

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

ZAŘÍZENÍ PRO RECYKLACI PLASTŮ

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Roman Hruža

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: **Bc. Roman Hrůza**
Studijní program: Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Obor: Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu: doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.

Název práce: **Zařízení pro recyklaci plastů**

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Cíl práce: Cílem závěrečné práce je návrh technického řešení části linky na zpracování plastů. Specificky jde o zařízení, sloužící k drcení plastových materiálů. Je provedena rešerše, obsahující obecný popis problematiky recyklace plastů v kontextu technického řešení příslušného zařízení. V návaznosti na rešerši je zpracován přehled možných technologií a postupů likvidace plastů. Na základě rešerše bude vypracován návrh zařízení pro zpracování různých druhů plastových materiálů. Návrh konstrukčního řešení obsahuje popis způsobu recyklace plastů, koncepci drtících segmentů, výpočet působících sil a návrh pohonu zařízení v kontextu deklarované linky. Výstupem práce je technická dokumentace ve formě 3D modelů a 2D výkresů, výpočetní zpráva a technický popis navrženého zařízení.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na návrh technického řešení části linky pro recyklaci plastů, konkrétně dvouhřídelového drtiče plastových materiálů. Teoretická část této práce se zabývá problematikou recyklace plastů, obsahuje přehled plastových materiálů, popisuje dostupné metody likvidace plastového odpadu a analyzuje různé principy drcení a typy drtičů. Praktická část zahrnuje návrh konstrukčního řešení drtiče, výběr vhodného pohonného systému, výpočet působících sil, dimenzování klíčových komponent a návrh drtících segmentů. Výstupem diplomové práce je technická dokumentace obsahující 3D modely, 2D výkresy a nákupní specifikace katalogových dílů. Závěr práce hodnotí výsledný návrh a jeho možné uplatnění v praxi.

Klíčová slova

Recyklace plastů; drcení plastů; dvouhřídelový drtič; konstrukční návrh; výpočetní zpráva

Abstract

The diploma thesis focuses on the design of a technical solution for a part of a plastic recycling line, specifically a twin-shaft shredder for plastic materials. The theoretical part of this thesis deals with the issue of plastic recycling, provides an overview of plastic materials, describes available methods of plastic waste disposal and analyses different shredding principles and types of shredders. The practical part includes the structural design of the shredder, the selection of a suitable drive system, the calculation of acting forces, the dimensioning of key components and the design of shredding segments. The output of the thesis is technical documentation, including 3D models, 2D drawings and a purchasing specification for catalogue parts. The conclusion of the thesis evaluates the final design and its potential application in practice.

Keywords

Plastic recycling; plastic shredding; twin-shaft shredder; design proposal; calculation report

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 16. dubna 2025

.....

Podpis studenta/ky

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Bc. Karlu Dvořákovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a konzultace. Mé poděkování patří rovněž zástupcům společnosti Žďas, a.s., za vstřícnost, odbornou spolupráci a poskytnutí potřebných materiálů. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým přátelům za jejich neustálou podporu během zpracování diplomové práce i celého studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk.....	9
Úvod	12
1 Teoretická část	13
1.1 Plasty.....	13
1.2 Problémy s plastovým odpadem	18
1.3 Recyklace plastů	19
1.4 Přehled možných technologií a postupů likvidace plastů	22
1.5 Přehled technologií pro drcení plastů	28
1.6 Typy drtičů a mlýnů	31
2 Praktická část	38
2.1 Specifikace požadavků na zařízení.....	38
2.2 Software pro návrh 3D modelů a tvorbu výkresové dokumentace	39
2.3 Návrh zařízení pro drcení plastů.....	39
2.4 Výpočet působících sil a návrh pohonného systému dvouhřídelového drtiče.....	44
2.5 Volba pohonu drtiče	53
2.6 Výsledný návrh drtícího zařízení.....	55
3 Diskuze	65
Závěr	67
Seznam použité literatury	68
Přílohy.....	72

Seznam obrázků

Obr. 1: Příklad kaskádové recyklace	20
Obr. 2: Typy rotorového nože	30
Obr. 3: Rotor jednohřídelového drtiče.....	32
Obr. 4: Pracovní prostor dvouhřídelového drtiče	33
Obr. 5: Pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče.....	34
Obr. 6: Mlecí komora nožového mlýna.....	35
Obr. 7: Reverzní kladivový mlýn.....	36
Obr. 8: Talířový nárazový mlýn	37
Obr. 9: Koncepční návrh drtících kotoučů.....	42
Obr. 10: Koncepční návrh distanční vložky	43
Obr. 11: Koncepční návrh pevných segmentů	44
Obr. 12: Základní rozměry evolventního drážkování	52
Obr. 13: Plochá převodovka s motorem	54
Obr. 14: Hřídel drtícího zařízení	56
Obr. 15: Část rotoru drtícího zařízení.....	56
Obr. 16: Drtící komora	57
Obr. 17: Boční pohled na drtič	58
Obr. 18: Pohled na drtič ze spodní strany	58
Obr. 19: Ocelová konstrukce drtícího zařízení	60
Obr. 20: Násypka drtícího zařízení	61
Obr. 21: Skluz drtícího zařízení.....	62
Obr. 22: Záchytná vana drtícího zařízení.....	63
Obr. 23: Kompletní konstrukční řešení drtícího zařízení.....	64

Seznam tabulek

Tab. 1: Mechanické vlastnosti běžných plastů.....	45
Tab. 2: Základní parametry evolventního drážkování.....	52
Tab. 3: Základní parametry pohonu.....	54
Tab. 4: Základní parametry frekvenčního měniče	55

Seznam zkratek

A	Střižná plocha břitu [mm^2]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
A_k	Kontaktní plocha břitu [mm^2]
b	Šířka drtících segmentů [mm]
C	Základní dynamická únosnost ložiska [N]
c_a	Hlavová vůle [mm]
C_v	Minimální dynamická únosnost ložiska [N]
d	Minimální průměr hřídele [mm]
D	Průměr roztečné kružnice [mm]
D_b	Průměr základní kružnice [mm]
D_i	Průměr hlavové kružnice náboje [mm]
D_o	Průměr hlavové kružnice hřídele [mm]
D_{re}	Průměr patní kružnice hřídele [mm]
D_{ri}	Průměr patní kružnice náboje [mm]
F	Síla působící na jeden břit [N]
F_{max}	Maximální možná síla při drcení [N]
h	Hloubka řezu [mm]
h_a	Výška hlavy zubu [mm]
HDPE	Polyethylen o vysoké hustotě
h_f	Výška paty zubu [mm]
HRC	Tvrdość podle Rockwella na stupnici C
i	Převodový poměr
k	Maximální počet současně zabírajících břitů
k_1	Korekční koeficient závislý na tvaru břitu
k_B	Koeficient bezpečnosti
L	Trvanlivost ložiska [h]
LDPE	Polyethylen o nízké hustotě
m	Modul [mm]

M_K	Maximální kroutící moment [Nm]
M_O	Ohybový moment [Nmm]
M_{Omax}	Maximální ohybový moment [Nm]
n	Požadované otáčky hřídele [min^{-1}]
$n_{hřídele}$	Otáčky hřídele [min^{-1}]
n_{motor}	Otáčky motoru [min^{-1}]
p	mocnitel závislý na typu ložiska
P	Potřebný výkon motoru [kW]
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
$P_{skutečný}$	Skutečný výkon motoru [kW]
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
P_z	Rozteč zubů [mm]
r	Poloměr drtících kotoučů [m]
R_A	Reakční síla v bodě A [N]
R_B	Reakční síla v bodě B [N]
R_m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
S_F	Bezpečnostní faktor
ΣF_Y	Součet sil působících ve svislém směru [N]
ΣM_B	Součet momentů působících na těleso vůči bodu B [Nmm]
t_a	Tloušťka zubu na hlavové kružnici [mm]
t_b	Tloušťka zubu na patní kružnici [mm]

t_v	Tloušťka zubu na roztečné kružnici [mm]
W_k	Modul průřezu v krutu [mm ³]
W_o	Modul průřezu v ohybu [mm ³]
z	Počet zubů
α	Úhel záběru [°]
η	Účinnost elektromotoru
σ_{dov}	Dovolené napětí materiálu [MPa]
σ_{kt}	Mez kluzu v tahu [MPa]
σ_o	Normálové napětí z ohybu [MPa]
σ_{red}	Redukované napětí [MPa]
τ_{DK}	Dovolené napětí v krutu [MPa]
τ_k	Napětí v krutu [MPa]
τ_s	Mez pevnosti ve smyku [MPa]
ω	Úhlová rychlost [s ⁻¹]

Úvod

Problematika recyklace plastů a nakládání s plastovým odpadem je v dnešní době stále aktuálnější téma, které hraje klíčovou roli v ochraně životního prostředí a udržitelném rozvoji. Plasty jsou díky svým zajímavým vlastnostem a relativně nízkým výrobním nákladům široce využívány v průmyslu i běžném životě. Jejich nadměrná produkce však vede k rostoucím ekologickým problémům, zejména v souvislosti s jejich dlouhou dobou rozkladu. Recyklace plastů proto představuje důležitou strategii, která umožňuje nejen snižovat množství odpadu, ale také efektivně využívat suroviny a minimalizovat negativní dopady na životní prostředí. Efektivní zpracování plastového odpadu zahrnuje několik technologických postupů, přičemž drčení hraje zásadní roli v mechanické recyklaci.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem technického řešení dvouhřídelového drtiče plastových materiálů jako klíčové součásti recyklační linky. Práce vznikla ve spolupráci s firmou Žďas, a.s., která rozšiřuje své portfolio o zařízení pro zpracování plastového odpadu. Hlavním cílem je navrhnout konstrukční řešení drtiče, který bude schopen efektivně zpracovávat různé typy plastových materiálů a bude splňovat požadavky na spolehlivost, dlouhou životnost a snadnou údržbu.

