Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb

Diplomová práce

Návrh inovace technologické linky pro zpracování plastů z OEEZ

Bc. Anastasiia Kolobova

© 2026 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Anastasiia Kolobova

Technologická zařízení staveb
Zařízení pro využití odpadů

Název práce

Návrh inovace technologické linky pro zpracování plastů z OEEZ

Název anglicky

Proposal for innovation of a technological line for processing plastics from WEEE

Cíle práce

Cílem diplomové práce je navrhnout inovaci technologické linky na zpracování plastových frakcí z odpadních elektrických a elektronických zařízení (OEEZ). Pro naplnění tohoto cíle bude provedena analýza stávající technologické linky a dostupných technických zařízení pro zpracování plastů z OEEZ. Součástí práce bude provedení měření a vyhodnocení surovinového a zrnitostního složení zpracovávaných plastových směsí. Provede se ekonomické posouzení návrhu inovace.

Metodika

Metodický postup práce bude vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců, charakteristiky legislativy v dané oblasti odpadového hospodářství, popisu technologie a techniky vhodné ke zpracování plastových frakcí z odpadních elektrických a elektronických zařízení (OEEZ). Bude uskutečněn materiálový rozbor plastových frakcí z OEEZ. Navrhne se inovace výchozí technologie pro zpracování plastových frakcí z OEEZ. Závěrem diplomové práce bude vypracován ekonomický rozbor.

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

elektroodpad, plastové frakce, recyklace, třídění

Doporučené zdroje informací

Bazargan, A., Lam, K.F., McKay, G. 2012. Challenges and opportunities of e-waste management (Book Chapter). E-Waste: Management, Types and Challenges, 39-66.

Cui, J., Forssberg, E. 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. Journal of Hazardous Materials, 99 (3), 243-263.

Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., Gidarakos, E. 2009. Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. Journal of Hazardous Materials 161 (2-3), 913-919.

Su, P., He, Y., Wang, J., ... Zhang, Y., Pang, Z. 2024. Green separation and decomposition of crystalline silicon photovoltaic module's backsheet by using ethanol. Waste Management 179, 144–153.

Widmer, R. , Oswald-Krapf, H. , Sinha-Khetriwal, D. , Schnellmann, M. , Böni, H. 2005. Global perspectives on e-waste (Review). Environmental Impact Assessment 25 (5), 436-458.

Předběžný termín obhajoby

2025/2026 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jiří Bradna, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 17. 01. 2025

prof. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 02. 2025

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2026

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Návrh inovace technologické linky pro zpracování plastů z OEEZ" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. března 2026 _____

Poděkování

Dovoluji si tímto poděkovat vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Jiřímu Bradnovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Karlu Šímovi, panu Miloši Němcovi a panu Ing. Martinu Fišerovi za odborné poradenství, vstřícnost a praktické podněty, které přispěly ke zpracování této diplomové práce.

Návrh inovace technologické linky pro zpracování plastů z OEEZ

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá návrhem inovace technologické linky pro zpracování plastových frakcí z odpadních elektrických a elektronických zařízení. Cílem práce je navrhnout začlenění fluidní separace do přímé návaznosti linky, odstranit tím potřebu mezioperační dopravy materiálu a ověřit vliv této změny na výtěžnost sledovaných kovových složek.

Teoretická část shrnuje legislativní a technologická východiska zpracování OEEZ. Praktická část je zaměřena na analýzu stávajícího provozu, návrh technického řešení inovace, jeho laboratorní ověření a ekonomické zhodnocení.

Výsledky laboratorního měření ukázaly, že po začlenění fluidní separace do přímé návaznosti na linku zůstala separační účinnost zařízení zachována. Hlavní přínos inovace spočívá ve snížení provozní náročnosti odstraněním mezioperační dopravy, omezením potřeby pracovní síly a využití manipulační techniky. Práce potvrzuje, že navržená inovace představuje technicky funkční a ekonomicky účelné řešení pro zefektivnění zpracování plastových frakcí z OEEZ.

Klíčová slova: OEEZ, elektroodpad, plastové frakce, mechanická recyklace, třídění

Proposal for innovation of a technological line for processing plastics from WEEE

Abstract

This master's thesis deals with the proposed innovation of a technological line for processing plastic fractions from waste electrical and electronic equipment. The aim of the thesis is to propose the integration of fluid separation directly into the line, thereby eliminating the need for inter-operational material transport, and to verify the effect of this change on the recovery of the monitored metal components.

The theoretical part summarizes the legislative and technological background of WEEE processing. The practical part focuses on the analysis of the current operation, the design of the technical solution for the innovation, its laboratory verification, and its economic evaluation.

The results of the laboratory measurements showed that after integrating the fluid separation directly into the line, the separation efficiency of the equipment remained preserved. The main benefit of the innovation lies in reducing operational demands by eliminating inter-operational material transport and reducing the need for labour and handling equipment. The thesis confirms that the proposed innovation represents a technically functional and economically efficient solution for improving the processing of plastic fractions from WEEE.

Keywords: WEEE, e-waste, plastic fractions, mechanical recycling, separation

Obsah

1 Úvod 11

2 Cíl práce a metodika 12

2.1 Cíl práce 12

2.2 Metodika 12

3 Teoretická východiska 13

3.1 Legislativní rámec 13

3.1.1 Legislativní předpisy EU 13

3.1.2 Legislativní předpisy ČR 15

3.2 Základní pojmy 17

3.2.1 Odpadní elektrická a elektronická zařízení 18

3.2.2 Rozdělení elektrozařízení do kategorií 18

3.2.3 Charakteristika OEEZ a jejich materiálové složení 19

3.3 Systém sběru odpadních elektrozařízení v ČR 20

3.4 Technologie zpracování elektroodpadu 23

3.4.1 Základní kroky zpracování OEEZ 23

3.4.2 Demontáž 25

3.4.3 Mechanická recyklace OEEZ 26

3.4.4 Zmenšování velikosti 27

3.4.5 Velikostní třídění 29

3.4.6 Magnetická a elektrická separace 29

4 Výchozí podmínky řešení 32

4.1 Charakteristika podniku a provozu 32

4.2 Popis stávající technologické linky 32

4.2.1 Linka mletí „jemných plastů“ a její úloha v recyklačním řetězci 32

4.2.2 Detailní popis stávající technologické linky 33

4.2.3 Identifikace provozního problému a omezení stávajícího řešení 36

5 Návrh inovace technologické linky 38

5.1 Cíl návrhu 38

5.2 Popis separačního zařízení 39

5.3 Návrh technického řešení 42

5.3.1 Dispoziční a prostorové řešení navrhované inovace 42

5.3.2 Volba vhodného typu dopravníku 44

5.3.3 Teoretický výpočet šnekového dopravníku 45

5.3.4 Filtrační jednotka a potrubní napojení 47

5.3.5 Elektro napojení a úprava řídicího systému 50

6 Posouzení vlivu inovace na výtěžnost kovů 51
6.1 Cíl laboratorního měření 51
6.2 Popis měření 51

7 Ekonomické zhodnocení realizované inovace 58
7.1 Roční úspory dosažené odstraněním mezioperační dopravy 58
7.2 Investiční náklady na realizaci inovace 60
7.3 Prostá doba návratnosti investice 61

8 Závěr 61

9 Seznam použitých zdrojů 63

10 Seznam obrázků a tabulek 66
10.1 Seznam obrázků 66
10.2 Seznam tabulek 66

1 Úvod

V posledních deseti letech došlo v České republice k přibližně dvojnásobnému nárůstu množství elektrozařízení uváděných na trh a dosavadní vývoj zároveň naznačuje, že tento trend bude pokračovat i v dalších letech. Tato skutečnost se přímo promítá i do nárůstu objemu odpadních elektrických a elektronických zařízení. Elektroodpad představuje specifický odpadový tok s vysokou materiálovou hodnotou, protože obsahuje železné i neželezné kovy, plasty a další využitelné složky. Současně však může obsahovat také nebezpečné látky a komponenty, které vyžadují odpovídající způsob zpracování. Z uvedených důvodů patří zpracování OEEZ mezi významné oblasti současného odpadového hospodářství a oběhového hospodářství.

Zpracování elektroodpadu je technologicky náročné především kvůli jeho nehomogennímu složení a proměnlivým fyzikálním vlastnostem jednotlivých materiálových složek. Obtížnost procesu také zvyšuje nutnost předběžného odstranění nebezpečných komponent, variabilní míra uvolnění jednotlivých materiálových složek po mechanické úpravě a vznik prachových frakcí, v nichž mohou vznikat ztráty cenných kovů.

V průmyslové praxi se proto klade stále větší důraz na modernizaci technologií a optimalizaci procesů zpracování elektroodpadu, aby bylo možné efektivně využít jeho materiálový potenciál a zároveň minimalizovat environmentální rizika. Pokročilé třídicí linky, automatizované demontážní systémy a nejmodernější separační metody umožňují dosahovat vyšší výtěžnosti cenných surovin a snižovat ztráty vznikající během úpravy. Současně se rozvíjí i spolupráce mezi výrobci, zpracovateli a kolektivními systémy, která podporuje zavádění inovací a zvyšuje celkovou úroveň recyklační infrastruktury.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem diplomové práce je navrhnout inovaci technologické linky pro zpracování plastových frakcí z odpadních elektrických a elektronických zařízení. Pro naplnění tohoto cíle bude provedena analýza stávajícího stavu, zpracován návrh technického řešení inovace, experimentálně ověřen její vliv na výtěžnost sledovaných kovových složek a posouzen ekonomický přínos navrženého řešení.

2.2 Metodika

Pro naplnění cíle diplomové práce byla zvolena metodika zahrnující tyto kroky:

- charakteristika problematiky odpadních elektrických a elektronických zařízení v oblasti odpadového hospodářství,
- shrnutí legislativních a technologických východisek problematiky OEEZ,
- analýza stávajícího provozního uspořádání posuzované technologické linky,
- identifikace hlavních provozních omezení stávajícího řešení,
- návrh technického řešení inovace technologické linky,
- laboratorní ověření vlivu navržené změny na výtěžnost sledovaných kovových složek,
- ekonomické zhodnocení navrženého řešení.

3 Teoretická východiska

3.1 Legislativní rámec

V České republice se právní úprava odpadového hospodářství postupně vyvíjela od počátku 90. let, přičemž významným mezníkem byla harmonizace národní legislativy s právem Evropské unie po vstupu České republiky do EU dne 1. května 2004. V současnosti je nakládání s odpady upraveno zejména zákonem č. 541/2020 Sb., o odpadech, a v oblasti odpadních elektrických a elektronických zařízení také příslušnými předpisy vycházejícími z právního rámce Evropské unie, zejména ze směrnice 2012/19/EU o OEEZ. **[1]** Následující část proto shrnuje právní předpisy upravující zpětný odběr, zpracování a materiálové využití OEEZ.

3.1.1 Legislativní předpisy EU

Rámcová směrnice o odpadech (2008/98/ES):

Směrnice 2008/98/ES vymezuje rámec odpadového hospodářství EU: stanoví základní pojmy, hierarchii nakládání (prevence → příprava k opětovnému použití → recyklace → jiné využití → odstranění), princip „znečišťovatel platí“ a zakotvuje rozšířenou odpovědnost výrobce. Upravuje rozlišení odpadu a vedlejšího produktu a podmínky „konce odpadu“, požaduje oddělený sběr, plány a programy prevence, povolení a dohled nad zařízeními a nakládání s odpady způsobem neohrožujícím zdraví lidí ani životní prostředí.

Směrnice obsahuje zvláštní ustanovení týkající se nakládání s nebezpečnými odpady, odpadními oleji a bioodpadem a současně stanoví závazné cíle pro přípravu k opětovnému použití a recyklaci vybraných toků odpadů. Tyto cíle byly významně zpřísněny v návaznosti na legislativní změny přijaté v rámci balíčku pro oběhové hospodářství. Konsolidované znění k 16. 10. 2025 zahrnuje veškeré dosud účinné novelizace a představuje aktuální právní rámec dané úpravy. **[2]**

Směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů a její novely (EU) 2018/850 a (EU) 2024/1785

Směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů definuje technické a provozní standardy pro provoz skládek včetně členění podle přijímaných odpadů (nebezpečné, ostatní, inertní), kritérií přijatelnosti a povinnosti předběžné úpravy odpadu tak, aby se minimalizovaly dopady na vodu, půdu, ovzduší i veřejné zdraví. Zároveň zakazuje ukládání odděleně

sbíraných odpadů určených k přípravě k opětovnému použití nebo k recyklaci, s výjimkou zbytků po jejich zpracování, u nichž skládkování představuje nejlepší celkové environmentální řešení.

Novela (EU) 2018/850 stanovila na národní úrovni závazný cíl snížit do roku 2035 podíl komunálního odpadu ukládaného na skládky na nejvýše 10 % a od roku 2030 ukládá členským státům povinnost usilovat o zajištění, aby nebyl na skládky přijímán odpad vhodný k recyklaci či jinému využití.

V roce 2024 byla přijata novela (EU) 2024/1785, která propojila režim skládek s rámcem průmyslových emisí (IED) a umožnila přijetí závěrů o nejlepších dostupných technikách (BAT) pro skládky. Cílem je systematicky omezovat hlavní environmentální dopady skládek, zejména emise metanu, prostřednictvím promítnutí závěrů o BAT do povolovacích podmínek. **[3]**

Směrnice 2012/19/EU o odpadech z elektrických a elektronických zařízení (OEEZ):

Směrnice 2012/19/EU vymezuje rámec nakládání s odpadními elektrickými a elektronickými zařízeními v EU: stanoví předmět a rozsah působnosti a konkretizuje rozšířenou odpovědnost výrobce prostřednictvím povinnosti zajistit a financovat systémy odděleného sběru, zpracování a využití odpadu, včetně stanovení minimálních cílů sběru a cílů pro přípravu k opětovnému použití, využití a recyklaci.
Současně stanoví požadavky na registraci výrobců a reporting, poskytování informací zpracovatelským zařízením a označování elektrických a elektronických zařízení symbolem přeškrtnutého kontejneru.

„Správné zpracování“ vyžaduje minimálně odčerpání všech kapalin a selektivní odstranění vybraných komponent a materiálů podle přílohy VII (např. baterie, součásti s PCB/rtutí, chladiva, desky plošných spojů, plasty s brómovanými zpomalovači hoření).

