guidetti. (JPR service, 2022)
- Obrázek 3: drtič kabelů Wagner-Simenia.(Simenia.com, 2022)
- Obrázek 4: elektrická svlíkačka Bronnenberg. (Bronnenberg, 2012)
- Obrázek 5: fluidní splav. (Jelínek-Stroje, 2022)
- Obrázek 6: princip magnetického separátoru. (Deostech.cz, 2022)
- Obrázek 7: separace flotací. (Ožana K., 2015: Možnosti využití polymetalických rud s obsahem stříbra v rudních revírech Krušných hor)
- Obrázek 8: odlučovač prachu. (G&G filtration, 2022)
- Obrázek 9: blokové schéma stávající linky. (autor, 2022)
- Obrázek 10: dvouhřídelový hrubý drtič. (jelinek-stroje.cz, 2022)
- Obrázek 11: drtič Terier G-GH 200/300 mini 5,5 kW. (Terier.cz, 2022)
- Obrázek 12: pásový dopravník ODES DPK 400/3,5. (autor, 2022)
- Obrázek 13: pneumatický dopravník s cyklonovým odlučovačem. (autor, 2022)
- Obrázek 14: vibrační podavač ROX MX 200. (autor, 2022)
- Obrázek 15: magnetický separátor Wamag SRTK040034. (autor, 2022)
- Obrázek 16: fluidní splav FS-1. (autor, 2022)
- Obrázek 17: podtlakový odsavač POC – 20 JET. (autor, 2022)
- Obrázek 18: měření hmotnosti složek. (autor, 2022)
- Obrázek 19: podávání kusových kabelů do hrubého drtiče. (autor, 2022)
- Obrázek 20: detail trubky pneumatického dopravníku. (autor, 2022)

- Obrázek 21: detail výstupní frakce z nožového mlýna. (autor, 2022)
- Obrázek 22: magnetická separace. (autor, 2022)
- Obrázek 23: separace fluidním splavem. (autor, 2022)
- Obrázek 24: směs na výstupu z jednotlivých klapek FS-1. (autor, 2022)
- Obrázek 25: ventilátor VE-10000. (Urban – technik.cz, 2022)
- Obrázek 26: pásový dopravník šikmý. (Das spol. s.r.o., 2022)
- Obrázek 27: separátor ECS Locust. (Wamag s.r.o., 2022)
- Obrázek 28: mokrý splav MS -0-10102. (Ing. Častulík s.r.o., 2022)

7.3 Přehled tabulek a grafů

- Tabulka 1: úspora nákladů při výrobě kovů z odpadu. (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2014)
- Tabulka 2: rozdělení druhů kabelů. (autor, 2022)
- Tabulka 3: přehled metod rozdrůžování. (VOŠTOVÁ, FRIES, upravil autor, 2003)
- Tabulka 4: kabely použité k hmotnostní analýze. (DEK.cz, upravil autor, 2022)
- Tabulka 5: výpočet odchylky měření. (autor, 2022)
- Tabulka 6: vyhodnocení hmotnostní analýzy vzorků kabelů. (autor, 2022)
- Tabulka 7: suma hmotností všech součástí kabelů. (autor, 2022)
- Tabulka 8: výsečový graf vyhodnocení hmotnostního rozboru. (autor, 2022)
- Tabulka 9: porovnání technických parametrů a ceny. (autor, 2022)
- Tabulka 10: výpočet ČSH pro vodní splav. (autor, 2022)
- Tabulka 11: výpočet ČSH pro ECS. (autor, 2022)