V rámci práce je nejprve provedena rešerše zaměřená na obecný popis problematiky recyklace plastů v kontextu technického řešení drtících zařízení. V návaznosti na rešerši je zpracován přehled možných technologií a postupů likvidace plastů. Na základě získaných informací je zpracován návrh drtiče, který zahrnuje konstrukční řešení, popis způsobu recyklace plastů, koncepci drtících segmentů, výpočet působících sil a dimenzování klíčových komponent. Součástí návrhu je také volba optimálního pohonného systému s ohledem na výkonové požadavky a provozní zatížení.

Výsledkem práce je technická dokumentace, která obsahuje 3D modely a 2D výkresy klíčových součástí drtiče, nákupní specifikace nakupovaných dílů, výpočetní zprávu a technický popis navrženého zařízení. Diplomová práce tak poskytuje komplexní podklady pro další vývoj a nabízí řešení, které může být uvedeno do praxe.

Motivací pro výběr tohoto tématu je nejen jeho rostoucí význam jak v průmyslovém, tak ekologickém kontextu, ale také můj zájem o konstrukční problematiku. Spolupráce se společností Žďas, a.s. mi navíc umožnila získat cenné praktické zkušenosti a aplikovat teoretické znalosti při návrhu reálného průmyslového zařízení.

1 Teoretická část

Teoretická část práce se zaměřuje na klíčové aspekty problematiky plastů, včetně jejich vlastností, výroby, recyklace a likvidace. Součástí je také přehled technologií používaných k drcení plastů. Cílem této části je poskytnout komplexní přehled, který poslouží jako základ pro návrh zařízení na recyklaci plastových materiálů.

1.1 Plasty

Plasty, dříve známé jako „umělá hmota“ a také označované jako plastické hmoty, jsou uměle vytvořené materiály, které se přirozeně v přírodě nevyskytují. Jedná se o syntetické nebo polosyntetické organické látky tvořené polymery s vysokou molekulární hmotností, obohacené o aditiva. Tato přídavná činidla se přidávají během výroby a zpracování plastů za účelem zlepšení jejich vlastností, jako je houževnatost, pružnost, tvrdost nebo odolnost vůči stárnutí. Mezi běžně používaná aditiva patří plniva, barviva, stabilizátory, antioxidanty, maziva, retardéry hoření či změkčovadla (Pilapitiya a Ratnayake, 2024).

Samotný název „plast“ vychází z řeckého slova „plasticos“, které znamená schopnost formování. Základní suroviny pro jejich výrobu pocházejí z přírodních zdrojů, jako jsou zemní plyn, ropa, uhlí, minerály či rostliny (Pilapitiya a Ratnayake, 2024).

Charakteristické vlastnosti plastů jsou určeny jejich jedinečnou molekulární strukturou, přičemž rozmanitost mezi jednotlivými druhy plastů je způsobena rozdíly v této struktuře. Základem všech plastů je polymerní báze, což jsou makromolekuly složené z velkého množství opakujících se strukturálních jednotek spojených chemickými vazbami, které vytvářejí řetězce. Tyto polymery vznikají procesem polymerizace, kdy se jednotlivé monomery spojují do dlouhých polymerních řetězců chemickou reakcí. Polymerizace se dělí na dvě hlavní kategorie: adiční a kondenzační (Jansen, 2016).

Adiční polymerizace zahrnuje spojování monomerů obsahujících dvojnou vazbu uhlík – uhlík, přičemž nedochází ke ztrátě atomů nebo molekul. Typickými produkty tohoto procesu jsou polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid a polystyren. Naopak kondenzační polymerizace probíhá postupným spojením molekul s různými funkčními skupinami, přičemž vznikají vedlejší produkty, jako voda nebo metanol. Mezi běžné polymery vytvořené touto reakcí patří polyestery, polyamidy nebo polykarbonáty (Jansen, 2016).

Plasty jsou vysoce všestranné materiály a mají řadu užitečných vlastností, díky kterým se hodí pro širokou škálu aplikací jak v oblasti spotřebitelských produktů, tak v průmyslu. Mezi hlavní výhody plastů patří jejich nízká hustota, jenž zajišťuje velmi nízkou hmotnost. Většina běžných technologických materiálů je mnohem těžší než voda, například železo je 7,8krát těžší a olovo až 11,3krát. Plasty jsou většinou pouze o něco těžší než voda (maximálně 1,5krát), přičemž některé plastové materiály, jako pěnový polystyren, mohou být dokonce lehčí než voda. Mnohé plasty vykazují vynikající izolační vlastnosti vůči teplu i elektrickému proudu. Dalšími výhodami plastů je jejich snadná tvarovatelnost, pružnost, houževnatost a vysoká pevnost. Také jsou chemicky stabilní, odolné vůči korozi a mořské vodě. Mohou být snadno barvené, přičemž některé druhy jsou dokonce průhledné a disponují nízkými náklady na zpracování (de Naoum, 2023).

Nicméně plasty mají i své nevýhody. Obvykle mají nízkou tepelnou odolnost, což je činí náchylnými k hoření a některé typy jsou méně pevné. Navíc jejich vysoká odolnost vůči rozkladu způsobuje, že plasty znečišťují životní prostředí, jelikož se nerozkládají přirozeně. Odstranění plastového odpadu je proto velmi problematické. Dalším zásadním problémem je, že většina typů plastů je vyráběna na bázi ropy, což znamená, že nejsou obnovitelné. To zvyšuje závislost na fosilních palivech a přispívá k vyčerpávání těchto zdrojů (de Naoum, 2023).

1.1.1 Historie a vývoj plastů

Historie plastů se začala psát v roce 1856, kdy anglický chemik Alexander Parkes vytvořil první druh umělého plastu nazývaný celuloid. Tento materiál, připomínající slonovinu, našel využití především v zubním lékařství jako náhrada drahého vulkanizovaného kaučuku. Před vynálezem plastů lidé využívali přírodní materiály, jako např. dřevo, keramika, sklo či skutečná slonovina. Celuloid se tedy stal průkopníkem na poli umělých hmot a položil základy moderní éry plastů (Tecnofer, c2025).

Další významný milník přišel v roce 1907, kdy belgicko-americký chemik Leo Baekeland vynalezl bakelit, jenž je označován jako první termoset. Tento materiál se díky své odolnosti vůči teplu a chemikáliím rychle rozšířil do průmyslu a domácností. Používal se například při výrobě domácích elektrospotřebičů, hraček, krabic nebo dokonce palubních desek automobilů. Bakelit byl revoluční materiál, avšak jeho chemická stabilita znemožňovala opětovné zpracování. I přes tyto skutečnosti měl zásadní vliv na rozvoj plastových technologií (Tecnofer, c2025).

Vývoj pokračoval a roku 1912 byl patentován německým chemikem Frankem Klattem polyvinylchlorid (PVC). V roce 1913 přispěl Jacques Edwin Brandenberger objevem celofánu, což je průhledný materiál na bázi celulózy. Díky své pružnosti a nepropustnosti si rychle našel uplatnění v balení potravin a dalších výrobců. Následně, ve 20. letech 20. století, se začaly objevovat první pokusy o syntézu plastů z ropy, což nakonec vedlo k objevu nylonu v roce 1935. Americký chemik Wallace Carothers tímto syntetickým textilním vláknem zahájil éru syntetických vláken, která transformovala textilní průmysl. Nylon se začal výrazně využívat v oděvnictví a také ve válečném průmyslu, například při výrobě padáků (Tecnofer, c2025).