Cílem směrnice je snížit negativní dopady na lidské zdraví a životní prostředí a současně zlepšit efektivitu využívání zdrojů. V praxi to klade důraz na kvalitativní třídění a sledovatelnost toků tak, aby výstupní frakce splňovaly parametry pro další materiálové využití. **[4]**

Směrnice 2011/65/EU o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních:

Stanovuje látková omezení pro elektrická a elektronická zařízení uváděná na trh EU: v homogenním materiálu nesmí být překročeny maximální hmotnostní koncentrace 0,1 % pro olovo, rtuť, šestimocný chrom, polybromované bifenyly (PBB), polybromované difenylétery (PBDE) a ftaláty DEHP, BBP, DBP, DIBP, a 0,01 % pro kadmium. Současně vymezuje povinnosti hospodářských subjektů (výrobce, dovozce, distributor) v oblasti posouzení shody, technické dokumentace, EU prohlášení o shodě a označení CE a zavádí režim časově omezených a pravidelně přezkoumávaných výjimek pro specifická použití. **[5]**

3.1.2 Legislativní předpisy ČR

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech:

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech, představuje základní právní předpis upravující odpadové hospodářství v České republice. Tento zákon vymezuje pravidla pro předcházení vzniku odpadů a pro nakládání s odpady a současně reflektuje požadavky právního rámce Evropské unie v oblasti odpadového a oběhového hospodářství. Součástí zákona je rovněž hierarchie odpadového hospodářství, v níž má prioritu předcházení vzniku odpadu, po něm následuje příprava k opětovnému použití, recyklace, jiné využití, včetně energetického využití, a až v poslední řádě odstranění. **[6]**

Ve vztahu k elektroodpadu se zákon o odpadech uplatní především jako obecný režim pro nakládání s odpadem: ukládá povinnost předávat odpady pouze oprávněným osobám, vést průběžnou evidenci a splnit podmínky pro provoz zpracovatelských zařízení; zároveň odkazuje na prováděcí úpravu Katalogu odpadů (vyhl. č. 8/2021 Sb.) pro správné zařazení frakcí a na vyhlášku č. 273/2021 Sb. pro detaily evidence, ohlašování, provozu sběrných míst a dalších procesních požadavků. **[6]**

Specifické povinnosti vyplývající z rozšířené odpovědnosti výrobců elektrozařízení, organizace sběru a minimálních cílů využití OEEZ jsou řešeny samostatně zákonem č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností, který je vůči zákonu č. 541/2020 Sb. zvláštní předpis.

Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností:

Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností, představuje český rámec rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR) pro vybrané výrobkové toky, včetně elektrických

a elektronických zařízení (EEE). Upravuje povinnosti hospodářských subjektů, zejména výrobců, posledních prodejců a distributorů, v oblasti registrace, zajištění a financování zpětného odběru, jakož i plnění souvisejících informačních, evidenčních a ohlašovacích povinností. Zároveň vymezuje role kolektivních systémů a pravidla financování nakládání s výrobky po skončení jejich životnosti včetně návaznosti na obecnou úpravu nakládání s odpady.

V oblasti odpadních elektrozařízení (OEEZ) zákon stanoví mimo jiné minimální úrovně využití a recyklace pro jednotlivé skupiny zařízení (příloha č. 3), a to v členění na „využití celkem“ a „recyklaci a přípravu k opětovnému použití“. Tyto úrovně se uplatňují při hodnocení plnění povinností výrobce, resp. kolektivního systému.

Pro zpracovatele OEEZ zákon zavádí specifické požadavky na odborné a provozní zajištění činnosti a navazující ověřování splnění vybraných požadavků prostřednictvím nezávislé odborně způsobilé třetí osoby v režimu akreditačních pravidel. Podrobnosti systému (např. organizace zpětného odběru, logistika, skladování, podmínky přeshraniční přepravy použitých EEE a související technické požadavky včetně odkazu na technické normy) rozpracovává prováděcí vyhláška č. 16/2022 Sb. v platném znění.

Celkově zákon č. 542/2020 Sb. propojuje povinnosti výrobců, kolektivních systémů i zpracovatelů, stanoví výkonové parametry nakládání s OEEZ a vytváří rámec pro sledovatelnost toků a financování zpětného odběru a zpracování v národní praxi. **[7]**

Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů:

Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů) je prováděcím předpisem k zákonu č. 541/2020 Sb., který stanoví závazný postup pro zařazování odpadu ke konkrétnímu druhu odpadu a jeho kategorii (nebezpečný / ostatní). Katalog je uveden v příloze vyhlášky a pracuje se šestimístnými katalogovými čísly (první dvojčíslí = skupina, druhé = podskupina, třetí = druh odpadu). V některých případech jsou používána i osmimístná čísla pro poddruhy.

Nebezpečné odpady jsou v katalogu označeny symbolem „*“.

V oblasti elektroodpadu má vyhláška praktický význam zejména pro správné zařazení jednotlivých výstupních frakcí a složek (např. směsi plastů, kovy, prachové/jemné frakce, kabeláž, baterie apod.) do příslušných katalogových čísel. Toto zařazení je následně zásadní pro průběžnou evidenci, ohlašování a předávání odpadu oprávněným osobám a tvoří základ pro jednotnou interpretaci toků odpadů v praxi i v informačních systémech

odpadového hospodářství. Vyhláška byla vydána Ministerstvem životního prostředí a nabyla účinnosti 27. 1. 2021. **[8]**

3.2 Základní pojmy

Pro popis toků OEEZ a navazujících procesů v této práci je vhodné nejprve vymezit základní pojmosloví podle české a evropské právní úpravy odpadového hospodářství.

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech, v § 11 vymezuje následující podstatné pro tuto problematiku pojmy **[6]**:

- **nakládáním s odpadem** se rozumí soustřeďování odpadu, shromažďování odpadu, skladování odpadu, sběr odpadu, úprava odpadu, využití odpadu, odstranění odpadu, obchodování s odpadem nebo přeprava odpadu,
- **sběrem odpadu** se rozumí soustřeďování odpadů právnickou osobou nebo podnikající fyzickou osobou od jiných osob pro účely předání do zařízení ke zpracování odpadu, pokud uložení odpadu v zařízení ke sběru odpadů nepřesáhne dobu 9 měsíců,
- **zpracováním odpadu** se rozumí využití odpadu nebo odstranění odpadu zahrnující i úpravu před jeho využitím nebo odstraněním,
- **recyklací odpadu** se rozumí způsob využití odpadu, jímž je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo pro jiné účely; recyklace odpadu zahrnuje přepracování organických materiálů, ale nezahrnuje energetické využití a přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo nebo jako zásypový materiál.

Dále podle § 3 odst.1 téhož zákona:

- **Odpadové hospodářství** – činnost zaměřená na předcházení vzniku odpadu, na nakládání s odpadem, na následnou péči o místo, kde je odpad trvale uložen, zprostředkování nakládání s odpady a kontrola těchto činností.

Podle § 4 odst. 1:

- **Odpad** – každá movitá věc, které se osoba zbavuje, má úmysl nebo povinnost se jí zbavit.

3.2.1 Odpadní elektrická a elektronická zařízení

Podle směrnice 2012/19/EU **[4]**:

„**Elektrickým a elektronickým zařízením**“ nebo „EEZ“ se rozumí zařízení, jehož správná funkce závisí na elektrickém proudu nebo na elektromagnetickém poli, a zařízení k výrobě, přenosu a měření tohoto proudu a pole, které je určeno pro použití s napětím nepřesahujícím 1 000 V pro střídavý proud a 1 500 V pro stejnosměrný proud.

„**Odpadním elektrickým a elektronickým zařízením**“ nebo „OEEZ“ se rozumí elektrické a elektronické zařízení, které je odpadem ve smyslu čl. 3 bodu 1 směrnice 2008/98/ES, včetně všech konstrukčních částí, podsestav a spotřebních materiálů, které jsou součástí výrobku v době jeho vyřazení.

Český zákon č. 542/2020 Sb. pojmy EEZ a OEEZ definuje shodně s evropskou směrnici a doplňuje také pojem odpadní elektrozařízení pocházející z domácností.

3.2.2 Rozdělení elektrozařízení do kategorií

Od 15. 8. 2018 se v EU uplatňuje otevřený rozsah a elektrozařízení se pro účely OEEZ třídí do šesti kategorií podle přílohy III směrnice 2012/19/EU. **[4]**

Český zákon č. 542/2020 Sb. používá stejné členění ve formě šesti skupin elektrozařízení v příloze č. 1 **[7]:**

Skupiny elektrozařízení

1. Zařízení pro tepelnou výměnu

2. Obrazovky, monitory a zařízení obsahující obrazovky o ploše větší než 100 cm^2

3. Světelné zdroje

4. Velká zařízení, jejichž kterýkoli vnější rozměr přesahuje 50 cm, kromě zařízení náležejících do skupin 1, 2 a 3

5. Malá zařízení, jejichž žádný vnější rozměr nepřesahuje 50 cm, kromě zařízení náležejících do skupin 1, 2, 3 a 6

6. Malá zařízení informačních technologií a telekomunikační zařízení, jejichž žádný vnější rozměr nepřesahuje 50 cm

3.2.3 Charakteristika OEEZ a jejich materiálové složení

OEEZ představují materiálově velmi heterogenní skupinu odpadů tvořenou různorodými součástmi, materiály a konstrukčními prvky, což se přímo promítá do volby způsobu jejich zpracování. Ve své skladbě zahrnují zejména železné a neželezné kovy, plasty a sklo, s menším zastoupením ostatních materiálů. Současně se jednotlivé typy elektrozařízení liší velikostí, hmotností, konstrukčním řešením i mírou rozložitelnosti na jednotlivé části. Tato skutečnost zvyšuje nároky na volbu vhodné kombinace demontáže, mechanické úpravy a navazujících separačních operací.

Z hlediska recyklace je také podstatné, že zařízení obsahují nejen využitelné materiálové složky, zejména kovy a plasty, ale také nebezpečné látky a komponenty, které musí být před dalším zpracováním odstraněny. Pro další využití vznikajících frakcí je přitom rozhodující jejich čistota a omezení vzájemné kontaminace jednotlivých materiálových podílů.

Tabulka 1 Hlavní materiály obsažené v OEEZ

Materiál	Zastoupení [%]
Železné kovy	38
Neželezné kovy	28
Plasty	19
Sklo	4
Dřevo	1
Ostatní	10

Zdroj: vlastní zpracování podle **[12, s. 246]**

Tato diplomová práce se zabývá inovací technologické linky v závodě společnosti Enviropol v Jihlavě, jenž poskytl zázemí pro praktickou část řešení. Předmětná linka slouží ke zpracování odpadních elektrických a elektronických zařízení zařazených do skupiny 5, tedy malých zařízení, u nichž žádný z vnějších rozměrů nepřesahuje 50 cm.

Do této skupiny patří zejména drobné domácí spotřebiče a běžně užívaná elektrická zařízení, například vysavače, žehličky, topinkovače, rychlovarné konvice, mikrovlnné trouby, elektrické holicí strojky, rádia, videokamery, drobné elektrické nářadí, hračky a další obdobná zařízení. **[4]**

Podle experimentální materiálové analýzy vybraných malých domácích elektrospotřebičů uvedené ve studii **[13]** bylo zjištěno, že materiálové složení těchto zařízení je značně různorodé. Při této analýze byly jednotlivé výrobky demontovány a jejich komponenty následně roztříděny a zváženy podle materiálových frakcí. Výsledky ukazují, že složení těchto zařízení je značně různorodé, přičemž největší podíl obvykle tvoří plasty a elektrické či elektronické součástky. Plasty představují v průměru 41,1 % hm. a elektrické a elektronické komponenty 39,1 % hm. z celkové hmotnosti analyzovaných zařízení. Mezi nejčastěji zastoupené plasty patří zejména PP a ABS, které se používají hlavně pro kryty a konstrukční části výrobků. Z elektrických a elektronických součástek se nejčastěji vyskytují kabely, zástrčky a desky plošných spojů. Uvedené výsledky naznačují, že právě vysoké zastoupení plastových a elektrických částí významně ovlivňuje navazující zpracování i možnosti recyklace této skupiny OEEZ. **[13]**

Z hlediska materiálového využití představují nejvýznamnější a zároveň ekonomicky nejcennější složku elektroodpadu kovy. V proudu OEEZ se vyskytují jak kovy železné, tak neželezné, přičemž zejména měď, zlato a železo patří mezi materiály s vysokou návratností investic při jejich zpětném získávání. Tyto kovy mají význam nejen z ekonomického hlediska, ale také z hlediska environmentálního, protože jejich recyklace umožňuje snížit potřebu primární těžby a s ní spojené dopady na životní prostředí. Významným zdrojem kovů v elektroodpadu jsou především desky plošných spojů (PCB), které jsou součástí téměř všech elektronických zařízení. Díky svému kvalitativnímu i kvantitativnímu kovovému složení představují PCB jednu z nejbohatších sekundárních surovin v rámci elektroodpadu. Získávání kovů z těchto komponent je technologicky náročné, avšak jejich recyklace může významně přispět k zajištění dodavatelských řetězců strategických kovů a současně ke snížení environmentálních dopadů spojených s jejich těžbou z primárních ložisek. **[14]**

3.3 Systém sběru odpadních elektrozařízení v ČR

Systém sběru OEEZ v České republice je založen na kombinaci rozšířené odpovědnosti výrobce (EPR) a veřejně dostupné sběrné infrastruktury. Ta je tvořena

zejména obecními sběrnými dvory a místy zpětného odběru zajišťovanými distributory a prodejci elektrozařízení.

EPR je systémový nástroj odpadové politiky, který rozšiřuje odpovědnost výrobce za výrobek i na období po skončení jeho používání. Výrobce tak nenese odpovědnost pouze při uvádění výrobku na trh, ale podílí se i na zajištění a financování sběru, zpracování a dalšího nakládání s odpadem z daného výrobku. Přístup navazuje na princip „znečišťovatel platí“ a v praxi se v České republice dlouhodobě uplatňuje u vybraných výrobkových toků, mezi něž patří také elektrická a elektronická zařízení. Smyslem EPR je snížit negativní environmentální dopady výrobků po skončení životnosti a současně vytvořit ekonomické motivace pro návrh výrobků s delší životností a lepší recyklovatelností**. [9]**

Převážná většina výrobců elektrozařízení v praxi zajišťuje plnění svých povinností prostřednictvím kolektivních systémů. Individuální způsob plnění těchto povinností byl v roce 2023 evidován pouze u 34 výrobců z 6 398. **[10]**

Mezi oprávněné kolektivní systémy v ČR patří: ASEKOL a.s., ELEKTROWIN a.s., EKOLAMP s.r.o., REMA Systém, a.s. a RETELA, s.r.o. Tyto subjekty zajišťují organizaci sběrné sítě, logistiku svozu, předání elektroodpadu ke zpracování a recyklaci, zároveň vedou evidenci a zajišťují reporting údajů vůči MŽP. Výkon této činnosti je podmíněn udělením oprávnění MŽP. **[11]**

V roce 2023 zaujímaly z hlediska podílu na celkovém množství zpětně odebraných elektrozařízení a odděleně sebraných elektroodpadů dominantní postavení společnosti ELEKTROWIN a.s. s podílem 35 %, ASEKOL a.s. s podílem 34 % a REMA Systém, a.s. s podílem 16 %. **[10]**

Srovnání let 2010, 2020 a 2023 podle tabulky 2 ukazuje výraznou proměnu českého trhu s elektrozařízeními i systému nakládání s OEEZ. Zatímco v roce 2010 bylo na trh uvedeno 166 063 tuny elektrozařízení, o deset let později tato hodnota vzrostla na 263 202 tuny a podle posledních dostupných údajů za rok 2023 již dosáhla 318 359 tun. Lze tedy konstatovat, že mezi lety 2010 a 2023 došlo k téměř dvojnásobnému nárůstu množství elektrozařízení uváděných na trh.