Během druhé světové války došlo k dalším významným pokrokům. V Anglii byl patentován polyethylentereftalát (PET), jehož použití se rychle rozšířilo zejména v leteckém průmyslu a výrobě textilu. Po válce se PET stal klíčovým materiálem pro výrobu plastových lahví. Výrazný průlom dále nastal v 50. a 60. letech 20. století, kdy se hojně začaly využívat materiály jako polyethylen (PE), polystyren (PS) a polypropylen (PP). Tyto materiály našly široké uplatnění při výrobě obalů, domácích potřeb, automobilových součástí a mnoha dalších spotřebních i průmyslových produktů (WasteTrade, c2025a).

Moderní éra plastů však nezůstala jen u masové výroby. Vývoj se zaměřil i na tzv. polymery pro strojírenství, které dnes často nahrazují tradiční kovy. Mezi těmito materiály najdeme polymery jako polykarbonát (PC), polyetheretherketon (PEEK), polytetrafluorethylen (PTFE) nebo polyetherimid (PEI). Kromě nich se stále častěji využívají polymerní kompozity, které kombinují tvrditelné pryskyřice s výtuzemi z materiálů jako skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna. Díky těmto vylepšeným materiálům nacházejí plasty široké využití v automobilovém a leteckém průmyslu, stavebnictví, medicíně a elektronice, kde jsou kladeny požadavky na vysokou pevnost a odolnost (Tecnofer, c2025).

Přestože plasty zásadně přispěly k technologickému pokroku a zlepšení kvality života, jejich masová produkce přinesla také environmentální problémy. Z tohoto důvodu se dnes pozornost soustředí na vývoj udržitelných plastů, jako jsou biologicky rozložitelné materiály, a na zlepšení procesů recyklace. Budoucnost plastů se tedy zaměřuje na hledání rovnováhy mezi jejich ekonomickými přínosy a ekologickými dopady (Tecnofer, c2025).

1.1.2 Rozdělení plastů

Plasty lze klasifikovat na základě různých kritérií. Nejčastěji jsou rozdělovány podle jejich původu, struktury, vlastností, způsobu výroby nebo podle chování při působení tepla.

Klasifikace podle původu dělí plasty na tři podskupiny: přírodní, polosyntetické a syntetické. Přírodní polymery pocházejí z prehistorického období a jsou získané z přírodních zdrojů, jako například škrob, celulóza nebo kaučuk. Naopak syntetické polymery jsou odvozeny z petrochemikálií a patří sem např. polyethylen nebo polystyren. Polosyntetické plasty představují chemicky modifikované přírodní polymerní materiály, jako například plasty na bázi celulózy (Pilapitiya a Ratnayake, 2024).

Podle struktury rozdělujeme plasty na lineární, rozvětvené nebo zesíťované (Pilapitiya a Ratnayake, 2024).

Polymerní materiály lze rozdělit také podle chemických vlastností a struktury makromolekul na amorfní a krystalické (semikrystalické) plasty. Amorfní polymery mají neuspořádanou strukturu makromolekul, zatímco semikrystalické vykazují částečné uspořádání označované jako stupeň krystalinity, který se pohybuje od 40 do 90 %. Semikrystalické polymery tedy obsahují uspořádané oblasti krystalů obklopené amorfními částmi. Tato strukturální rozdílnost ovlivňuje jejich mechanické a tepelné vlastnosti. Amorfní polymery jsou obvykle tvrdé, křehké, čiré a mají skelný přechod, při kterém měknou. Naopak semikrystalické polymery mají jasně definovaný bod tání, jsou houževnatější, odolnější vůči chemickým vlivům a poskytují lepší mechanické vlastnosti. Mezi amorfní plasty patří např. polystyren nebo plexisklo, kdežto mezi semikrystalické řadíme polyethylen nebo polypropylen (Jansen, 2016).

Nejvýznamnější klasifikace plastů je však rozdělení podle chování při působení tepla, kdy rozlišujeme termoplasty, reaktoplasty a elastomery, které jsou podrobněji popsány níže (Peters, 2015).

1.1.3 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, což umožňuje jejich formování. Po ochlazení opět ztvrdnou a získají své původní vlastnosti. Tato schopnost opakovaného měknutí a tuhnutí je umožněna absencí prostorového zesíťování mezi molekulami, což dává termoplastům velkou flexibilitu při zpracování a umožňuje jejich recyklaci. Tento proces je reverzibilní, což znamená, že materiály lze opakovaně roztavit a tvarovat, aniž by došlo ke ztrátě jejich kvality. Teplota tání běžných termoplastů se pohybuje mezi 100 a 130 °C, což umožňuje jejich snadné zpracování (Harper a Petrie, 2003).

Tyto materiály se vyznačují různými vlastnostmi, které lze upravovat pomocí přísad. Největší výhodou termoplastů je ovšem jejich schopnost opakovaného a snadného zpracování. Kromě toho jsou houževnaté, mají dobrou odolnost proti nárazům, nízkou hmotnost, vynikající

elektrické izolační vlastnosti a po ochlazení si zachovávají poměrně vysokou pevnost. Naopak jednou z nevýhod je jejich nižší tepelná odolnost ve srovnání s jinými materiály, například s reaktoplasty. Při vyšších teplotách mohou ztratit pevnost, což omezuje jejich použití v extrémních podmínkách. Také mají nižší chemickou odolnost a jsou náchylné k degradaci vlivem ultrafialového záření (Tech, 2022).

Mezi běžně používané termoplasty patří např. polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid, polystyren, polykarbonát a další. Tyto materiály nachází široké uplatnění a jejich velká využitelnost je důsledkem schopnosti přizpůsobit se různým výrobním procesům. Mezi hlavní metody zpracování patří vstřikování, extruze nebo lisování (Tech, 2022).

Termoplasty se používají v mnoha průmyslových odvětvích. V obalovém průmyslu se využívají na výrobu plastových obalů a lahví, v automobilovém průmyslu na výrobu některých součástí, v textilním průmyslu na výrobu vláken nebo tkaniny, ve stavebnictví jako izolační materiály a potrubní systémy nebo ve zdravotnictví, kde jsou součástí lékařských přístrojů. Tato široká aplikovatelnost dělá z termoplastů klíčový materiál pro moderní průmyslovou výrobu (Tech, 2022).

1.1.4 Reaktoplasty

Reaktoplasty, často označované také jako termosety nebo duroplasty, představují skupinu materiálů, které během svého zpracování podléhají nevratné chemické reakci známé jako vytvrzování. Tento proces vede k vytvoření pevné trojrozměrné sítě, která zajišťuje materiálu jeho konečné vlastnosti a přechod do netavitelného stavu. Vytvrzování bývá nejčastěji iniciováno působením tepla, zářením nebo použitím katalyzátoru. Na rozdíl od termoplastů, které lze opakovaně tvarovat zahříváním, si reaktoplasty po vytvrzení trvale udržují svůj tvar, a to i při působení vysokých teplot (Harper a Petrie, 2003).

Mezi charakteristické vlastnosti reaktoplastů patří vysoká pevnost, tvrdost a odolnost vůči chemickým vlivům a teplotním změnám. Tyto materiály jsou navíc velmi stabilní a vysoce tuhé. Na druhou stranu jsou poměrně křehké, což se projevuje omezenou odolností vůči rázům. Další nevýhodou je nemožnost opětovného tvarování po vytvrzení, což komplikuje jejich recyklaci (Tech, 2022).

Příkladem běžně používaných termosetů jsou epoxidové pryskyřice, fenolformaldehydové pryskyřice (bakelit), polyesterové pryskyřice, polyuretany a melaminformaldehydové pryskyřice. Každý z těchto materiálů má specifické vlastnosti a nachází uplatnění v různých oblastech, avšak všechny spojuje schopnost vytvořit po vytvrzení pevnou a stabilní strukturu. Používají se například při výrobě kompozitních materiálů pro letecký a automobilový průmysl nebo v elektrotechnice jako elektrické izolace. Dále se využívají v nátěrových hmotách, lepidlech, tmelech nebo v konstrukčních prvcích, které vyžadují vysokou pevnost a odolnost (Tech, 2022).

Zpracování termosetů se obvykle provádí metodami, jako je lisování za tepla nebo vstřikování. Klíčovou částí procesu je řízení vytvrzování, které ovlivňuje výsledné mechanické a chemické vlastnosti materiálu. Po vytvrzení nelze materiál dále upravovat, proto jsou kladeny vysoké nároky na přesnost výroby (Tech, 2022).

1.1.5 Elastomery

Elastomery jsou polymery s výjimečnými elastickými vlastnostmi, které jim umožňují výrazné protažení a následné rychlé, téměř úplné, navrácení do původního tvaru po odstranění působícího zatížení. Podle definice ASTM D1566 jsou elastomery makromolekulární materiály, které se po deformaci a uvolnění napětí rychle vrátí do přibližně původních rozměrů a tvarů (Harper a Petrie, 2003).

Vyznačují se vynikající pružností, schopností přizpůsobit se tvarovým změnám a nízkou tuhostí, což je odlišuje od ostatních technických materiálů. Typické jsou také jejich nelineární vztahy mezi napětím a deformací, vysoká hystereze a schopnost akumulovat značné množství energie. Některé z těchto materiálů navíc disponují odolností vůči chemikáliím, olejům, ozonu, extrémním teplotám a dalším environmentálním vlivům. Naopak jsou náchylné k oxidaci, stárnutí, ztrátě elasticity při dlouhodobém zatížení a po vulkanizaci je již nelze znovu roztavit (Harper a Petrie, 2003).

Zpracování elastomerů zahrnuje různé technologie v závislosti na jejich chemickém složení. Nejčastěji se používá vulkanizace, což je proces, při kterém se základní polymery modifikují přidáním síry nebo jiných vulkanizačních činidel vytvářejících příčné vazby mezi molekulami, čímž dochází k tvorbě síťové struktury. Tento proces zlepšuje pružnost, mechanické vlastnosti a odolnost vůči vlivům prostředí, jako jsou teplotní extrémy a chemikálie. Před vulkanizací je směs elastomerů zpracovatelná, proto se do ní přidávají plniva, změkčovadla, antioxidanty a další přísady, které optimalizují konečné vlastnosti materiálu. Směs se následně tvaruje do požadované podoby pomocí lisování nebo vytlačování. Po tvarování probíhá samotná vulkanizace, která zajistí, že elastomery již nelze dále tepelně zpracovávat ani tvarovat (Peters, 2015).

Elastomery zahrnují například přírodní kaučuk, styren-butadienový kaučuk, nitril-butadienový kaučuk, butylkaučuk nebo chloropren. Vedle nich existují i speciální typy elastomerů, jako jsou silikonové elastomery, fluoroelastomery a epichlorohydrinové elastomery, které se vyznačují zvýšenou odolností vůči teplotám, chemikáliím a mechanickému namáhání (Peters, 2015).

Díky těmto vlastnostem nacházejí široké uplatnění v aplikacích, které vyžadují schopnost deformace a flexibilitu. Používají se například k výrobě pneumatik, duší, těsnění, průmyslových hadic, dopravních pásů, těsnících tmelů, izolačních materiálů, obuvi nebo spotřebního zboží pro domácnosti. Dále speciální elastomery nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu, letectví, lékařství a elektronice (Peters, 2015).

Specifickou skupinu elastomerů představují termoplastické elastomery, které spojují vlastnosti tradičních elastomerů a termoplastů. Jde o materiály, které jsou při pokojové teplotě pružné a ohebné, ale dají se jednoduše zpracovávat jako termoplasty. Tyto materiály nevyžadují vulkanizaci, což usnadňuje jejich výrobu a recyklaci. Jsou využívány ve formě reaktorově vyráběných polymerů (například termoplastický polyuretan, termoplastický polyamid a termoplastický polyolefin) nebo jako směsi polymerů (např. termoplastický elastomer na bázi styrenu). Díky své odolnosti vůči chemikáliím, ultrafialovému záření, extrémním teplotám a schopnosti tlumit vibrace nacházejí uplatnění v nejrůznějších odvětvích. Termoplastické elastomery přinášejí výhody i díky nízké energetické náročnosti při zpracování, širokému spektru barevných variant a možnosti recyklace, což z nich činí ekologicky šetrnou volbu pro moderní průmysl (KRAIBURG TPE, nedatováno).

1.2 Problémy s plastovým odpadem

Plastový odpad je jedním z nejdůležitějších environmentálních problémů současnosti. Plasty se díky své nízké ceně, univerzálním vlastnostem a dlouhé životnosti staly nedílnou součástí moderní společnosti, avšak jejich masová produkce a nedostatečné nakládání s odpady vedou k závažným důsledkům pro životní prostředí. Od roku 1950 se výroba plastů zvýšila více než 230krát a jejich globální produkce stále roste. Tento vývoj způsobuje výrazné znečištění, zejména v mořích a oceánech, kde každý rok skončí miliony tun plastového odpadu. Kromě toho dochází vlivem plastového odpadu také ke kontaminaci půdy a znečištění ovzduší. V roce 2019 vyprodukovala výroba a spalování plastů více než 850 milionů tun skleníkových plynů, což výrazně přispívá ke změně klimatu (Samosebou, 2024).

Odpady z plastů, včetně mikroplastů, znečišťují i přírodu. Byly nalezeny nejen ve vodních ekosystémech, ale také v půdě, vzduchu či dokonce v dešťové vodě na odlehlých místech, jako je například Antarktida. Tyto malé částice plastů představují hrozbu nejen pro přírodu, ale i pro lidské zdraví, protože pronikají i do potravního řetězce. Odhaduje se, že plasty v oceánech ohrožují více než 700 druhů mořských živočichů, přičemž jednou z největších ekologických hrozeb je Velká tichomořská odpadová skvrna. Tato obrovská masa plovoucího plastového odpadu má rozlohu přes 1,6 milionu kilometrů čtverečních, což odpovídá více než dvojnásobku velikosti Francie. I když je tato skvrna největší, tak není jediná a podle výzkumů obsahují všechny tyto skvrny dohromady kolem 270 000 tun plastového odpadu (Samosebou, 2024).

Přestože se problém plastového odpadu často spojuje s pobřežními oblastmi, odpovědnost nesou všechny státy. Řeky, jako Dunaj v Evropě nebo Mekong v Asii, každoročně přenášejí desítky tisíc tun plastů do moří, čímž zhoršují globální znečištění. Podle výzkumu končí 79 % plastového odpadu na skládkách nebo ve volné přírodě, 12 % je spalováno, zatímco jen malá část je recyklována. Tento stav je důsledkem nedostatečné infrastruktury, vysokých nákladů na zpracování a složitosti třídění plastových materiálů (Samosebou, 2024).

Jedním z nejnaléhavějších problémů jsou jednorázové plastové výrobky, které mají krátkou životnost, avšak jejich rozklad v přírodě trvá desítky až stovky let. Například plastové kelímky, brčka nebo příbory z plastů se rozkládají přibližně 70 let a některé obaly se nikdy nerozloží. Dalším problémem jsou cigaretové filtry pohozené v přírodě, které obsahují mikroplasty a další škodlivé látky, jež jsou uvolňovány do prostředí (Samosebou, 2024).

Řešení problémů spojených s plastovým odpadem vyžaduje komplexní přístup. Klíčovou roli hraje prevence vzniku odpadu, třídění, recyklace a vývoj nových alternativních materiálů. Zásadní je také změna spotřebitelského chování a nahrazení jednorázových plastových výrobků opakovaně použitelnými alternativami. Kroky směrem k udržitelnosti pomáhají nejen snižovat množství plastového odpadu, ale také chránit přírodní ekosystémy a zdraví budoucích generací (Samosebou, 2024).

1.3 Recyklace plastů

Recyklace plastů je klíčovou metodou likvidace odpadu, jejímž cílem je znovu využít plastový materiál a vrátit ho zpět do výrobního cyklu. Tento proces má zásadní význam nejen pro ochranu životního prostředí, ale také pro šetrné využívání přírodních zdrojů a snižování uhlíkové stopy spojené s výrobou a likvidací plastů (WasteTrade, c2025b).

Problematika plastového odpadu, popsána v předchozí kapitole, zdůrazňuje naléhavou potřebu efektivních a udržitelných řešení. Recyklace plastů představuje jednu z klíčových možností, jak minimalizovat množství odpadu končícího na skládkách nebo v přírodě a současně snižovat závislost na těžbě primárních surovin. Přestože přináší mnoho výhod, tak není bez komplikací. Úspěšná recyklace závisí na kvalitě jednotlivých procesů, dostupné infrastruktuře a úrovni technologického pokroku. Navíc se potýká s celou řadou technických, ekonomických a marketingových výzev (WasteTrade, c2025b).

Jedním z dlouhodobých cílů je prevence vzniku plastového odpadu a hledání alternativních materiálů, které by mohly plasty nahradit. Nicméně recyklace zůstává nezbytným mezistupněm při přechodu na udržitelnější nakládání s materiály. Klíčem k efektivnímu využití tohoto procesu je pochopení jeho jednotlivých fází a řešení problémů, jako je komplikované třídění a degradace materiálů při opakovaném zpracování (Khait, 2003).

Jednou z hlavních výzev recyklace plastů je nedostatečná infrastruktura. V mnoha regionech chybí adekvátní zařízení pro sběr, třídění a zpracování plastového odpadu. Bez moderních technologií a logistických systémů dochází často k tomu, že plasty končí na skládkách nebo ve spalovnách, místo aby byly recyklovány (Khait, 2003).