Pozitivním zjištěním však je, že se ve stejném období výrazně zvýšila také úroveň zpětného odběru a odděleného sběru elektroodpadů, a to z 31,9 % na 61,7 %. Také v tomto případě se tedy jedná o téměř dvojnásobný nárůst.

Z údajů uvedených v tabulce 2 je dále patrné, že množství elektrozařízení získaných prostřednictvím zpětného odběru je ve všech sledovaných letech vyšší než množství elektroodpadů pocházejících z odděleného sběru. Tuto skutečnost lze vysvětlit zejména tím, že zpětný odběr představuje v České republice základní mechanismus přebírání odpadních elektrozařízení pocházejících z domácností. Je zajišťován výrobcem financovanou sítí míst zpětného odběru a je přímo navázán na plnění povinností v systému rozšířené odpovědnosti výrobce. Oddělený sběr se naproti tomu uplatňuje zejména u elektroodpadu nepocházejícího z domácností, především u zařízení určených výhradně k profesionálnímu použití. Jeho objem je proto ve sledovaných letech nižší než objem elektrozařízení získaných prostřednictvím zpětného odběru.

Tabulka 2 Množství elektrozařízení uvedených na trh a výsledky zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadů ve vybraných letech

Ohlašovací období	Celkové množství uvedené na trh [t]	Zpětný odběr elektrozařízení [t]	Oddělený sběr [t]	Celkem [t]	Úroveň zpětného odběru a odděleného sběru elektroodpadů [%]
2006	196 967	21 138	1 032	22 170	11,3
2010	166 063	52 119	870	52 989	31,9
2015	182 025	71 395	2 893	74 288	40,8
2018	196 918	83 142	9 941	93 083	51,1
2019	236 297	89 338	11 981	101 319	54,2
2020	263 202	98 498	19 817	118 316	57,0
2021	301 537	105 935	27 486	133 421	57,5
2022	321 888	99 019	53 054	152 073	57,0
2023	318 359	140 812	41 605	182 417	61,7

Zdroj: vlastní zpracování podle **[10, s. 3]**

3.4 Technologie zpracování elektroodpadu

Recyklaci elektroodpadu lze obecně členit do tří základních etap, jimiž jsou sběr, demontáž a předzpracování a následné konečné zpracování zaměřené na získání využitelných cenných složek. Z environmentálního hlediska je při recyklaci podstatné omezit negativní dopady nebezpečných složek elektroodpadu a zajistit materiálové využití způsobem šetrným k životnímu prostředí. Z ekonomického hlediska je cílem efektivní získávání hodnotných materiálů a využitelných materiálových frakcí. **[14]**

Pro návrh a hodnocení technologické linky je nezbytné porozumět tomu, jak jednotlivé operace ovlivňují liberaci materiálů, tedy uvolnění kovů, plastů, skla a dalších složek z kompozitních celků, dále granulometrii materiálu **[12]**, kontaminaci cílových frakcí **[15]** a výslednou separovatelnost v navazujících fyzikálních metodách separace materiálu.

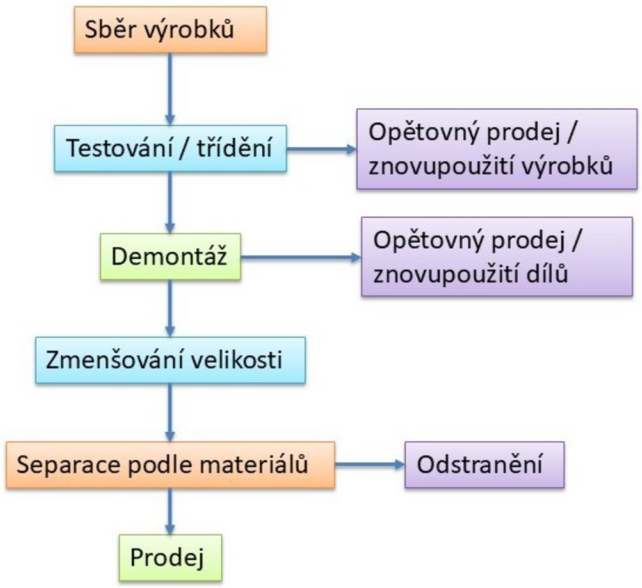
Z uvedeného vyplývá, že účinnost zpracování OEEZ je dána nejen vlastnostmi vstupního materiálu, ale také vhodnou volbou a uspořádáním jednotlivých technologických operací. Následující text se proto zaměřuje na základní kroky zpracování elektroodpadu a na principy mechanické recyklace využívané v současné praxi.

3.4.1 Základní kroky zpracování OEEZ

V počáteční fázi zpracování elektroodpadu se zpravidla provádí demontáž vybraných částí, zaměřená především na odstranění nebezpečných a separaci hodnotných komponent. Následuje mechanické zmenšení velikosti, jehož účelem je dosažení dostatečné liberace materiálů. Na tento krok navazuje třídění a vlastní separace, při nichž jsou materiály rozdělovány podle svých fyzikálních vlastností, například podle velikosti, magnetických vlastností, elektrické vodivosti nebo hustoty.

Přehled typických kroků mechanického zpracování OEEZ je uveden níže na obrázku 1 a v tabulce 3:

Obrázek 1 Schéma procesu recyklace elektroodpadu



Zdroj: přeloženo a upraveno podle **[18]**

Tabulka 3 Základní kroky mechanického zpracování OEEZ

Krok procesu	Primární účel
1. Demontáž (selektivní rozebrání)	Odstranění nebezpečných částí a vytřídění hodnotných komponent
2. Drcení / rozmělnění	Liberace materiálů a dosažení cílené velikosti částic
3. Třídění (klasifikace)	Rozdělení směsi podle velikosti, případně tvaru
4. Separace materiálů	Oddělení podle fyzikálních vlastností (magnetismus, vodivost, hustota, optické spektrum)

Zdroj: vlastní zpracování podle **[12,16]**

3.4.2 Demontáž

Demontáž a předúprava představují první technologickou fázi zpracování OEEZ, která zásadním způsobem ovlivňuje bezpečnost navazujících operací i kvalitu získaných materiálových frakcí.

Oproti finálním technologiím je tato etapa zpravidla méně kapitálově i technologicky náročná, protože je založena především na ruční práci nebo na použití jednodušších a ekonomicky méně nákladných zařízení. Současně může přispívat i k vytváření pracovních příležitostí. Při manuálním předzpracování je však nezbytné zajistit odpovídající ochranu pracovníků prostřednictvím osobních ochranných pracovních prostředků. K základnímu vybavení patří zejména respirátor nebo polomaska s filtry s aktivním uhlím a ochrana zraku, například ochranné brýle. Tím se snižuje riziko expozice anorganickým parám rtuti, které se mohou uvolňovat například při zpracování LCD panelů nebo zářivek. Vedle ochrany dýchacích cest je vhodné používat také rukavice odolné proti proříznutí, které umožňují bezpečnou manipulaci i práci s nástroji bez výrazného omezení zručnosti. Dále se doporučuje bezpečnostní obuv s ocelovou špičkou a pracovní oděv zakrývající celé tělo, který chrání před poraněním i znečištěním při manipulaci s odpadem. **[16]**

Demontáž představuje systematický proces rozebrání výrobku, jehož cílem je oddělit nebezpečné složky, vyjmout součásti vhodné k opětovnému použití a současně vyčlenit hodnotné komponenty a materiály, které lze dále zpracovávat s vyšší účinností. **[12]**

V praxi se typicky uplatňuje ruční nebo poloautomatická demontáž zaměřená na odstranění nebezpečných součástí, například inkoustových kazet, kondenzátorů s obsahem polychlorovaných bifenylů, přepínačů obsahujících rtuť a baterií typu NiCd, NiMH, Li-ion nebo Li-polymer, a zároveň na vyjmutí cenných či znovupoužitelných komponent, jako jsou pevné disky a desky plošných spojů, kusová měď. **[14]**

Vedle ruční demontáže se v současnosti jako perspektivní směr rozvoje uvádí roboticky asistovaná demontáž založená na spolupráci člověka a kolaborativního robota. Robot může zajišťovat například odšroubování, řezání, uchopení nebo třídění komponent podle jejich typu, zatímco člověk řeší proměnlivost vstupních zařízení a nestandardní situace. Vzhledem k vysoké variabilitě a konstrukční složitosti elektrozařízení však zatím není plně automatizovaná demontáž považována za obecně realizovatelné řešení, a větší význam je proto přikládán hybridním scénářům spolupráce člověka a stroje. Významným

výzkumným tématem v této oblasti zůstává zejména spolehlivá detekce malých komponent, která je pro automatizovanou demontáž OEEZ zásadní. **[17]**

3.4.3 Mechanická recyklace OEEZ

Mechanická recyklace představuje stěžejní fázi zpracování OEEZ, v níž dochází k fyzikálnímu rozrušení heterogenního odpadu a k jeho postupnému rozdělení na jednotlivé materiálové složky. Účelem této fáze je dosažení co nejvyšší míry materiálového využití prostřednictvím operací, jako jsou drcení, třídění a separace. Proces obvykle zahrnuje postupnou liberaci materiálů při zmenšování velikosti částic, navazující velikostní klasifikaci a následné oddělování frakcí podle rozdílů ve fyzikálních vlastnostech.

V praxi se uplatňují zejména **[12], [16]**:

1) drticí jednotky, shredry, mlýny, určené ke zmenšování velikosti materiálu,
2) vibrační a rotační třídicí zařízení pro velikostní klasifikaci,
3) magnetické separátory pro oddělení feromagnetických kovů,
4) separátory využívající princip vířivých proudů pro získání neželezných kovů,
5) vzduchové separátory oddělující materiály podle aerodynamických vlastností,
6) fluidní separátory využívající rozdílů v objemové hmotnosti částic,
7) optické třídicí systémy umožňující rozlišení a separaci plastových frakcí.

Nezbytnou součást technologického řešení současně představují systémy pro filtraci plynných emisí a čištění odpadních vod, jejichž účelem je minimalizace dopadů provozu na životní prostředí. **[16]**

Mezi významné procesní parametry mechanického zpracování patří zejména **[12], [15]**:

1) stupeň liberace materiálů,
2) granulometrie výstupních produktů,
3) čistota získaných frakcí,
4) celková výkonnost technologické linky.

Velikost částic se zpravidla optimalizuje v rozmezí přibližně 5 až 10 mm, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti následné separace. Výkonnost linky se hodnotí především podle kapacity zpracování vyjádřené v tunách za hodinu a podle energetické náročnosti provozu. **[12]**

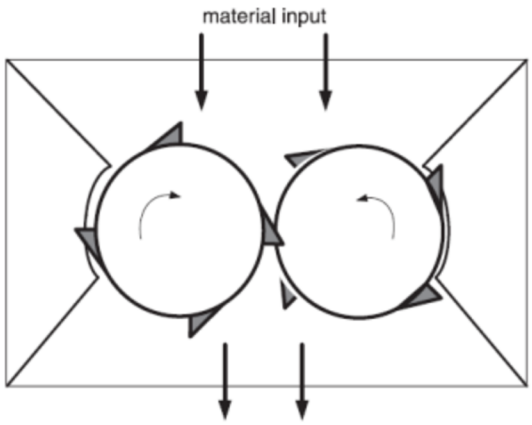
3.4.4 Zmenšování velikosti

Při recyklaci elektroodpadu se zmenšování velikosti materiálu obvykle provádí pomocí shredrů a kladivových mlýnů, přičemž k rozrušení částic dochází působením rázových a střižných sil. Vedle těchto konvenčních metod se v poslední době prosazuje také fragmentace pomocí vysokonapěťových pulzů, která může omezit prašnost procesu a současně umožnit uvolnění materiálových složek již při větší velikosti částic. **[19]**

Schematický přehled drticích zařízení a jejich použití:

a) Rotační nůžky

Obrázek 2 Schéma rotačních nůžek

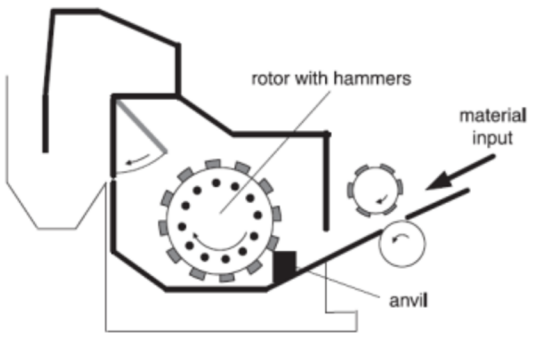


Zdroj: **[16]**

Rotační nůžky se používají k předběžnému drcení, například katodových trubic nebo chladniček. **[16]**

b) Shredry

Obrázek 3 Schéma shredru

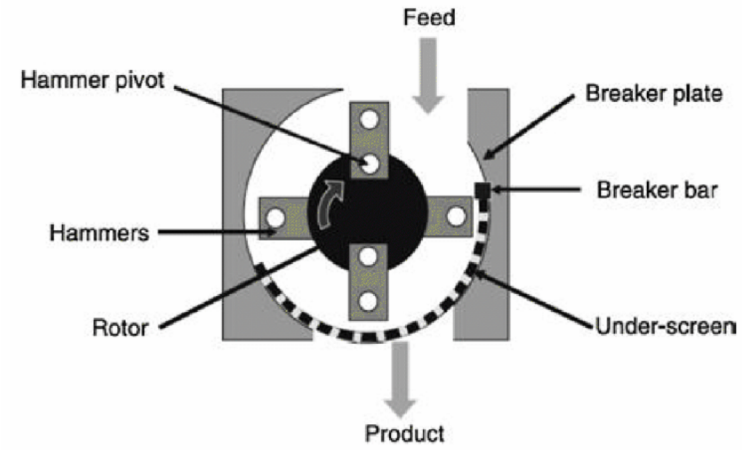


Zdroj: **[16]**

Shredry tvoří obvykle vstupní stupeň zmenšování velikosti při zpracování elektroodpadu. Jejich funkcí je rozdělit materiál na menší části pomocí řezných nožů umístěných na rotujícím hřídeli poháněném elektromotorem. Činnost zařízení je založena zejména na působení střižných a trhacích sil při nízkých otáčkách a vysokém krouticím momentu. **[19]**

c) Kladivové mlýny

Obrázek 4 Schéma kladivového mlýnu

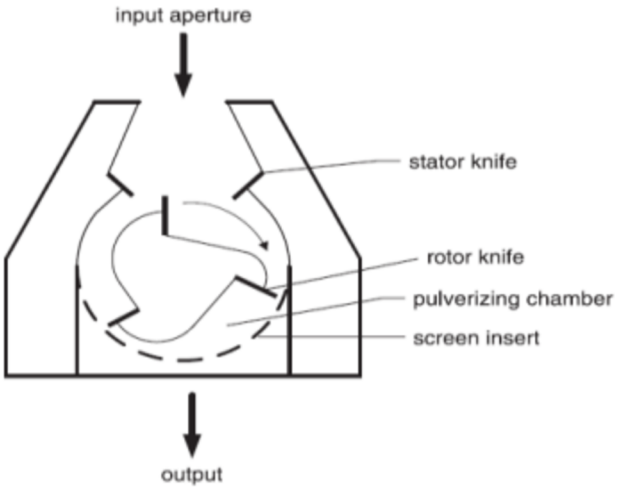


Zdroj: **[20]**

Kladivový mlýn se v recyklačních linkách obvykle používá za shredrem k dalšímu zmenšení velikosti materiálu a k dosažení vyšší míry liberace pro navazující separační procesy. Jeho činnost je založena na působení rázových sil vytvářených rychle rotujícími kladivy, která materiál rozrušují na jemnější částice. Součástí zařízení bývá síto, které zadržuje nedostatečně rozdrcené částice a vrací je k opakovanému namáhání. Pro omezení opotřebení mlýna se před jeho vstup často zařazuje magnetická separace, která odstraňuje feromagnetické složky. Výhodou kladivových mlýnů je zejména vysoká kapacita a relativně jednoduché technologické řešení. **[19]**

d) Nožový mlýn

Obrázek 5 Schéma nožového mlýnu



Zdroj: **[16]**

Nožový mlýn slouží k následnému drcení materiálu, například plastů nebo kabelů. **[16]**

3.4.5 Velikostní třídění

Po fázi drcení je materiál zpravidla podroben velikostní klasifikaci, jejímž účelem je rozdělení vzniklé směsi do frakcí podle rozměru částic. Tento způsob třídění je založen výhradně na rozdílech ve velikosti zrn a nepřihlíží k ostatním vlastnostem materiálu. **[20]**

V provozní praxi se nejčastěji uplatňují vibrační síta s perforovanou prosévací plochou, která mohou být konstruována jako jednoetážová, dvouetážová nebo tříetážová v závislosti na požadovaném způsobu třídění. Rozměr otvorů prosévací plochy se stanovuje podle zvolené dělicí velikosti částic. Zrna větší, než tato hodnota tvoří nadsítnou frakci, která může být vracena k dalšímu drcení, například do kladivového mlýna, zatímco jemnější podíl propadá sítem a postupuje do navazujících technologických operací. Materiál prosévací plochy se volí s ohledem na charakter zpracovávané suroviny, přičemž se používá například pletený drát, polyuretan, pryž nebo korozivzdorná ocel. **[19]**

Na výslednou účinnost má vliv frekvence kmitání, amplituda a směr vibrací, sklon síta a doba zdržení materiálu při třídění. **[20]**

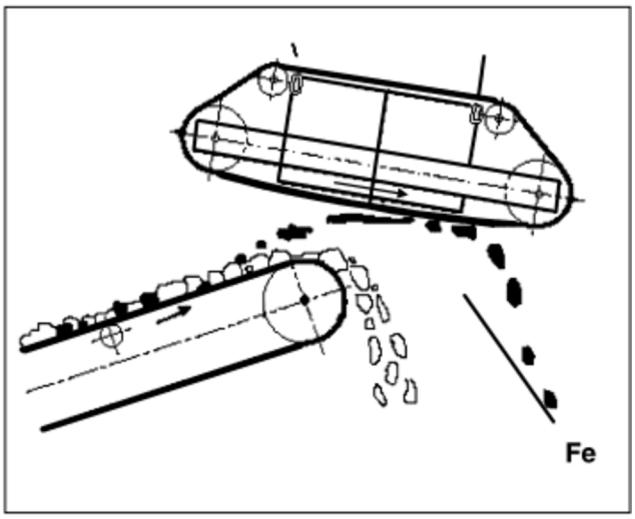
3.4.6 Magnetická a elektrická separace

Významnou součást mechanického zpracování elektroodpadu představují také separační operace využívající rozdílné fyzikální vlastnosti jednotlivých materiálových

složek. V rámci mechanického zpracování OEEZ je vhodné rozlišovat magnetickou separaci od separace založené na elektrických vlastnostech materiálů.

Magnetická separace využívá rozdílné odezvy částic v magnetickém poli a uplatňuje se především při oddělování feromagnetických složek, zejména železných kovů. V praxi jsou k tomuto účelu používány zejména magnetické bubny, unášecí válce a závěsné magnetické separátory, které zachycují feromagnetické částice z dopravovaného materiálového toku. **[12], [21]** Účinnost tohoto způsobu třídění závisí mimo jiné na intenzitě magnetického pole, konstrukci pólů a vzdálenosti materiálu od zdroje pole, přičemž se magnetická síla se vzrůstající vzdáleností snižuje. Z provozního hlediska je proto důležité správné konstrukční řešení zařízení i stabilní napájení elektromagnetů konstantním proudem. **[21]**

Obrázek 6 Magnetický separátor



Zdroj: **[21]**

Naproti tomu elektrická separace je založena na rozdílech v elektrické vodivosti, rezistivitě nebo dielektrických vlastnostech materiálů. Do této skupiny metod patří především separace na principu vířivých proudů, korónová elektrostatická separace a triboelektrická separace. Tyto postupy se používají zejména k oddělování neželezných kovů od nekovových složek nebo k třídění plastových frakcí. **[12]** V případě separace vířivými proudy dochází ve vodivých nemagnetických částicích k indukci vířivých proudů, v důsledku čehož jsou tyto částice odpuzovány a vychylovány z hlavního materiálového

toku. Tento princip se využívá zejména při získávání neželezných kovů z jemně podrcených směsných materiálů, elektronického šrotu nebo strusek. **[12], [21]**

Vedle výše uvedených metod se v mechanickém zpracování OEEZ uplatňují také další separační postupy založené na rozdílech v hustotě, elektrických vlastnostech nebo aerodynamickém chování částic. Tyto metody nacházejí využití zejména při dotřiďování jemnějších a směsných frakcí, u nichž již základní magnetické a velikostní třídění nepostačuje k dosažení požadované čistoty výstupních toků. Významnou roli přitom hraje rovněž zpracování jemných a prachových podílů, v nichž mohou vznikat ztráty cenných materiálů a riziko zvýšené kontaminace frakcí. Účinnost mechanické recyklace proto závisí nejen na použitých typech zařízení, ale také na vhodném uspořádání jednotlivých operací v rámci celé technologické linky.

V této práci nejsou podrobně rozebírány metody, jako jsou hydrometalurgie, pyrometalurgie, elektrometalurgie a biotechnologické postupy, je však vhodné uvést, že i tyto přístupy představují součást technologií využívaných při zpracování elektroodpadu.

4 Výchozí podmínky řešení

4.1 Charakteristika podniku a provozu

Praktická část práce je zpracována na podkladě provozu společnosti ENVIROPOL s. r. o., konkrétně závodu v Jihlavě. Společnost se specializuje na zpracování elektroodpadu a na získávání využitelných materiálových frakcí pro další materiálové využití. Podle oficiálních informací společnosti patří mezi přední zpracovatele elektroodpadu v České republice a současně působí také na trzích Slovenska, Polska a Německa. Technologicky vyspělé zpracování společnosti podle jejích údajů umožňuje materiálově využít až 95 % zpracovaného elektroodpadu. **[22]**

Předmětem praktické části této diplomové práce je hlavní, z hlediska kapacity nejvýznamnější technologická linka jihlavského závodu určená ke zpracování OEEZ. Vstupním materiálem této části provozu je elektroodpad odpovídající kategorii 5 podle aktuálního členění směrnice WEEE, tedy malá zařízení, u nichž žádný vnější rozměr nepřesahuje 50 cm. Technologie kombinuje mechanické drcení a mletí s navazujícími separačními operacemi. V provozu jsou využívány zejména drtiče a mlýny, magnetické separátory, separátory pracující na principu vířivých proudů, optické třídicí systémy a specializované linky určené ke zpracování plastových frakcí. Tato technologická skladba umožňuje získávat z elektroodpadu železné a neželezné kovy, plasty a další materiálově využitelné složky.

4.2 Popis stávající technologické linky

4.2.1 Linka mletí „jemných plastů“ a její úloha v recyklačním řetězci

Linka mletí „jemných plastů“ (MJP) představuje navazující technologický stupeň recyklačního řetězce zpracování elektroodpadu, zařazený do závěrečné, samostatně provozované části mechanické úpravy materiálu. Na tuto linku vstupuje plastová frakce oddělená v předchozích stupních zpracování od kovových a dalších materiálových složek, jako je sklo, textil, keramika a další.

Účelem linky MJP je úprava plastové frakce na definované jemné výstupní podíly s požadovanými kvalitativními parametry pro následné obchodní uplatnění. Současně tato technologie umožňuje zachytit zbytkové kovové částice, které ve vstupní plastové frakci

zůstaly i po předchozích stupních zpracování. Tím linka přispívá jak k materiálovému zhodnocení plastu, tak k maximalizaci výtěžnosti druhotných kovonosných složek.

Z technologického hlediska je linka MJP koncipována jako offline linka, tj. pracuje odděleně od hlavního kontinuálního výrobního toku závodu. Základní technologickou sestavu linky tvoří:

- vstupní dávkovací uzel, zahrnující zásobník a podávací dopravník,
- mlýn,
- pneumatický dopravní systém,
- cyklonový odlučovač,
- vibrační třídič,
- systém filtrace prachových podílů.

Výstupem linky jsou tři základní zrnitostní frakce, které jsou po vytřídění předávány do navazujících způsobů zpracování. První z nich je hrubší nadsítná frakce o velikosti nad 1,5 mm, která tvoří maximálně 24 hm. % vstupu a je následně předávána k odstranění jako odpad. Druhou je hlavní produktová frakce o velikosti 0,5 až 1,5 mm, představující přibližně 46 až 56 hm. % vstupu, která pokračuje k fluidní separaci realizované mimo vlastní linku. Třetí frakci tvoří podsítný podíl o velikosti pod 0,5 mm, jehož množství činí přibližně 28 až 42 hm. % vstupu a který je směrován na linku elektrostatické separace. Do těchto navazujících technologických uzlů je materiál dopravován pomocí vysokozdvižných vozíků, a to v manipulačních boxech nebo ve vacích typu big bag.

4.2.2 Detailní popis stávající technologické linky

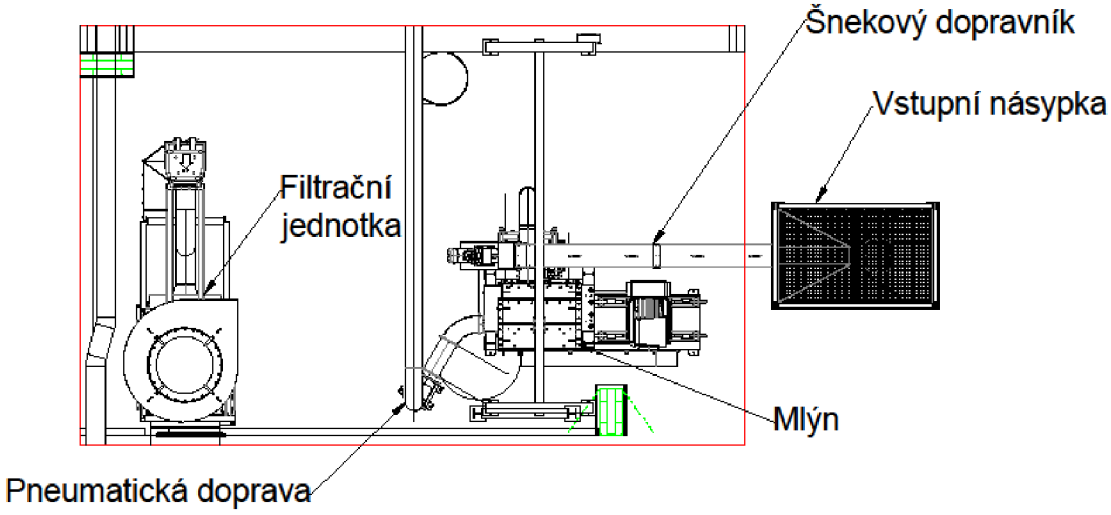
Na vstupu linky se nachází zásobní násypka s ochranným boxem, do které je dávkována předupravená plastová frakce z předchozích recyklačních stupňů. Ze dna násypky odebírá materiál podávací šnekový dopravník, který jej dopravuje do mlýna.

Obrázek 7 Zásobní násypka se šnekovým dopravníkem

Zdroj: vlastní foto autorky

Mlýn je umístěn v ochranném boxu, jehož funkcí je omezení hlukové zátěže provozu a snížení úniku prachových částic do okolního prostředí. V mlecím uzlu dochází ke zmenšování velikosti plastové frakce a k úpravě její granulometrie na rozmezí požadované pro navazující třídění. Otáčky mlýnu jsou 2030 ot/min. Po opuštění mlýna je materiál prostřednictvím rotačního podavače předáván do pneumatického dopravního systému, kterým je proudem vzduchu transportován do cyklonového odlučovače umístěného nad vibračním třídičem.

Obrázek 8 Ochranný box (housing) linky s popiskami



Zdroj: vlastní výkres autorky

Princip činnosti cyklonového odlučovače spočívá ve vzniku dvojitého vířivého proudění, tvořeného sestupným vnějším vírem a vzestupným vnitřním vírem. Působením odstředivých sil jsou pevné částice vytlačovány ke stěnám zařízení a následně klesají do spodní části odlučovače, zatímco vzdušný proud je odváděn horním výstupem do navazujícího systému odprášení **[23]**. V podmínkách posuzované linky je cyklon umístěn nad vibračním třídičem a slouží k oddělení dopravního vzduchu a prachových částic od namletého materiálu před jeho vstupem do třídicího uzlu.

Obrázek 9 Celkový pohled na technologický uzel zahrnující cyklonový odlučovač, vibrační třídič a systém výsypných potrubí pro plnění výstupních frakcí do big-bagů

Zdroj: vlastní foto autorky

Pod cyklonem je na ocelové plošině osazen víceetážový vibrační třídič se síty o velikosti ok 1,5 mm, 1 mm a 0,5 mm, který zajišťuje rozdělení toku namletého plastu do několika zrnitostních frakcí. Jednotlivé frakce jsou z výsypů třídiče odváděny samospádem do připravených boxů nebo velkoobjemových vaků (big-bagů) umístěných pod plošinou.

4.2.3 Identifikace provozního problému a omezení stávajícího řešení

Nejvýznamnější provozní omezení stávajícího uspořádání spočívá v tom, že výstupní frakce z linky MJP nejsou dále zpracovávány v přímé návaznosti na tuto linku. Hlavní produktová frakce o velikosti 0,5 až 1,5 mm je po vytřídění převážena k dalšímu dotřídění na samostatně umístěný fluidní separátor, zatímco frakce pod 0,5 mm je dopravována na linku elektrostatické separace. Oba tyto navazující separační stupně jsou umístěné ve

vedlejší hale, tj. zpracování materiálu po výstupu z linky MJP již neprobíhá v rámci jedné souvislé technologické trasy, ale vyžaduje mezioperační manipulaci a interní dopravu.