Důležitou roli hraje také třídění plastů. Různé typy plastových materiálů mají odlišné chemické složení a vlastnosti, což vyžaduje specifické postupy při jejich recyklaci. Tato rozmanitost klade vysoké nároky na technologie třídění a na vzdělávání veřejnosti ohledně správného nakládání s odpady. K tomu se přidává problém kontaminace plastů zbytky potravin nebo jinými látkami, které výrazně komplikují recyklační procesy a mnohdy znemožňují jejich další využití (Khait, 2003).

Dalším problémem je degradace materiálů při opakovaném zpracování. S každým recyklačním cyklem dochází ke zhoršení mechanických a chemických vlastností plastů, což omezuje možnosti jejich opětovného použití a snižuje kvalitu výsledných produktů (Khait, 2003).

Ekonomická stránka recyklace představuje rovněž významnou překážku. V mnoha případech je výroba nových plastů z primárních surovin levnější než recyklace těch stávajících. Cena ropy a dalších vstupů přitom ovlivňuje konkurenceschopnost recyklovatelných materiálů na trhu (Khait, 2003).

V neposlední řadě je problémem nízké povědomí veřejnosti o důležitosti správného třídění odpadu a absence dostatečně motivující legislativy. Úspěch recyklace vyžaduje nejen technické inovace a modernizaci infrastruktury, ale také investice do vzdělávání, osvětových kampaní a vytvoření efektivní legislativy, která podpoří recyklaci na všech úrovních společnosti (Khait, 2003).

1.3.1 Metody recyklace plastů

Plastové odpady lze recyklovat a tím přeměnit na nové produkty několika způsoby, které se liší podle způsobu zpracování a výsledného využití materiálu. Tyto metody lze rozdělit do následujících kategorií:

- primární recyklace,
- sekundární recyklace,
- terciární recyklace,
- kvartérní recyklace.

Primární recyklace, označována také jako recyklace v uzavřené smyčce, představuje mechanické přepracování plastového odpadu na produkt se stejnými vlastnostmi jako původní materiál. Tento typ recyklace se používá v případech, kdy lze plastový odpad oddělit od kontaminantů a zajistit minimální degradaci materiálu během přepracování (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009). Nejčastěji se jedná o recyklaci odpadu z výroby, například přebytků materiálu, které se vyznačují vysokou kvalitou. Po rozdrčení jsou tyto plasty znovu zapojeny do výrobního procesu, například přiměsí k původnímu materiálu nebo jako mezivrstva u vícevrstvých polotovarů (Hopmann a kol., 2022).

Sekundární recyklace je nejrozšířenější metoda a odpovídá běžně používanému pojmu mechanická recyklace (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009). Při tomto procesu dochází k fyzickému zpracování plastových materiálů bez změny jejich chemické struktury. Mechanická recyklace zahrnuje drčení plastového odpadu na vločky, jejich praní, sušení a následné zpracování pomocí tavení, které slouží např. k výrobě plastových obalů nebo komponentů do automobilů. Sekundární recyklace obvykle zpracovává spotřebitelský odpad, který se shromažďuje smíchaný s různými druhy plastů. Nevýhodou je, že opakovaná mechanická recyklace způsobuje degradaci materiálu, což snižuje kvalitu výsledného produktu. Tento jev vede k tzv. „downgradingu“ neboli kaskádové recyklaci, která je vyobrazena na obrázku 1. Zde například PET láhev může být přepracována na plastovou fólii, která se dále využije na textilní materiály či obalové produkty. S každým cyklem se však kvalita materiálu postupně snižuje, což limituje další použití. Na druhou stranu mezi hlavní výhody patří nižší finanční náročnost a široká aplikovatelnost pro běžné plasty, jako jsou PET, HDPE nebo PP (Plastics For Change, 2021).



Obr. 1: Příklad kaskádové recyklace

Zdroj: Plastics For Change (2021)

Terciární recyklace, známá jako chemická nebo surovinová recyklace, umožňuje rozklad plastů na úrovni chemických stavebních bloků. To znamená, že pomocí různých chemických procesů, jako je například pyrolýza nebo depolymerizace, lze rozkládat polymery na jejich základní chemické složky (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009). Tímto způsobem lze obnovit kvalitu materiálu na úroveň původního surového stavu, což umožňuje získané chemické látky znovu použít pro výrobu nových plastů, paliv nebo jiných chemikálií. Výhodou je možnost recyklace i vícevrstvých a silně znečištěných plastů, které nelze mechanicky recyklovat, ale nevýhodou je vysoká energetická náročnost a nákladnost technologie (Plastics For Change, 2021).

Poslední kategorií je kvartérní neboli energetická recyklace. Zde se využívá plastový odpad jako zdroj tepelné a elektrické energie prostřednictvím spalování. Tato metoda nachází uplatnění zejména v regionech s omezeným prostorem pro skládky. Výhodou je redukce objemu odpadu na skládkách a efektivní využití nerecyklovatelných plastů. Naopak mezi nevýhody patří vysoké riziko emisí a investiční náročnost spalovacích zařízení (Plastics For Change, 2021).

1.3.2 Společné procesy recyklace plastů

Každý druh recyklace plastů se vyznačuje specifickými postupy, které odpovídají jejich technologickým přístupům. I když se tyto metody liší ve zpracování odpadu a ve využití výsledného materiálu, tak některé kroky jsou pro všechny druhy recyklace společné. Mezi tyto sdílené procesy patří sběr, doprava, třídění a čištění, které tvoří nezbytný základ efektivního zpracování plastového odpadu (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

Sběr plastového odpadu je prvním krokem recyklace a zahrnuje shromažďování plastů z různých zdrojů, jako jsou domácnosti, průmyslové podniky nebo komerční sféra. Tento odpad je následně přepravován na recyklační stanice, kde je dále tříděn a zpracováván. Správná organizace sběru odpadu je klíčová pro zajištění kontinuálního přísunu materiálu, minimalizaci logistických nákladů a emisí spojených s přepravou. Tento krok je shodný u všech druhů recyklace, protože bez něj by následné procesy nemohly být realizovatelné (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

Druhým důležitým krokem je třídění a čištění. Plastový odpad je na recyklační stanici různě tříděn podle druhu materiálu a jeho fyzikálních či chemických vlastností, například na polyethylen, polypropylen nebo PET. Tento proces může být prováděn ručně nebo strojově za pomoci pokročilých technologií, jako jsou optické senzory, magnety, rentgenová detekce nebo infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací. Optické třídiče umožňují detailní rozlišení odpadu podle zbarvení, například na čiré, světle modré nebo zelené materiály. Rentgenová detekce je poté používána k identifikaci a separaci PVC díky vysokému obsahu chlóru. Využívají se také systémy používající infračervenou spektroskopii s Fourierovou transformací, které dokážou analyzovat typ polymeru. Ovšem většina systémů zatím nedokáže zpracovávat flexibilní obaly kvůli technologickým omezením. V recyklačních zařízeních se proto používají vzduchové třídiče nebo jiná zařízení na bázi hustoty, například hydrocyklony, které slouží k odstranění drobných flexibilních materiálů, jako jsou fólie a etikety. Nejlepších výsledků však dosahují systémy s vícenásobnými detektory nebo s víceúrovňovým tříděním (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

V této fázi se také mohou odstraňovat nečistoty, jako jsou zbytky potravin, lepidel, etiket nebo jiných kontaminantů. Nejčastěji se používají mycí linky, které pro čištění využívají vodu.

Další možností je tzv. „suché čištění“, kdy se k odstranění nečistot využívá mechanického tření bez potřeby vody. U mechanické recyklace je kvalita třídění a čistoty zásadní, protože přímo ovlivňuje kvalitu výsledného recyklátu a jeho možnosti dalšího využití. Naopak u chemické recyklace nemusí být třídění tak detailní, ale odstranění příměsí je stále důležité pro zajištění efektivity chemických procesů (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

Na konci třídícího procesu se plastový odpad zhutňuje, aby se snížil jeho objem, minimalizovaly náklady na skladování a zvýšila efektivita přepravy. Tento proces je běžný zejména u plastových fólií, PET lahví a dalších lehkých plastů, které by jinak zabíraly nadměrný prostor. Ke zhutňování se používají vertikální a horizontální lisy, které umožňují vytvářet rovnoměrně stlačené balíky, jež jsou následně svázané. Takto připravené plastové balíky jsou přepravovány do dalších závodů, kde dochází k samotné recyklaci (Li a kol., 2022).