Při úvahách o inovaci je současně nutné respektovat dispoziční a provozní podmínky závodu. Prostor v okolí linky MJP je omezený a v její bezprostřední blízkosti se nacházejí další technologie i průjezdové trasy pro manipulační techniku. Z tohoto důvodu není z dispozičního hlediska reálné začlenit do této části provozu oba navazující separační uzly současně. Současně platí, že elektrostatická separace neslouží výhradně pro výstupy z linky MJP, ale vstupují do ní i další produktové frakce z jiných částí provozu. Z kapacitního hlediska je navíc podstatné, že frakce 0,5 až 1,5 mm se na výstupu linky MJP vyskytuje zpravidla přibližně v dvojnásobném množství oproti frakci pod 0,5 mm. Z uvedených důvodů je v rámci návrhu inovace dále uvažováno pouze se začleněním fluidní separace.

Stávající uspořádání přináší několik vzájemně souvisejících provozních nevýhod:

1. **Přerušení kontinuity zpracování**

   Po vytřídění není materiál veden přímo do navazujícího separačního stupně, ale musí být nejprve shromážděn, převezen do vedlejší haly, dočasně skladován a znovu připraven k dalšímu zpracování. Tím dochází k přerušení plynulosti technologického toku a k prodloužení celkové doby zpracování.

2. **Zvýšená manipulační a organizační náročnost**

   Materiál je po výstupu z linky ukládán do boxů nebo do vaků typu big bag, následně interně přepravován a dočasně skladován. Tento postup zvyšuje počet pomocných operací, které nejsou součástí vlastního technologického přepracování materiálu, ale zajišťují pouze jeho přesun mezi jednotlivými technologickými uzly.

3. **Vyšší personální a prostorové nároky**

   Pro převoz materiálu mezi halami a související manipulační činnosti je zapotřebí další pracovník. Tato skutečnost znamená nejen zvýšení mzdových nákladů, ale i vyšší provozní závislost na dostupnosti pracovní síly, například v době přestávek nebo pracovní neschopnosti. Současně roste nárok na skladovací a manipulační prostor, protože materiál určený pro fluidní separaci musí být po určitou dobu umístěn v meziskladu při čekání na další zpracování.

Lze konstatovat, že ačkoli samotná linka MJP představuje technologicky navazující celek, její hlavní výstup není přímo integrován do dalšího stupně úpravy. Část procesu tak zůstává závislá na ruční organizaci toku materiálu, interní dopravě a mezioperační manipulaci, což se negativně promítá do plynulosti provozu, efektivity práce i využití provozního prostoru.

5 Návrh inovace technologické linky

5.1 Cíl návrhu

Cílem návrhu je začlenění fluidní separace do navazující technologické trasy linky MJP tak, aby frakce o velikosti 0,5 až 1,5 mm mohla být po výstupu z vibračního třídiče dále zpracována přímo v návaznosti na linku. Hlavním smyslem návrhu je odstranit potřebu meziskladování této frakce, jejího převozu do vedlejší haly a následného opětovného dávkování do samostatně umístěného separačního zařízení.

V této práci není předmětem řešení volba samotného separačního zařízení, protože fluidní splav byl pro navrhovanou inovaci již předem daný. V závodě je k dispozici jako stávající zařízení, které lze pro tento účel využít, aniž by tím došlo k omezení jiných technologických procesů. Návrh se proto soustředí především na to, jak tento stroj technicky a provozně začlenit do linky MJP tak, aby celé řešení dávalo smysl z hlediska provozu, prostoru i ekonomiky. V následující kapitole 6 bude provedeno laboratorní měření, jehož cílem je ověřit vhodnost navrženého zařazení fluidní separace do linky MJP a posoudit, zda toto řešení nepovede ke snížení výtěžnosti kovových složek.

Pro splnění uvedeného cíle je nutné řešit zejména tyto dílčí okruhy:

1. **Dispoziční a prostorové začlenění zařízení**

Je potřeba navrhnout takovou polohu fluidního splavu, aby na něj bylo možné navázat výstup z vibračního třídiče a současně zůstaly zachovány průchody pro obsluhu i manipulační trasy v hale.

2. **Návrh dopravního a dávkovacího uzlu**

Další část návrhu se týká dopravy frakce 0,5 až 1,5 mm mezi vibračním třídičem a fluidním splavem. Je třeba navrhnout vhodný dopravník a současně řešit dávkování materiálu tak, aby byl separátor zatěžován rovnoměrně a bez výrazných výkyvů.

3. **Problematika odsávání a filtrace**

Protože provoz fluidního splavu je spojen s prouděním vzduchu a vznikem jemných prachových podílů, je nutné navrhnout také odpovídající filtrační jednotku a její potrubní napojení.

4. **Elektro napojení a úprava řízení**

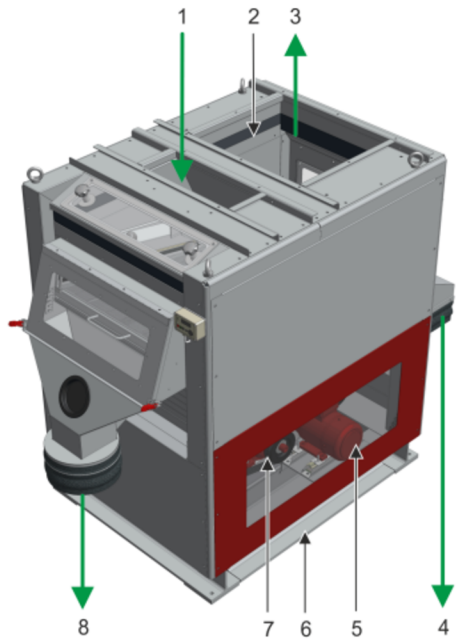
Poslední část návrhu se týká elektrického připojení nového uzlu a jeho funkčního začlenění do stávajícího systému ovládání linky MJP.

5.2 Popis separačního zařízení

Pro navrhovanou inovaci je uvažováno se zařízením typu fluidní splav TTS 600×1000 od výrobce TrennSo-Technik GmbH, které z hlediska principu činnosti představuje suchý gravitační separátor určený k rozdělování suchých, sypkých a granulovaných materiálů na základě rozdílů v jejich měrné hmotnosti. V podmínkách linky MJP je zařízení určeno k oddělení převážně plastové složky od těžších kovových částic na základě rozdílů v měrné hmotnosti částic.

Základní části separačního zařízení TTS 600×1000 jsou uvedeny v tabulce 4.

Obrázek 10 Prostorové zobrazení separačního zařízení TTS 600×1000



Zdroj: **[24]**

Tabulka 4 Základní části separačního zařízení TTS 600×1000

Pozice	Označení části zařízení
1	Vstup materiálu
2	Třídicí skříň
3	Odsávání
4	Výstup lehké frakce
5	Pohon
6	Základový rám
7	Ventilátorová jednotka
8	Výstup těžké frakce

Zdroj: Upraveno podle **[24]**

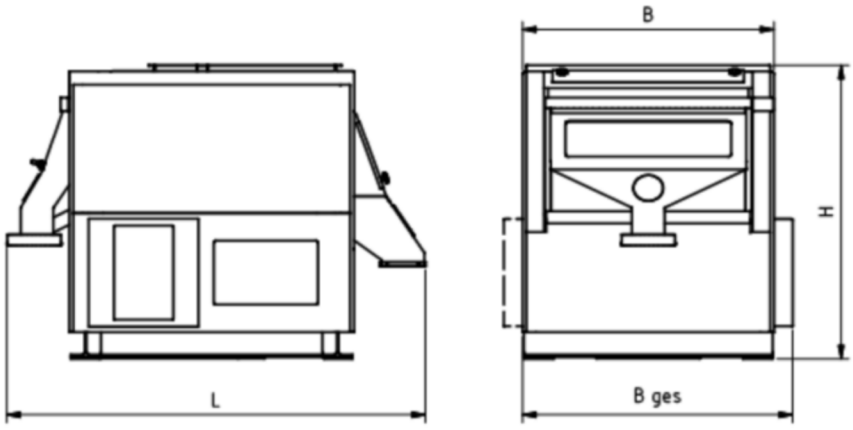
Pro účely návrhu jsou podstatné zejména rozměry zařízení, jeho hmotnost, požadavky na odsávání a výškové uspořádání výstupů. Tyto parametry ovlivňují návrh nosné konstrukce, způsob napojení na vibrační třídič i prostorové začlenění stroje do linky.

Princip činnosti zařízení je založen na kombinaci proudění vzduchu ze spodní části pracovního síta a dopravního pohybu pracovního síta vyvolaného excentrickým pohonem. Vlivem těchto účinků dochází k rozvrstvení materiálu, při němž se částice s vyšší měrnou hmotností soustřeďují ve spodní části materiálového lože a jsou odváděny k výstupu těžké frakce, zatímco částice s nižší měrnou hmotností směřují k výstupu lehké frakce **[24]**.

Zařízení je proto vhodné pro dotřídění velikostně již vymezené plastové frakce s obsahem zbytkových těžších kovových příměsí.

Technické parametry stroje jsou uvedené v tabulce 5.

Obrázek 11 Základní rozměrové schéma separačního zařízení TTS 600×1000



Zdroj: vlastní zpracování podle manuálu zařízení **[24]**

Tabulka 5 Technické parametry použitého separačního zařízení

Parametr	Hodnota
Výrobce / typové označení	TRENNSO TTS 600×1000-1kV
Délka (L)	1750 mm
Šířka (W)	885 mm
Výška (H)	1350 mm
Hmotnost	600 kg
Teplota okolního prostředí	-15 °C až +40 °C
Maximální provozní teplota	64 °C
Relativní vlhkost vzduchu	< 80 %

Zdroj: vlastní zpracování podle manuálu zařízení **[24]**

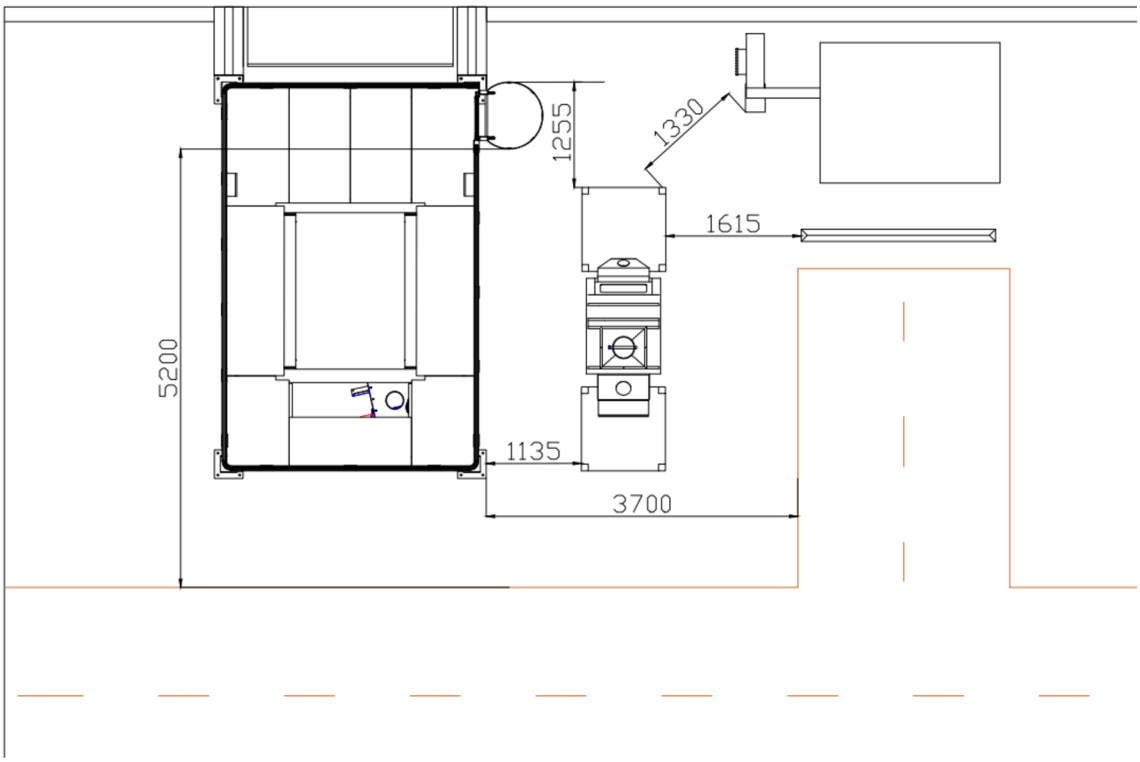
5.3 Návrh technického řešení

5.3.1 Dispoziční a prostorové řešení navrhované inovace

Při návrhu začlenění fluidní separace do linky MJP je nutné vedle technologické návaznosti zohlednit také dispoziční a prostorové podmínky provozu. Navrhované umístění zařízení musí respektovat:

1) stávající uspořádání linky,
2) přítomnost okolních technologických celků,
3) obslužné přístupy,
4) zachování manipulačních tras v prostoru haly.

Obrázek 12 Návrh umístění fluidního separátoru v prostoru linky MJP



Zdroj: vlastní výkres autorky

Fluidní splav je proto v návrhu na obrázku 12 situován do prostoru navazujícího na výstup z vibračního třídiče tak, aby bylo možné zajistit jeho technologické napojení a současně neomezit provoz ostatních zařízení. V dispozičním výkresu jsou zohledněny také dva boxy o rozměrech 1000 × 1000 mm určené pro odběr výstupních frakcí ze separátoru. Při volbě polohy bylo přihlédnuto zejména k provoznímu požadavku na zachování

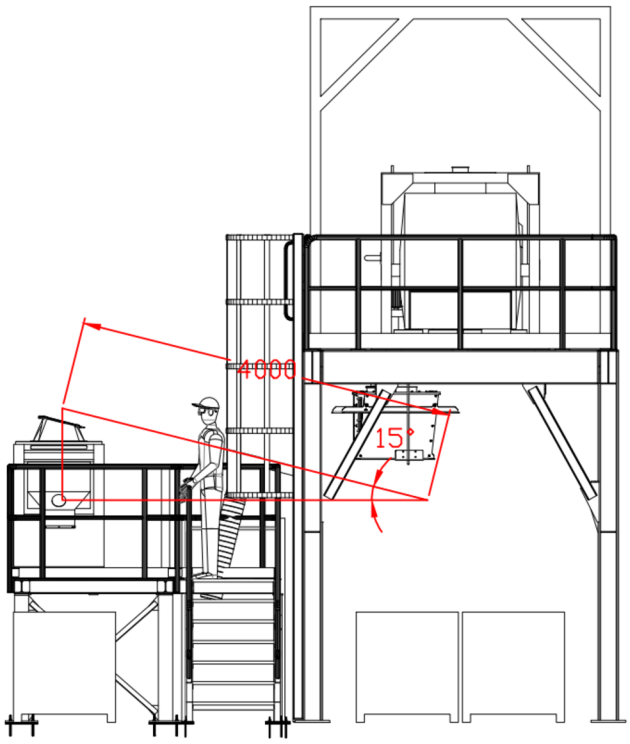
průchozího prostoru pro obsluhu o šířce alespoň 1100 mm a k ponechání dostatečné manipulační šířky pro průjezd techniky zajišťující obsluhu boxů. Z dispozičního výkresu dále vyplývá, že návrh respektuje stanovené odstupy v okolí zařízení a zachovává potřebné komunikační koridory v rámci pracoviště. Na základě dohody s vedením provozu byl tento výkres dále použit jako podklad pro navazující komunikaci s dodavatelem ocelové plošiny, na kterou má být separátor osazen, a pro zpracování podrobného návrhu určeného pro výrobu a instalaci této plošiny.

Při návrhu ocelové plošiny pro osazení fluidního splavu je nutné zohlednit několik základních požadavků. Především musí být zajištěna dostatečná výšková úroveň zařízení vzhledem k odběru výstupních frakcí do boxů, jejichž výška činí přibližně 1100 mm. Rezerva musí zůstávat pro redukci spadu ze separátoru do boxu. Z tohoto důvodu je uvažována výška plošiny přibližně 1300 až 1400 mm nad úrovní podlahy. Konstrukce plošiny musí dále vykazovat dostatečnou únosnost a tuhost pro přenesení statického i dynamického zatížení vyvolaného provozem separátoru. Tyto požadavky jsou upřesněny ve spolupráci s dodavatelem zařízení a předány výrobci plošiny jako podklad pro konstrukční návrh. Současně je nutné zajistit, aby byla plošina bezpečně pochozí a umožňovala obsluze přístup k zařízení při běžném provozu, kontrole i údržbě.

Po stanovení navržené polohy ocelové plošiny a fluidního separátoru ve spolupráci s dodavatelem lze přistoupit k upřesnění geometrických a technických parametrů dopravního uzlu.

Na základě určené výškové úrovně vstupu do fluidního separátoru je možné zaměřit vzdálenost mezi výstupem frakce 0,5 až 1,5 mm z vibračního třídiče a vstupem do separačního zařízení. Z dispozičního výkresu na obrázku 13 vyplývá, že dopravník propojující oba uzly musí být navržen se sklonem 15° a s délkou přibližně 4 m. Tuto skutečnost používám pro návrh dopravníku v následující kapitole.

Obrázek 13 Návrh dispozice dopravníku mezi třídičem a fluidem



Zdroj: vlastní výkres autorky

5.3.2 Volba vhodného typu dopravníku

Pro zajištění přímé návaznosti fluidní separace na výstup z vibračního třídiče je nutné navrhnout dopravní uzel, který zajistí plynulou a provozně stabilní přepravu materiálu do navazujícího separačního zařízení. Dopravovaný materiál tvoří jemná plastová frakce o velikosti částic přibližně 0,5 až 1,5 mm, vznikající při mechanickém zpracování elektroodpadu. Na základě posledních laboratorních měření byla u této frakce stanovena sypná hmotnost přibližně 370 $kg \cdot m^{-3}$. Současně se jedná o materiál, který obsahuje zbytková množství kovů, skla a dalších balastních složek a vykazuje zvýšenou náchylnost k elektrostatickému nabíjení a tvorbě prachu. Tyto vlastnosti je nutné zohlednit při volbě vhodného způsobu dopravy, zejména z hlediska uzavřenosti systému, plynulosti toku materiálu a provozní spolehlivosti.

Z hlediska obecných vlastností dopravní techniky jsou šnekové dopravníky vhodné pro přepravu širokého spektra sypkých materiálů, zejména látek práškovitého, zrnitého, jemně kusového nebo vláknitého charakteru, a lze je využít také pro materiály s mírnou vlhkostí. Naopak méně vhodné jsou pro dopravu lepivých, hrubozrnných a silně abrazivních

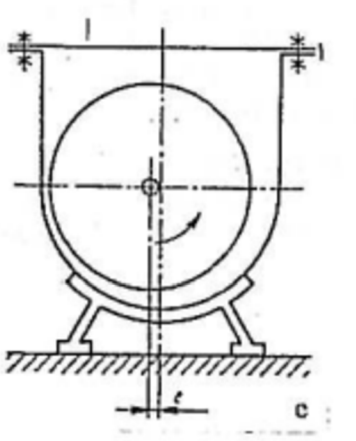
látek, protože u abrazivních materiálů dochází ke zrychlenému opotřebení pracovních částí zařízení. Mezi hlavní přednosti šnekových dopravníků patří robustní konstrukce, s ní související nízká poruchovost i při kontinuálním provozu, kompaktní uspořádání, uzavřený provoz a konstrukční jednoduchost. Tyto vlastnosti je předurčují zejména pro použití v prostorově omezených podmínkách. Nevýhodou je naopak vyšší energetická náročnost provozu, zvýšené opotřebení pracovních částí a možnost částečného porušování nebo drcení dopravovaného materiálu **[25]**.

S ohledem na charakter přepravované frakce i dispoziční omezení v okolí linky byl jako vhodné řešení zvolen šnekový dopravník. Pro danou aplikaci je rozhodující především jeho uzavřené konstrukční provedení, které omezuje únik jemných částic do okolí a přispívá ke snížení prašnosti provozu. Současně umožňuje směrově řízenou a rovnoměrnou dopravu materiálu i v omezeném prostoru. Přestože je u šnekového dopravníku nutné počítat s vyšší energetickou náročností a s určitým stupněm opotřebení pracovních částí, v podmínkách navrhovaného technologického řešení jeho výhody převažují.

5.3.3 Teoretický výpočet šnekového dopravníku

Navrhovaný šnekový dopravník je tvořen ocelovým žlabem U-profilového průřezu, ve kterém se otáčí šneková hřídel opatřená šnekovnicí. Materiál je posouván působením rotačního pohybu šneku ve směru osy dopravníku. Celá sestava je uzavřená, což minimalizuje prašnost a únik lehkých plastových částic do okolí **[26]**.

Obrázek 14 Žlab šnekového dopravníku, uzavřený těsněným krytem



Zdroj: **[26]**

1) Teoretická objemová výkonnost šnekového dopravníku [25]:

$$Q_{v,š} = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot s \cdot n \cdot \varphi \cdot c^H \text{ [m}^3\text{/h]}$$

kde:

D – průměr šnekovnice [m],

s – stoupání šnekovnice [m]. Volí se s ≈ D, pro velké průměry šneků s ≈ 0,8·D,

n – otáčky šneku [ot·s^{-1}],

ψ – součinitel plnění, respektující stupeň zaplnění průřezu žlabu,

C^H – součinitel snižující dopravované množství vzhledem ke sklonu dopravníku při dopravě vzhůru.

Uvažované vstupní parametry:

- Sypná hmotnost materiálu:

$$\rho = 370 \text{ kg/m}^3$$

- Hmotnostní kapacita linky MJP při maximálním provozním zatížení:

$$Q_m = 1400 \text{ kg/h}$$

- Hmotnostní kapacita frakce 0,5 až 1,5 mm, která představuje v průměru přibližně 50 % celkové kapacity linky:

$$Q_m = 700 \text{ kg/h}$$

- Otáčky šneku (volím podle tab. 9.1, str. 209, **[25]**):

$$n = 1\ s^{-1}$$

- Plnicí součinitel (volím podle tab. 9.1, str. 209, **[25]**):

$$\varphi = 0{,}3$$

- Součinitel sklonu (z obr. 9.7, str. 209, **[25]**, dle sklonu dopravníku 15°):

$$C^H = 0{,}7$$

2) Objemová výkonnost linky v případě frakce 0,5 až 1,5 mm [26]:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{700}{370} = 1{,}89 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

3) Průměr šnekovnice:

$$\boldsymbol{D} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_v}{3600 \cdot \pi \cdot n \cdot \varphi \cdot C^H}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1{,}89}{3600 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}7}} \approx 147\ [mm]$$

Na základě orientačního výpočtového posouzení a s přihlédnutím ke katalogovým parametrům od výrobce zařízení lze konstatovat, že pro navrhovanou aplikaci vyhovuje šnekový dopravník se šnekovnicí o průměru 150 mm. Tato velikost odpovídá požadovanému rozsahu dopravovaného množství materiálu i provozním podmínkám navrhovaného uzlu. Na základě provedeného výpočtu a zaměření dopravní trasy z dispozičního výkresu je pro další fázi návrhu uvažováno s objednáním šnekového dopravníku se šnekovnicí o průměru 150 mm a délce 3900 mm. Od stejného výrobce je současně účelné uvažovat i s objednáním dávkovací jednotky, resp. dávkovací klapky, která zajistí rovnoměrné a plynulé podávání materiálu do dopravníku, vyrovnání krátkodobých výkyvů v toku frakce z vibračního třídiče a stabilní zatěžování navazujícího fluidního separátoru.

5.3.4 Filtrační jednotka a potrubní napojení

Součástí navrhovaného začlenění fluidní separace do linky MJP musí být také samostatně řešené odsávání a filtrace. Provoz fluidního splavu je spojen s prouděním vzduchu a se vznikem jemných prachových podílů, a proto je pro správnou funkci zařízení i pro omezení prašnosti pracoviště nutné zajistit jeho napojení na vhodnou filtrační jednotku.

Pro navrhovaný uzel je uvažováno s filtrační jednotkou FJA 89 AS_2x115 od firmy URBAN Technik, která je určena pro zachycení a odlučování suchých prachových částic a pro suché odsávání.

Technické parametry filtrační jednotky:

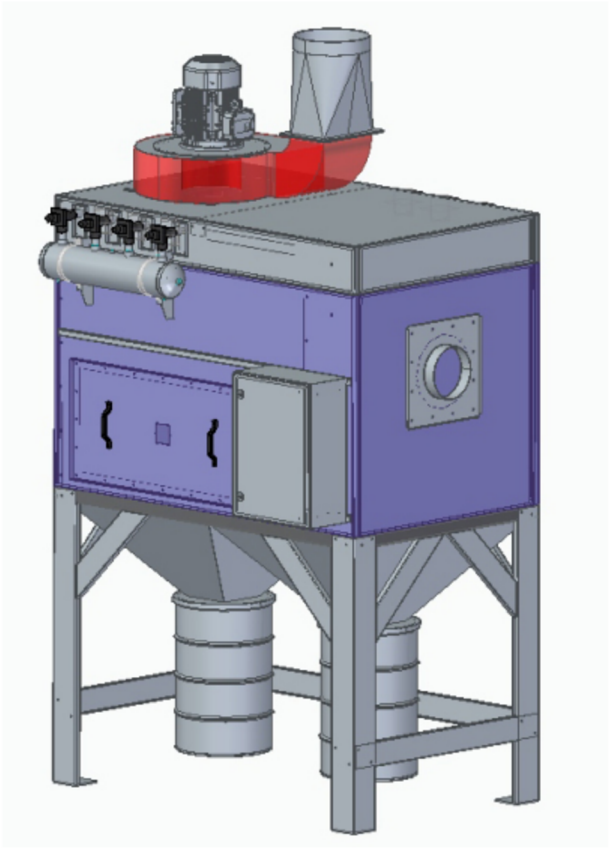
Tabulka 6 Technické parametry uvažované filtrační jednotky

Technický parametr	Jednotka	Hodnota
Vzduchový výkon	m³/h	6900
Maximální podtlak	Pa	3400
Filtrační plocha	m²	89
Filtrační médium – filtrpatrona PES ALU 160/90/900, 4,25 m², kategorie „M“ dle BIA	ks	21
Regenerace tlakovým rázem	atm.	6
Ráz prostřednictvím solenoidového ventilu s elektromagnetem 1″	ks	7
Velikost jímací nádoby (2 ks)	l	115
Napětí (50 Hz)	V	400
Průměr vstupního hrdla	mm	250
Půdorysné rozměry zařízení	mm	1730 × 2020
Výška zařízení	mm	2850
Hmotnost	kg	470

Zdroj: **[27]**

Z konstrukčního hlediska je filtrační jednotka tvořena zejména filtrační komorou, vstupní labyrintovou komorou se zpětnou klapkou, výstupní komorou čistého vzduchu, násypkou napojenou na jímací nádoby, tlakovými nádobami pro regeneraci filtračních patron, soustavou solenoidových ventilů, rozvaděčem a ventilátorem. Pro navrhovanou aplikaci je důležité, že zařízení umožňuje automatickou regeneraci filtračních patron tlakovým rázem, čímž se podporuje stabilita odsávacího výkonu během provozu.

Obrázek 15 Prostorové zobrazení filtrační jednotky FJA 89



Zdroj: **[27]**

Při výběru jednotky bylo vycházeno z požadavku, aby její vzduchový výkon převyšoval vzduchový výkon samotného fluidního separátoru a umožnil tak vytvoření mírného podtlaku v zařízení. Současně byl zohledněn i požadavek na dostatečnou filtrační plochu, resp. vyšší počet filtračních patron, a to s ohledem na provozní zkušenosti s tvorbou shluků prachových a vláknitých podílů na povrchu patron při zpracování daného materiálu.

Volba této filtrační jednotky je v návrhu odůvodněna nejen jejími technickými parametry, ale také provozní unifikací zařízení v rámci závodu. Filtrační jednotky od stejného výrobce jsou v provozu již používány, obsluha i údržba s nimi mají praktické zkušenosti a jejich provozní vlastnosti jsou v podmínkách závodu ověřené. Z provozního hlediska je současně výhodné, že použití zařízení stejného konstrukčního okruhu omezuje rozsah skladovaných náhradních dílů a spotřebního materiálu, zejména filtračních patron a souvisejících servisních prvků. V případě volby jiného dodavatele by bylo nutné rozšířit

skladové zásoby o další typy náhradních dílů, což by zvyšovalo nároky na skladování i správu materiálu.

Na základě uvedených skutečností je v návrhu uvažováno s objednáním filtrační jednotky FJA 89 AS_2x115 včetně jejího napojení pomocí spiropotrubí ze strany výrobce. Takové řešení je odůvodněno jak požadavkem na technicky správnou funkci odsávání, tak snahou o provozní sjednocení zařízení, zjednodušení údržby a omezení rozsahu skladovaných náhradních dílů.

5.3.5 Elektro napojení a úprava řídicího systému

Posledním krokem v implementaci fluidního splavu do linky je zajištění elektroinstalačního a řídicího napojení nově doplněného uzlu na stávající linku MJP. Tato část návrhu zahrnuje elektrické propojení jednotlivých mechanismů a jejich funkční začlenění do stávajícího systému ovládání linky. Tuto část zajišťují subjekty, které se podílely i na napojení a řízení původní linky MJP, což vytváří předpoklad pro zachování provozní návaznosti a kompatibility celého systému.

6 Posouzení vlivu inovace na výtěžnost kovů

V průběhu zpracování diplomové práce došlo k úspěšné realizaci navržené inovace spočívající v integraci fluidní separace do navazující technologické trasy linky MJP. Tato skutečnost umožnila navázat na návrhovou část práce experimentálním ověřením funkce inovovaného uspořádání v provozních podmínkách. Cílem této kapitoly je proto posoudit úspěšnost provedené inovace na základě organizace a vyhodnocení laboratorního měření, které bylo zaměřeno na porovnání výsledků před realizací úpravy a po jejím provedení.