Tyto procesy představují univerzální základ, na kterém jsou založeny jak mechanické, tak chemické metody recyklace plastů. Kvalitní provedení těchto kroků je zásadní pro zajištění vhodné vstupní suroviny, ať už pro výrobu recyklátu nebo pro chemické zpracování (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

1.4 Přehled možných technologií a postupů likvidace plastů

Nakládání s plastovým odpadem představuje jednu z klíčových výzev současné doby. Rozmanitost plastových produktů a různé životní cykly vedou k výrazným rozdílům ve složení plastového odpadu a lze je dle Hopmanna a kol. (2022) rozčlenit do tří kategorií:

- Odpad z výroby (post-production waste) – např. odřezky, přebytky materiálu nebo zmetky. Tento odpad lze snadno třídít a recyklovat.
- Průmyslový odpad (post-industrial waste) – např. přepravní obaly a odpady z distribuce výrobků. Jde o méně čistý a hůře tříditelný odpad.
- Spotřebitelský odpad (post-consumer waste) – např. lahve, obaly a plastové předměty, jejichž životní cyklus již skončil. Jedná se o odpad, který má rozmanité složení a je vysoce znečištěn, což ztěžuje jeho recyklaci.

K efektivnímu zpracování různých typů odpadu bylo vyvinuto množství metod, které sahají od tradičních postupů, jako je skládkování a spalování, až po moderní technologie zahrnující například pyrolýzu nebo solvolýzu. Tyto technologie likvidace plastů můžeme podle způsobu zpracování rozdělit na:

- tradiční metody,
- recyklační metody,
- energetické využití,
- biologické metody,
- pokročilé metody.

Každá z těchto metod má své specifické výhody, omezení a ekologické dopady, které jsou podrobněji představeny v následujících podkapitolách. Tento přehled slouží jako základ pro pochopení technologických možností, které mohou být využity pro zpracování a likvidaci plastů.

1.4.1 Skládkování

Skládkování je nejběžnější tradiční metodou nakládání s odpady, včetně plastových, v mnoha zemích. Jedná se o levný a snadno dostupný způsob, který však způsobuje vážné ekologické a zdravotní problémy. Rostoucí populace vede ke stále většímu nedostatku prostoru pro skládky, což podporuje hledání udržitelnějších metod likvidace plastů (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

Plastový odpad ukládaný na skládky přináší řadu environmentálních rizik. Jelikož se plastové materiály na skládkách rozkládají velmi pomalu, tak dochází ke kontaminaci půdy a podzemních vod toxickými chemikáliemi a mikroplasty. Tyto látky představují významné zdravotní riziko, zejména pro obyvatele v okolí skládek. Mezi další problémy patří únik skleníkových plynů, například metanu a oxidu uhličitého, které se tvoří při rozkladu organických složek odpadu (Li a kol., 2022).

Moderní skládky se od těch tradičních liší tím, že jsou vybaveny technologiemi pro řízení kontaminantů. Obsahují vícevrstvý těsnicí systém na bázi hydraulických bariér, který brání úniku výluhů do půdy. Následně jsou tyto výluhy, včetně kontaminantů, odváděny sběrným systémem a zpracovávány přímo na místě nebo v čistírnách odpadních vod. Významnou součástí je i systém sběru skládkového plynu, který umožňuje jeho využití při výrobě obnovitelné energie (Li a kol., 2022).

Navzdory těmto opatřením zůstává skládkování považováno za nejméně vhodnou metodu likvidace plastového odpadu, jelikož se žádný materiálový zdroj nerecykluje ani jinak nevyužívá. Tím dochází ke ztrátě cenných surovin a narůstání objemu odpadu na skládkách. Technologický rozvoj však směřuje k postupnému snižování skládkování ve prospěch udržitelnějších metod, jako je recyklace nebo energetické využití (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

1.4.2 Spalování plastů

Spalování plastů představuje další tradiční méně ekologickou metodu jejich likvidace, která může být realizována dvěma způsoby. První možností je spalování bez energetického využití, kdy jsou plasty jednoduše zničeny, aniž by byl získán jakýkoliv užitečný produkt. Tento způsob je environmentálně i ekonomicky nevýhodný, protože dochází pouze k uvolnění tepla a emisí bez dalšího přínosu. Druhou možností je spalování s energetickým využitím, které se označuje jako energetická recyklace. V tomto případě je teplo vznikající při spalování využíváno k dalším účelům, což zlepšuje celkovou efektivitu nakládání s odpady (Hopewell, Dvorak a Kosior, 2009).

Energetická recyklace probíhá ve spalovnách s energetickou rekuperací, které jsou schopné využít vzniklé odpadní teplo k výrobě elektrické energie nebo k ohřevu vody pro teplárenské účely. Výhodou je, že tento proces snižuje objem odpadu až o 90 %, zároveň pomáhá snižovat spotřebu fosilních paliv a také odstraňuje plasty, které nelze recyklovat mechanickými nebo chemickými metodami. Navzdory výhodám má spalování plastů i významná rizika. Dochází například k uvolňování nebezpečných látek s karcinogenními účinky, jež mohou kontaminovat ovzduší i půdu. Další problém je vznik popela a strusky, které obsahují vysoké koncentrace toxických látek a vyžadují speciální zpracování (Li a kol., 2022).

Dnešní moderní spalovny jsou však vybaveny pokročilými technologiemi na snižování emisí škodlivých látek, jako jsou filtrační systémy pro zachytávání pevných částic, neutralizační

jednotky pro odstraňování kyselých plynů a katalytické konvertory na redukci oxidu dusíku (Li a kol., 2022).

Podle způsobu využití získané energie lze spalovny rozdělit do několika kategorií:

- Spalovny s výrobou elektřiny – odpadní teplo se využívá k ohřevu vody, která se mění na páru pohánějící turbínu, jenž generuje elektrickou energii.
- Kogenerační spalovny – kombinují výrobu elektřiny a dodávku tepla pro průmyslové využití, kdy se jedná o energeticky efektivnější způsob než pouze čistá výroba elektřiny.
- Spalovny s dodávkou tepla – vyrobené teplo je distribuováno do systémů centrálního vytápění, což snižuje spotřebu paliv v teplárnách.

Využití spaloven s energetickou rekuperací představuje efektivnější nakládání s plastovým odpadem, ale nelze tuto metodu považovat za plnohodnotnou recyklaci. I přesto umožňuje přeměnit odpad na užitečnou energii a jde o ekologicky přijatelnější alternativu k prostému skládkování (Li a kol., 2022).

1.4.3 Mechanická recyklace

Mechanická recyklace plastů je proces, který se zaměřuje na opětovné využití plastových materiálů bez zásadní změny jeho chemické struktury. Princip spočívá v rozdělení odpadu na menší části, které se čistí a následně přetváří do nových produktů. Jde o nejrozšířenější metodu recyklace, jenž se používá výhradně pro termoplasty, které lze opakovaně tavit a tvarovat na rozdíl od reaktoplastů. Tento proces je energeticky a ekonomicky efektivnější než jiné metody, například chemická recyklace. Dle Plastics Europe (c2025) samotný proces mechanické recyklace zahrnuje několik klíčových fází:

- sběr a doprava,
- první třídění,
- drcení a mletí,
- čištění a praní,
- druhé třídění,
- extruze.

Prvním krokem v mechanické recyklaci je sběr a doprava plastového odpadu. Následně probíhá prvotní třídění a čištění. Tyto kroky jsou společné pro všechny druhy recyklace plastů a jsou podrobněji popsány v kapitole 1.3.2.

Po úvodních krocích následuje fáze drcení a mletí, při které je plast rozemlet na malé částice. Tento krok je klíčový pro přípravu materiálu na další zpracování, protože menší frakce materiálu se snadněji čistí a dále zpracovávají (Schmiemann a kol., 2022). Drcení se provádí pomocí různých typů drtičů, které jsou představeny níže v kapitole 1.5.

Další důležitou fází je čištění a praní, jehož účelem je odstranit nežádoucí příměsi a jiné nečistoty. K tomu se využívají různé metody, jako například praní ve vodních nádržích, mechanické tření a vzduchová separace. Následně se očištěný materiál podrobuje další separaci neboli druhotnému třídění. Po zmenšení velikosti odpadu lze lépe využít separační techniky, které jsou zaměřeny na oddělení jednotlivých druhů plastů podle jejich vlastností. Tento krok umožňuje ještě jemnější klasifikaci (Schmiemann a kol., 2022).

Posledním krokem mechanické recyklace je extruze, kdy dochází k tavení a homogenizaci materiálu. Při tomto kroku často dochází k přidání aditiv, která zlepšují vlastnosti recyklátu. Roztavený plast je následně vytlačován pomocí extruderu do formy, kde se z něj vytváří nové granule. Ty mohou být použity jako vstupní surovina pro výrobu nových produktů pomocí technologií, jako je vstřikování, vyfukování, vytlačování nebo lisování. Extruze je tedy klíčový proces, který zajišťuje, že plastový odpad bude mít vhodnou formu pro další využití. Tento uzavřený cyklus snižuje množství primárních surovin potřebných pro výrobu plastů (Schmiemann a kol., 2022).