6.1 Cíl laboratorního měření

Cílem laboratorního měření je posoudit změnu výtěžnosti jednotlivých kovových složek před realizací inovace linky a po ní. Vyhodnocení je založeno na porovnání výsledků dvou provozních variant, a to varianty MJP-offline, která reprezentuje původní způsob zpracování na fluidním separátoru umístěném ve vedlejší hale, a varianty MJP-fluid, která představuje stav po začlenění fluidní separace do navazující technologické trasy.

Laboratorní měření slouží jako ověření správnosti navrženého technického řešení. Jeho účelem je zjistit, zda po inovaci zůstává zachována schopnost linky koncentrovat kovové složky do produktové frakce a zda nedochází k jejich zvýšeným ztrátám do odpadu. V rámci hodnocení byly sledovány tyto kovové složky: zlato (Au), stříbro (Ag), hliník (Al) a měď (Cu).

Při interpretaci výsledků je současně nutné zohlednit, že porovnávané kampaně proběhly v odlišném období a vstupní materiál nemusel mít zcela stejné složení. Z tohoto důvodu je hlavní důraz kladen především na porovnání relativních ukazatelů, zejména výtěžnosti jednotlivých kovů.

6.2 Popis měření

Předmět měření

Předmětem laboratorního vyhodnocení bylo porovnání variant MJP-offline a MJP-fluid na základě analýzy produktové a odpadní frakce o velikosti 0,5 až 1,5 mm vznikající při zpracování materiálu na lince MJP.

Cíl měření

Cílem laboratorního měření bylo stanovit obsah vybraných kovových složek v jednotlivých výstupních proudech a na tomto základě posoudit jejich výtěžnost před a po začlenění fluidní separace do linky.

Zadání měření

Na základě požadavku autorky bylo úkolem laboratoře:

- vyhodnotit produktovou a odpadní frakci u variant MJP-offline a MJP-fluid,
- stanovit obsah vybraných kovových složek v odebraných vzorcích,
- provést bilanční přepočet hmotnosti sledovaných kovů v jednotlivých proudech,
- určit výtěžnost kovových složek v obou hodnocených variantách.

Odběr vzorků

Z jednotlivých výstupních proudů byly odebrány reprezentativní vzorky. Odběr byl proveden pomocí automatického vzorkovače, který je součástí fluidního separátoru a umožňuje průběžné vzorkování materiálového proudu. Tím je podporováno získání vzorku, jehož složení co nejlépe odpovídá skutečnému složení hodnocené frakce.

Použité analytické metody

Odebrané vzorky byly předány k laboratorní analýze, při níž byl stanoven obsah sledovaných kovových složek.

Pro analýzu byly použity následující metody:

1) FAAS pro stanovení drahých kovů,
2) ICP-OES pro stanovení základních kovů.

FAAS (flame atomic absorption spectrometry, plamenová atomová absorpční spektrometrie) je analytická metoda založená na absorpci elektromagnetického záření volnými atomy prvku vznikajícími po zavedení vzorku do plamene. Míra této absorpce je závislá na koncentraci daného prvku ve vzorku, a proto ji lze využít pro jeho kvantitativní stanovení. Metoda se používá zejména pro analýzu kovových prvků v kapalných vzorcích a je vhodná tam, kde je požadováno stanovení konkrétních prvků s dostatečnou citlivostí a přesností. **[28]**

ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry, optická emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem) je analytická metoda založená na excitaci atomů a iontů prvků v plazmatu o vysoké teplotě. Po excitaci prvky emitují záření

o charakteristických vlnových délkách, jehož intenzita je úměrná jejich koncentraci ve vzorku. Výhodou této metody je možnost současného stanovení více prvků, a proto se běžně využívá při analýze základních kovů a dalších anorganických složek. **[28]**

V rámci hodnocení byly sledovány zejména tyto složky:

- zlato (**Au**),
- stříbro (**Ag**),
- hliník (**Al**),
- měď (**Cu**).

Způsob vyhodnocení

Na základě laboratorně zjištěného obsahu jednotlivých kovových složek v reprezentativních vzorcích a známé celkové hmotnosti příslušné výstupní frakce byl proveden bilanční přepočet hmotnosti sledovaných kovů v produktu a v odpadu. Tímto postupem byly analytické výsledky získané ze vzorků extrapolovány na celý materiálový proud, což umožnilo kvantifikovat rozdělení kovových složek mezi jednotlivé výstupy a určit jejich výtěžnost v obou hodnocených variantách.

Vlastní zpracování výsledků měření

1. měření

V rámci prvního měření byla hodnocena varianta MJP-offline, která reprezentuje původní způsob zpracování před začleněním fluidní separace do navazující technologické trasy, kdy byla frakce po výstupu z linky MJP převážena k dalšímu dotřídění na samostatně umístěný úsek fluidní separace.

Pro tuto variantu byla nejprve stanovena celková hmotnost obou výstupních proudů, tedy produktové a odpadní frakce. Z hmotnostní bilance vyplývá, že produkt tvořil 655,20 kg, což odpovídá 4,76 % celkového množství, zatímco odpadní frakce činila 13 106,80 kg, tedy 95,24 %. Celková hmotnost hodnoceného materiálu byla 13 762,00 kg.

Z obou výstupních proudů byly následně odebrány reprezentativní vzorky, jejichž prvkové složení bylo stanoveno laboratorní analýzou. Pro stanovení drahých kovů byly použity metody FAAS a pro stanovení základních kovů metoda ICP-OES. Na základě těchto analýz byl ve vzorcích určen obsah sledovaných kovových složek, konkrétně Au, Ag, Al a Cu.

Tabulka 7 Materiálová bilance a výtěžnost vybraných kovů varianty MJP-offline

Datum výroby od – do: 01.10.2024 - 02.10.2024										
Frakce	Hmotnostní bilance		Au		Ag		Al		Cu	
			Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost
	kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	%	%	%	%
MJP offline produkt	655,20	4,76	10,06	32,59	66,27	29,32	61,02	52,57	28,39	82,50
MJP offline odpad	13 106,80	95,24	1,04	67,41	7,99	70,68	2,75	47,43	0,30	17,50
MJP offline celkově	13 762,00	100,00	1,47	100,00	10,76	100,00	5,53	100,00	1,64	100,00

Zdroj: vlastní zpracování na základě výsledků laboratorního měření

Hmotnost jednotlivých kovů v produktu a odpadu byla následně stanovena bilančním přepočtem z celkové hmotnosti příslušné frakce a laboratorně zjištěného obsahu prvku ve vzorku. U prvků vyjádřených v **%** byla hmotnost vypočtena podle vztahu:

$$m_k = m_f \cdot \frac{c_k}{100}$$

kde:

m_k - hmotnost sledovaného kovu ve frakci [kg],

m_f - celková hmotnost dané frakce [kg],

c_k - obsah prvku ve vzorku [%].

Výsledkem uvedeného postupu jsou hodnoty zaznamenané v pomocné tabulce 8 ve sloupcích pro Al a Cu.

U drahých kovů, jejichž obsah byl vyjádřen v jednotkách mg/kg, byl přepočet proveden podle vztahu:

$$m_k = m_f \cdot \frac{c_k}{10^6}$$

kde:

m_k - hmotnost sledovaného kovu ve frakci [kg],

m_f - celková hmotnost dané frakce [kg],

c_k - obsah prvku ve vzorku [mg/kg].

Výsledkem uvedeného postupu jsou hodnoty zaznamenané v pomocné tabulce 8 ve sloupcích pro Au a Ag.

Tabulka 8 Pomocná tabulka pro výpočet měření MJP-offline

Pomocná tabulka

Frakce	Au	Ag	Al	Cu
	Hmotnost	Hmotnost	Hmotnost	Hmotnost
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
MJP - offline produkt	0,01	0,04	399,80	186,01
MJP - offline odpad	0,01	0,10	360,70	39,46
MJP - offline celkově	0,02	0,15	760,50	225,48

Zdroj: vlastní zpracování

Na základě tohoto přepočtu byla pro variantu MJP-offline stanovena celková hmotnost jednotlivých kovových složek v produktu a odpadu.

Výtěžnost jednotlivých kovových složek do produktové frakce byla následně stanovena jako podíl hmotnosti daného kovu v produktu k celkové hmotnosti tohoto kovu v produktu a odpadu podle vztahu:

$$\eta = \frac{m_{k,p}}{m_{k,celk}} \cdot 100$$

kde:

η - výtěžnost kovu do produktu [%],

$m_{k,p}$ - hmotnost daného kovu v produktové frakci [kg],

$m_{k,celk}$ - celková hmotnost daného kovu v produktu i odpadu [kg].

Výtěžnost u odpadové frakce se zjišťuje odečtením výtěžnosti produktové frakce od 100 %.

Na základě výpočtu bylo zjištěno, že ve variantě MJP-offline dosahovala výtěžnost do produktu hodnot 32,59 % u Au, 29,32 % u Ag, 52,57 % u Al a 82,50 % u Cu (viz. tabulka 7). Z těchto výsledků je patrné, že nejvyšší výtěžnosti do produktové frakce je dosaženo u mědi, zatímco zlato a stříbro jsou ve větší míře zastoupeny v odpadní frakci. Hliník byl mezi produkt a odpad rozdělen přibližně rovnoměrně, s mírnou převahou ve prospěch produktu.

2. Měření

U varianty MJP-fluid, která reprezentuje stav po začlenění fluidní separace do přímé technologické návaznosti na linku MJP, byl postup měření a výpočtu proveden obdobně jako u varianty MJP-offline. Byly stanoveny hmotnostní bilance produktové a odpadové frakce a následně byly vypočteny obsahy a výtěžnosti sledovaných kovových složek. Přehled naměřených a dopočtených hodnot pro variantu MJP-fluid je v tabulce 9 a 10.

Tabulka 9 Materiálová bilance a výtěžnost vybraných kovů varianty MJP-fluid

Datum výroby od – do: 09.04.2025 - 10.04.2025										
Frakce	Hmotnostní bilance		Au		Ag		Al		Cu	
			Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost	Obsah	Výtěžnost
	kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	%	%	%	%
MJP fluid produkt	678,6	4,91	4,08	75,00	47,24	55,56	79,94	60,51	12,85	68,48
MJP fluid odpad	13 145,40	95,09	0,00	0,00	16,13	44,44	1,56	39,49	0,22	31,52
MJP fluid celkově	13 824,00	100,00	1,45	100,00	13,02	100,00	5,79	100,00	0,72	100,00

Zdroj: vlastní zpracování na základě výsledků laboratorního měření

Tabulka 10 Pomocná tabulka pro výpočet měření MJP-fluid

Pomocná tabulka

Frakce	Au	Ag	Al	Cu
	Hmotnost	Hmotnost	Hmotnost	Hmotnost
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
MJP - Fluid produkt	0,02	0,10	484,63	68,53
MJP - Fluid odpad	0,00	0,08	316,32	31,54
MJP - Fluid celkově	0,02	0,18	800,95	100,07

Zdroj: vlastní zpracování

Z výsledků vyplývá, že ve variantě MJP-fluid dochází k převážnému soustředění sledovaných kovových složek do produktové frakce. U zlata dosáhla výtěžnost v produktové frakci 75,00 %, u stříbra 55,56 %, u hliníku 60,51 % a u mědi 68,48 % (viz. tabulka 9). Tyto výsledky potvrzují, že i po začlenění fluidní separace do přímé návaznosti na linku zůstává separační účinek zařízení zachován.

3. Výsledky měření

Porovnání variant MJP-offline a MJP-fluid bylo provedeno na základě výtěžnosti sledovaných kovových složek v produktové a odpadové frakci. Cílem bylo ověřit, zda začlenění fluidní separace do přímé návaznosti na linku MJP nevedlo ke snížení separační účinnosti zařízení. Výsledky obou měření ukazují, že po realizaci inovace zůstalo rozdělení sledovaných kovových složek mezi produktovou a odpadovou frakci celkově na srovnatelné úrovni. Nebyly zjištěny takové rozdíly, které by jednoznačně svědčily o negativním vlivu nového konstrukčního a dispozičního uspořádání na funkci fluidního separátoru.

Výraznější odchylka byla zaznamenána pouze u mědi, jejíž výtěžnost v produktové frakci dosáhla u varianty MJP-offline 82,5 %, zatímco u varianty MJP-fluid 68,48 %. Za pravděpodobné lze považovat, že tento rozdíl souvisel s mírně odlišnými podmínkami na vstupu do fluidního separátoru. Vliv mohla mít zejména rovnoměrnost podávání materiálu a přirozená variabilita vstupní frakce. Současně nelze vyloučit ani vliv lidského faktoru při vyhodnocení vzorku. Z tohoto důvodu je vhodné obdobný test zopakovat, aby bylo možné uvedené vlivy potvrdit nebo vyloučit.

7 Ekonomické zhodnocení realizované inovace

Ekonomické zhodnocení realizované inovace bylo provedeno metodou komparace původního a inovovaného stavu technologické trasy. Hodnocena byla varianta původního uspořádání, ve které byla frakce z linky MJP po mechanickém zpracování dále přepravována k offline fluidní separaci, a varianta inovovaná, ve které byl fluidní separátor začleněn přímo do navazující linky.

Dodatečné výnosy z vyšší čistoty nebo vyšší výtěžnosti produktových frakcí nebyly do ekonomického modelu zahrnuty. Na základě vyhodnocení laboratorního měření totiž nebyl mezi porovnávanými variantami prokázán takový rozdíl, který by odůvodňoval uvažovat navýšení tržeb z produkce. Ekonomický přínos inovace je proto v této práci interpretován konzervativně pouze jako efekt úspory nákladů.

7.1 Roční úspory dosažené odstraněním mezioperační dopravy

Mezi přímé náklady je zahrnut provoz manipulační techniky. Cena plynu na jednu směnu činí 320 Kč. Jedná se o aktuální cenu evidovanou nákupním oddělením v době zpracování kalkulace. Roční fond provozu je uvažován ve výši 252 směn. Současně je zohledněno, že manipulace s produktem z linky MJP představuje přibližně 55 % pracovní náplně daného pracoviště. Roční náklad na spotřebu plynu připadající na tuto část provozu tak činí:

$$U_{manip} = 320 \cdot 252 \cdot 0{,}55 = 44\,352\ Kč$$

kde U_{manip} - provozní náklady manipulační techniky.

Mezi nepřímé náklady byly zařazeny personální náklady na pracovníka manipulační techniky a roční odpis vysokozdvižného vozíku. Celkový roční náklad na pracovníka činí 800 000 Kč. Vzhledem k tomu, že činnosti související s manipulací produktu z linky MJP představují přibližně 55 % jeho pracovního vytížení, připadá na hodnocenou část provozu částka 440 000 Kč za rok.

Roční odpis vysokozdvižného vozíku činí 165 000 Kč.

Roční úspory dosažené odstraněním mezioperační dopravy jsou stanoveny podle vztahu:

$$U_{rok} = U_{prac} + U_{manip} + U_{odpis}$$

kde:
U_{rok} - celková roční úspora,
U_{prac} - úspora personálních nákladů,
U_{manip} - úspora provozních nákladů manipulační techniky,
U_{odpis} - úsporu odpisů manipulační techniky.

Po dosazení známých hodnot:

$$U_{rok} = 440\,000 + 44\,352 + 165\,000 = 649\,352 \text{ Kč/rok}$$

Tabulka 11 Roční úspory dosažené realizací inovace

Položka	Hodnota
Úspora nákladů na pracovníka	440 000 Kč/rok
Úspora provozu manipulační techniky	44 352 Kč/rok
Úspora odpisu manipulační techniky	165 000 Kč/rok
Celková roční úspora	**649 352 Kč/rok**

Zdroj: vlastní zpracování

Z výsledků vyplývá, že rozhodující složku ekonomického přínosu představuje snížení personální nákladů původního provozního uspořádání.

7.2 Investiční náklady na realizaci inovace

Investiční náklady na začlenění fluidního separátoru do linky MJP byly stanoveny na základě interních podkladů a zahrnují hlavní technologické, stavební a montážní položky nezbytné pro uvedení inovovaného uzlu do provozu.

Přehled investičních položek uvádí tabulka 12.

Tabulka 12 Investiční náklady na začlenění fluidního separátoru do linky MJP

Položka	Hodnota
Filtrační jednotka FJA 89	220 000 Kč
Dávkovací jednotka	214 000 Kč
Šnekový dopravník	180 000 Kč
Ocelová plošina	250 000 Kč
Elektroinstalace a programování	200 000 Kč
Fyzická instalace, 10 % pořizovací ceny	106 400 Kč
Celkové investiční náklady	**1 170 400 Kč**

Zdroj: vlastní zpracování

Za pořizovací cenu pro výpočet fyzické instalace je považován součet uvedených v tabulce 8 základních investičních položek:

$$I_{základ} = 220\,000 + 214\,000 + 180\,000 + 250\,000 + 200\,000 = 1\,064\,000 \text{ Kč}$$

Náklad na fyzickou instalaci je stanoven jako:

$$I_{inst} = 0{,}10 \times 1\,064\,500 = 106\,400 \text{ Kč}$$

Celkové investiční náklady tak činí:

$$I = 1\,064\,000 + 106\,400 = 1\,170\,400 \text{ Kč}$$

7.3 Prostá doba návratnosti investice

Prostá doba návratnosti investice je stanovena podle vztahu:

$$t_n = \frac{I}{U_{rok}}$$

kde:
t_n - prostá doba návratnosti investice v letech,
I - celkové investiční náklady,
U_{rok} - celková roční úspora.

Po dosazení vypočtených hodnot:

$$t_n = \frac{1\,170\,400}{649\,352} \approx 1{,}80 \text{ roku}$$

Výsledná prostá doba návratnosti investice činí přibližně 1,8 roku. Při uvažované výši ročních úspor tak lze realizovanou inovaci hodnotit jako ekonomicky účelné opatření s krátkým návratovým obdobím.

8 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na návrh inovace technologické linky pro zpracování plastových frakcí z elektroodpadu v závodě společnosti ENVIROPOL s.r.o. v Jihlavě. Hlavním cílem bylo navrhnout začlenění fluidní separace do přímé návaznosti na linku MJP tak, aby byla odstraněna mezioperační doprava materiálu mezi linkou MJP a samostatně umístěným fluidním separátorem, a současně ověřit, zda tato změna negativně neovlivní výtěžnost sledovaných kovových složek.

Praktická část byla zaměřena na analýzu stávajícího provozního uspořádání linky MJP a na identifikaci jeho hlavního omezení, kterým byla nutnost převážet hlavní produktovou frakci do vedlejší haly k dalšímu dotřídění. Toto řešení zvyšovalo nároky na manipulaci, pracovní sílu, využití manipulační techniky i meziskladování materiálu.

Na základě provozní a dispoziční analýzy byl vypracován návrh technického řešení spočívající v integraci fluidního separátoru do navazující technologické trasy linky MJP. Součástí návrhu bylo dispoziční umístění zařízení, návrh dopravního uzlu, řešení filtrace a odsávání a vymezení požadavků na elektroinstalaci a řízení.

V průběhu zpracování práce došlo k realizaci navržené inovace v provozu, což umožnilo její experimentální ověření. Laboratorní měření porovnalo původní variantu MJP-offline a inovovanou variantu MJP-fluid na základě výtěžnosti Au, Ag, Al a Cu v produktové a odpadní frakci. Výsledky ukázaly, že po začlenění fluidní separace do linky MJP zůstala separační účinnost zařízení zachována. Rozdělení sledovaných kovových složek mezi produkt a odpad bylo v obou variantách celkově srovnatelné a nebyl prokázán negativní vliv nového uspořádání na funkci separátoru.

Ekonomické zhodnocení bylo provedeno porovnáním původního a inovovaného stavu. Vzhledem k tomu, že laboratorní měření neprokázalo jednoznačné zvýšení výtěžnosti nebo čistoty produktových frakcí, nebyly do hodnocení zahrnuty dodatečné výnosy. Ekonomický přínos inovace byl stanoven konzervativně pouze na základě úspory nákladů dosažené odstraněním mezioperační dopravy. Z ekonomického hlediska lze inovaci hodnotit jako účelné opatření s krátkou dobou návratnosti.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že cíl diplomové práce byl splněn. Byla navržena a realizována inovace technologické linky MJP, bylo ověřeno, že tato změna nevedla ke zhoršení separační funkce fluidního uzlu, a současně byl prokázán její provozní a ekonomický přínos. Práce potvrdila, že začlenění fluidní separace do přímé návaznosti na linku MJP představuje funkční a racionální řešení pro zefektivnění zpracování plastových frakcí z OEEZ.

9 Seznam použitých zdrojů

1) MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Odpadové hospodářství a cirkulární ekonomika. *Mzp.gov.cz* [online]. [cit. 2026-03-31]. Dostupné z: https://mzp.gov.cz/cz/agenda/odpadove-hospodarstvi-a-cirkularni-ekonomika
2) EVROPSKÁ UNIE. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. *Úřední věstník Evropské unie*. 22. 11. 2008, L 312, s. 3–30. Konsolidované znění k 16. 10. 2025 [cit. 2026-01-29]. Dostupné z: http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/2025-10-16
3) EVROPSKÁ UNIE. Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů. *Úřední věstník Evropské unie*. 16. 7. 1999, L 182, s. 1–19. Konsolidované znění k 4. 8. 2024 [cit. 2026-01-29]. Dostupné z: http://data.europa.eu/eli/dir/1999/31/2024-08-04
4) EVROPSKÁ UNIE. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EU ze dne 4. července 2012 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) (přepracované znění). *Úřední věstník Evropské unie*. 24. 7. 2012, L 197, s. 38–71. Konsolidované znění k 8. 4. 2024 [cit. 2026-01-30]. Dostupné z: http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/2024-04-08
5) EVROPSKÁ UNIE. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (přepracované znění). *Úřední věstník Evropské unie*. 1. 7. 2011, L 174, s. 88–110. Konsolidované znění k 1. 1. 2025 [cit. 2026-01-30]. Dostupné z: http://data.europa.eu/eli/dir/2011/65/2025-01-01
6) ČESKO. Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2026 [cit. 11. 3. 2026]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541
7) ČESKO. Zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2026 [cit. 11. 3. 2026]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-542
8) ČESKO. Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů). *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2026 [cit. 11. 3. 2026]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8.
9) MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Rozšiřování systémů EPR. *Mzp.gov.cz* [online]. 2026 [cit. 2026-03-13]. Dostupné z: https://mzp.gov.cz/cz/agenda/odpadove-hospodarstvi-a-cirkularni-ekonomika/cirkularni-ekonomika/cirkularni-ekonomika-0.

10) MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Vybrané ukazatele odpadového hospodářství v oblasti odpadních elektrických a elektronických zařízení za rok 2023. *Mzp.gov.cz* [online]. 2026 [cit. 2026-03-13]. Dostupné z: https://mzp.gov.cz/system/files/2025-08/OCEO-vybrane_ukazatele_elektrozarizeni_2023-20250808.pdf.

11) FANTA, Michael, Eva OPATRNÁ a Aleš ROD. Ekonomická analýza: zpětný odběr elektrozařízení v České republice. *Appliacz.cz* [online], 2024 [cit. 2026-03-14]. Dostupné z: https://www.appliacz.cz/storage/app/media/uploaded-files/EPR_OEEZ_2024_komp.pdf.

12) CUI, Jirang a Eric FORSSBERG. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2003, roč. 99, č. 3, s. 243–263. ISSN 0304-3894. [cit. 2026-03-11]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/s0304-3894(03)00061-x.

13) BOVEA, María D., Vicente PÉREZ-BELIS, Valeria IBÁÑEZ-FORÉS a Pablo QUEMADES-BELTRÁN. Disassembly properties and material characterisation of household small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* [online]. 2016, roč. 53, s. 225–236. ISSN 0956-053X. [cit. 2026-03-11]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.011.

14) SERPE, A., M. BIANCO PRETTO, F. A. DEORSOLA, M. POGGIO a N. RUSSO. Urban mining of electronic waste: a review of current technologies and future perspectives. *Sustainable Horizons* [online]. 2025, roč. 3, s. 1039–1083. ISSN 3049-7434. [cit. 2026-03-04]. Dostupné z: https://doi.org/10.1039/D4SU00548A.

15) ALASSALI, Ayah, Despoina BAROUTA, Hugo TIRION, Yanik MOLDT a Kerstin KUCHTA. Towards a high quality recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment through separation of contaminated fractions. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2020, roč. 387, č. 121741, s. 1–11. ISSN 0304-3894. [cit. 2026-03-04]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121741.

16) OTTIGER, F., P. SCHRÖDER a M. SCHLUEP. Downstream Technology Options for E-waste Recycling. Deutsche *Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH* [online]. 2019. [cit. 2026-03-30]. Dostupné z: https://www.giz.de/de/downloads/giz2019-en-business-option-e-waste-recycling.pdf.

17) WANG, Zhaozheng, Zheyuan CHEN a Qidi WU. Efficient Fine-Grained Object Detection for Robot-Assisted WEEE Disassembly. *Towards Autonomous Robotic*

Systems [online]. 2021, s. 24–35. ISSN 0302-9743. ISBN 978-3-030-64313-3. [cit. 2026-03-12]. Dostupné z: https://link-springer-com.ezproxy.techlib.cz/chapter/10.1007/978-3-030-64313-3_3.

18) KANG, Hai-Yong a Julie M. SCHOENUNG. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2005, roč. 45, č. 4, s. 368–400. ISSN 0921-3449. [cit. 2026-03-30]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.001.

19) HOLUSZKO, Maria E., Amit KUMAR a Rajesh P. SINGH, ed. *Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future*. Newark: John Wiley & Sons, 2022. 352 s. ISBN 978-1-119-74148-0.

20) VEIT, Hugo Marcelo a Andréa Moura BERNARDES, ed. *Electronic Waste: Recycling Techniques*. Cham: Springer International Publishing, 2015. 240 s. ISBN 978-3-319-15714-6.

21) ODPADOVÉ FÓRUM. Elektromagnetická separace odpadů. *Odpadové fórum* [online]. 2005, roč. 6, č. 9, s. 29–30. [cit. 2026-03-10]. Dostupné z: https://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/9-2005-pdf.pdf.

22) ENVIROPOL. Oficiální stránky společnosti ENVIROPOL s.r.o. *Enviropol.cz* [online]. 2026 [cit. 2026-03-30]. Dostupné z: https://www.enviropol.cz/.

23) WANG, Chenwen, Yongshan MA a Wenxuan SUI. The Secondary Flows in a Cyclone Separator: A Review. *Processes*[online]. 2023, roč. 11, č. 10, čl. 2935. ISSN 2227-9717. [cit. 2026-03-12]. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/pr11102935.

24) TRENNSO TECHNIK GmbH. *Návod k obsluze zařízení TTS 600×1000*. 2017. Interní technická dokumentace.

25) GAJDŮŠEK, Jaroslav a Miroslav ŠKOPÁN. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988. 277 s. ISBN 80-214-0036-1.

26) ĎURKOVIČ, Oto. *Dopravní a manipulační stroje*. Praha: Vysoká škola zemědělská v Praze, Technická fakulta, 1995. 154 s. Skripta.

27) URBAN TECHNIK s.r.o. *Návod k obsluze, používání a údržbě: filtrační jednotka FJA 89*. Dolní Libchavy, 2025. Interní technická dokumentace.

28) EBDON, Les, Andy S. FISHER a Stephen J. HILL. *An Introduction to Analytical Atomic Spectrometry*.Chichester: John Wiley & Sons, 1998. 206 s. ISBN 0-471-97417-X.

10 Seznam obrázků a tabulek

10.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma procesu recyklace elektroodpadu 24
Obrázek 2 Schéma rotačních nůžek 27
Obrázek 3 Schéma shredru 27
Obrázek 4 Schéma kladivového mlýnu 28
Obrázek 5 Schéma nožového mlýnu 29
Obrázek 6 Magnetický separátor 30
Obrázek 7 Zásobní násypka se šnekovým dopravníkem 34
Obrázek 8 Ochranný box (housing) linky s popiskami 35
Obrázek 9 Celkový pohled na technologický uzel zahrnující cyklonový odlučovač, vibrační třídič a systém výsypných potrubí pro plnění výstupních frakcí do big-bagů 36
Obrázek 10 Prostorové zobrazení separačního zařízení TTS 600×1000 40
Obrázek 11 Základní rozměrové schéma separačního zařízení TTS 600×1000 41
Obrázek 12 Návrh umístění fluidního separátoru v prostoru linky MJP 42
Obrázek 13 Návrh dispozice dopravníku mezi třídičem a fluidem 44
Obrázek 14 Žlab šnekového dopravníku, uzavřený těsněným krytem 45
Obrázek 16 Prostorové zobrazení filtrační jednotky FJA 89 49

10.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 Hlavní materiály obsažené v OEEZ 19
Tabulka 2 Množství elektrozařízení uvedených na trh a výsledky zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadů ve vybraných letech 22
Tabulka 3 Základní kroky mechanického zpracování OEEZ 24
Tabulka 4 Základní části separačního zařízení TTS 600×1000 40
Tabulka 5 Technické parametry použitého separačního zařízení 41
Tabulka 6 Technické parametry uvažované filtrační jednotky 48
Tabulka 7 Materiálová bilance a výtěžnost vybraných kovů varianty MJP-offline 54
Tabulka 8 Pomocná tabulka pro výpočet měření MJP-offline 55
Tabulka 9 Materiálová bilance a výtěžnost vybraných kovů varianty MJP-fluid 56
Tabulka 10 Pomocná tabulka pro výpočet měření MJP-fluid 57
Tabulka 11 Roční úspory dosažené realizací inovace 59
Tabulka 12 Investiční náklady na začlenění fluidního separátoru do linky MJP 60