Mechanická recyklace má řadu výhod, mezi které patří jednoduchost procesu, úspora energie a materiálů a široké využití recyklovaných materiálů. Také pomáhá snížit množství plastového odpadu, který by jinak skončil na skládkách nebo v přírodě, a navíc snižuje náklady na výrobu nových produktů. Naopak přináší i určité nevýhody, jako je degradace plastového materiálu po opakovaném zpracování nebo nutnost důkladného třídění a čištění. I přes tyto výzvy zůstává klíčovou technologií, která přispívá k ochraně životního prostředí a podporuje cirkulární ekonomiku (Schmiemann a kol., 2022).

1.4.4 Pyrolýza

Pyrolýza je termochemický proces recyklace, při kterém dochází k rozkladu polymerních řetězců v plastovém odpadu na kratší uhlovodíkové sloučeniny působením tepelné energie v inertní atmosféře. Tento proces umožňuje přeměnu plastového odpadu na kapalné, plynné a pevné produkty. Díky tomu lze získat plyny, oleje a vosky, které mohou sloužit jako suroviny pro další chemickou výrobu. Pyrolýza je zejména používána pro recyklaci polyolefinů, jako jsou polyethylen a polypropylen, ale existují i nové technologie pro zpracování polystyrenu, polyethylentereftalátu a polymethylmethakrylátu. Tato metoda je vhodná i pro směsný nebo silně kontaminovaný plastový odpad, jež nelze mechanicky recyklovat. Ovšem nevhodná je pro polyvinylchlorid, neboť obsah chlóru komplikuje následné zpracování a vyžaduje speciální technologie pro jeho odstranění (Hopmann a kol., 2022).

Proces pyrolýzy probíhá typicky při teplotách od 300 do 700 °C a výsledné produkty závisí na vstupním materiálu, provozních podmínkách a typu reaktoru. Získané oleje a plyny mohou být následně využity pro výrobu chemikálií, syntetického kaučuku, nových plastových materiálů nebo nafty, avšak vyžadují další separační procesy a zpracování (Hopmann a kol., 2022).

Průběh tepelného rozkladu se liší v závislosti na teplotě, proto rozdělujeme pyrolýzu na pomalou (do 400 °C), střední (400 až 600 °C) a rychlou (nad 600 °C). Vyšší teploty zkracují dobu setrvání plastu v reaktoru a vedou k většímu podílu plynů, zatímco při nižších teplotách vzniká větší množství olejů a vosků (Hopmann a kol., 2022). Dále pyrolýzu rozlišujeme podle reakčního prostředí na různé typy, například na katalytickou, parní, vakuovou, mikrovlnnou či plazmovou (Li a kol., 2022).

Přestože pyrolýza nabízí možnost recyklace plastového odpadu a potenciálně redukuje uhlíkovou stopu v důsledku nahrazení fosilních surovin recyklovanými produkty, tak její využití je omezeno několika faktory. Výtěžek polymerních surovin vhodných pro výrobu nových plastů bývá poměrně nízký. Náklady na výstavbu a provoz těchto zařízení jsou vysoké, což se odráží v ceně recyklovaných produktů, která je vyšší než cena konvenčně vyráběných plastů z ropy. Přesto se pyrolýza považuje za ekologičtější alternativu ke spalování odpadu s energetickým

využitím a předpokládá se, že její podíl na celkovém zpracování odpadů bude v nadcházejících letech narůstat (Hopmann a kol., 2022).

1.4.5 Katalytická depolymerizace

Katalytická depolymerizace je jedním z procesů pro efektivní recyklaci plastového odpadu, přičemž využívá katalyzátory ke snížení teploty a energetické náročnosti štěpení polymerních řetězců. Oproti pyrolýze také umožňuje přesnější kontrolu nad výsledným složením produktů a snížení tvorby zbytkových pevných látek a nežádoucích vedlejších produktů (Li a kol., 2022).

Během katalytické depolymerizace dochází k rozkladu polymerních materiálů na monomery a další nízkomolekulární produkty prostřednictvím termického působení a chemické interakce s katalyzátorem. Typický rozsah teplot se pohybuje mezi 300 až 500 °C podle použitého katalyzátoru, kdy jeho výběr závisí na typu rozkládaného polymeru a požadovaném složení výstupních produktů (Li a kol., 2022).

Existuje mnoho katalyzátorů, přičemž klíčovou roli hrají zeolity, aluminosilikáty a oxidy kovů. Tyto materiály disponují laditelnou kyselostí, která ovlivňuje selektivitu produktů. Vyšší obsah oxidu hlinitého zvyšuje kyselost a podporuje tvorbu plynných frakcí, zatímco nižší kyselost vede k vyšším výtěžkům kapalných produktů. Zeolity se vyznačují vysokou kyselostí a selektivitou, což je činí vhodnými pro výrobu aromatických uhlovodíků, avšak jsou náchylné k deaktivaci v důsledku tvorby koksu. Aluminosilikáty umožňují lepší difuzi polymerních molekul, nabízejí řízenou selektivitu produktů a mají nižší tendenci k tvorbě koksu. Oxidy kovů zase přispívají k redukci produkce lehkých plynů, vážou nečistoty a jsou stabilní i při vysokých teplotách (Li a kol., 2022).

Mezi výhody této metody chemické recyklace patří nižší energetická náročnost oproti pyrolýze, vyšší selektivita produktů a možnost zpracování širokého spektra plastových odpadů. Díky použití vhodných katalyzátorů lze dosáhnout vyššího výtěžku požadovaných produktů a zároveň snížit tvorbu nežádoucích vedlejších látek. Proces také umožňuje využití plastového odpadu jako suroviny pro výrobu chemických sloučenin a paliv, čímž přispívá k cirkulární ekonomice a snižuje závislost na fosilních zdrojích. Na druhou stranu je proces citlivý na složení vstupního materiálu, podléhá deaktivaci vlivem koksování, vyžaduje regeneraci katalyzátorů a je nutné dodržovat optimální provozní podmínky, což zvyšuje technologickou i ekonomickou náročnost (Li a kol., 2022).

Navzdory těmto nevýhodám je katalytická depolymerizace perspektivní metodou, která umožňuje cílenou produkci plynných a kapalných frakcí podle požadavků průmyslového využití s vysokou účinností a při nižší energetické náročnosti. Vývoj nových hybridních katalyzátorů však může ještě zlepšit efektivitu depolymerizace, snížit tvorbu koksu a zvýšit výtěžnost produktů, což představuje důležitý krok směrem k udržitelné recyklaci plastů (Li a kol., 2022).

1.4.6 Solvolýza

Solvolýza je perspektivní chemický proces recyklace plastů, který využívá působení rozpouštědel k rozkladu polymerních řetězců na jejich základní stavební jednotky, jako jsou monomery, dimery či oligomery. Solvolýza se liší od pouhého rozpouštění polymerů, které nevede k rozkladu chemických vazeb, proto se samotné rozpouštění nepovažuje za formu chemické recyklace. Na rozdíl od termolýzy, kam patří pyrolýza nebo gasifikace, probíhá solvolýza při výrazně nižších teplotách a je považována za selektivnější metodu chemické recyklace, která umožňuje obnovu specifických složek polymerů. Nejčastěji se využívá pro materiály, jako jsou PET, polyuretan (PU), polyamid (PA) a PC, ale dokáže recyklovat i kompozitní materiály, kde odděluje výztuže od polymerní matrice. Tento proces lze provádět v různých rozpouštědlech a za různých podmínek při odlišných teplotách a tlacích. Na základě použitého činidla se dále dělí na několik podkategorií, kdy mezi hlavní technologické přístupy solvolýzy patří hydrolýza, methanolýza, glykolýza a aminolýza (Wilhelmus a kol., 2022).

Hydrolýza je založena na reakci polymeru s vodou, která vede k rozkladu polymerních řetězců. Tento proces probíhá v kyselém, zásaditém nebo neutrálním prostředí, obvykle při zvýšené teplotě a tlaku. Běžně se používá při rozkladu PET, kdy výsledkem hydrolýzy je zejména kyselina tereftalová a etylenglykol (Wilhelmus a kol., 2022).

Methanolýza využívá metanol jako rozpouštědlo a probíhá při teplotách mezi 160 až 240 °C. Během tohoto procesu se např. PET rozkládá na dimethyltereftalát a etylenglykol. Výzvou methanolýzy je nutnost odstranění vedlejších alkoholů a dalších produktů, které mohou komplikovat následnou polymerizaci (Wilhelmus a kol., 2022).

Glykolýza je nejstarší metoda depolymerizace PET, při níž se polymer rozkládá reakcí s glykoly při teplotách 110 až 270 °C, kdy jako glykol se nejčastěji využívá etylenglykol. Tento proces produkuje monomery a oligomery, které mohou být opětovně využity pro výrobu nového PET. Glykolýza je však nejefektivnější při zpracování čistých vstupních materiálů, zatímco příměsí barviv nebo kopolymerů mohou proces komplikovat (Wilhelmus a kol., 2022).

Aminolýza je proces využívající amoniak nebo aminy k rozkladu polymerních řetězců. Tato metoda je doposud využívána převážně v laboratorním měřítku a jejich průmyslová aplikace je omezená (Wilhelmus a kol., 2022).

Solvolýza tedy umožňuje recyklaci plastů, které nelze zpracovávat mechanickou cestou a poskytuje vysoce kvalitní suroviny pro výrobu nových polymerů. Hlavní výhodou je získání monomerů v čisté formě, což umožňuje odstranění příměsí, a tím následnou polymerizaci do materiálu s vlastnostmi srovnatelnými s původními surovinami. Oproti pyrolýze se také jedná o energeticky méně náročný proces, který lze aplikovat i na materiály s plnivými. Nevýhodou jsou vyšší náklady na rozpouštědla a následné čištění získaných monomerů, které musí být zbaveny příměsí, jako jsou barviva, stabilizátory a plniva. Dále je nutnost přesně řídit reakční podmínky, aby byla zajištěna co nejvyšší výtěžnost požadovaných produktů (Wilhelmus a kol., 2022).

Své uplatnění nachází především při recyklaci PET lahví, polyuretanových pěn nebo kompozitních materiálů obsahující termosety. I když je její rozšíření menší než u pyrolýzy, tak stále hraje důležitou roli v chemickém zpracování odpadních plastů (Wilhelmus a kol., 2022).

1.4.7 Zplyňování plastů

Zplyňování plastů neboli gasifikace je další technologie termochemického rozkladu plastových materiálů, obsahujících uhlík, za využití tepla, páry a omezeného množství kyslíku. Tento proces umožňuje přeměnu plastového odpadu na syntetický plyn, který se dále využívá jako vstupní surovina v chemickém průmyslu nebo jako palivo pro výrobu tepla a elektrické energie (Hopmann a kol., 2022).

Na rozdíl od pyrolýzy dochází při zplyňování ke vzniku směsi plynů obsahujících především vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan. Výsledný syntetický plyn lze dále využít pro výrobu chemických látek, jako je například metanol, kyselina octová nebo amoniak (Li a kol., 2022).

Zplyňování se odehrává při extrémních teplotách, které se pohybují běžně mezi 700 až 1600 °C a za tlaku v rozmezí 10 až 90 barů. V některých průmyslových aplikacích se využívají dvoustupňové systémy, kde první reaktor pracuje při teplotě 600 až 800 °C, zatímco druhý vysokoteplotní reaktor dosahuje teplot 1300 až 1500 °C (Hopmann a kol., 2022).

Hlavní výhodou je možnost zpracování směsných plastů a kontaminovaného odpadu bez nutnosti důkladného třídění a také vysoká energetická účinnost. Mezi nevýhody této kategorie patří nutnost vysokých investičních nákladů, přísné provozní podmínky a složitost čištění plynu. Proces je ekonomicky výhodný především při velkokapacitním zpracování (Hopmann a kol., 2022).

Přestože zplyňování neumožňuje přímou recyklaci surovin, tak v současné době se jeví jako perspektivní alternativa ke skládkování a spalování komunálního plastového odpadu, protože přispívá k redukci skládkového prostoru a minimalizuje produkci škodlivých emisí. Aktuální výzkum se soustředí na vylepšení technologie v oblasti katalytických metod a kombinovaného zplyňování plastů s biomasou, což zvyšuje celkovou efektivitu a výtěžnost tohoto procesu (Hopmann a kol., 2022).

1.5 Přehled technologií pro drcení plastů

Drcení plastů představuje klíčový krok v mechanické recyklaci plastového odpadu. Tento proces umožňuje snížení objemu materiálu, usnadnění jeho dalšího třídění a přípravu na následné zpracování. Z fyzikálního hlediska se při drcení plastů uplatňují různé způsoby mechanického namáhání. Rumpf již v roce 1965 definoval čtyři základní typy zatížení, ke kterým při tomto procesu dochází. Patří sem tlak mezi dvěma drtícími nástroji, namáhání působící pouze jedním nástrojem, vliv okolního prostředí a přenos energie jinými než mechanickými prostředky. V praxi se nejčastěji využívá kombinace těchto principů, přičemž klíčovou roli hrají síly tlakové, smykové, ohybové a rázové. Ohybové namáhání se uplatňuje v menší míře, avšak v některých případech přispívá k účinnějšímu porušení materiálu. Mezi základní metody tedy patří řezání, stříhání, trhání nebo mletí, které se provádí v různých typech drtičů a mlýnů (Schmiemann a kol., 2022).

Existuje několik technologických přístupů, které se liší konstrukčním řešením, principem činnosti a oblastí použití. Tyto technologie drcení lze rozdělit podle velikosti výstupních částic na:

- Hrubé – výstupní částice větší než 20 mm.
- Střední – velikost výstupních částic od 1 do 20 mm.
- Jemné – výstupní částice menší než 1 mm.

V závislosti na požadavcích konkrétní recyklační linky se jednotlivé technologie mohou kombinovat, přičemž volba drtícího systému závisí na vlastnostech zpracovávaného materiálu, požadované velikosti výstupních částic, celkové kapacitě zpracování a energetické náročnosti procesu (Schmiemann a kol., 2022).

1.5.1 Hrubé drcení plastů

Hrubé drcení, známé také jako předběžné drcení, se provádí pomocí rotačních nůžkových drtičů s pomaloběžnými rotory. Tyto stroje využívají principu stříhu, kdy materiál prochází mezi rotory nebo mezi rotorem a statorem. Řezné nože jsou často doplněny trhacími zuby, které uchopí plastový materiál, přitáhnou jej a rozmělní na páskovité částice odpovídající šířce nože (Schmiemann a kol., 2022).

Mezi další varianty hrubého drcení patří gilotiny, které se používají především pro předběžné zpracování plastových fólií. Dále se využívají šnekové drtiče, jež jsou vhodné zejména pro křehké materiály. Tyto stroje kombinují proces stříhu, trhání a lámání, čímž dochází k efektivnímu drcení různých typů plastového odpadu. Kromě toho se uplatňují také axiální rotační nůžky vyráběné jako jednohřídelové stroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, které pracují na principu řezání (Schmiemann a kol., 2022).

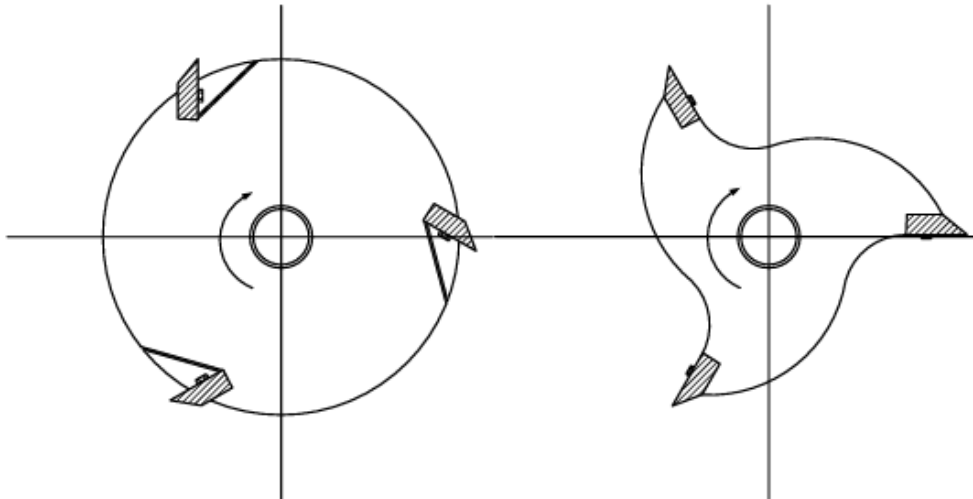
Pro provoz těchto drtičů se často využívají automatické systémy ochrany proti přetížení a reverzní režim chodu, jenž umožňuje zpětný pohyb rotoru v případě zablokování. Pohon může být elektrický nebo hydraulický, ale výhodnější je použití hydraulického pohonu, jelikož poskytuje rovnoměrnější rozložení sil a větší kroutící moment na jednotlivé hřídele (Schmiemann a kol., 2022).

1.5.2 Střední drcení plastů

Pro střední drcení se nejčastěji využívají řezací mlýny, původně vyvinuty po druhé světové válce. Takovéto stroje pracují na principu opakovaného stříhového drcení mezi rotorem a statorem, přičemž materiál je postupně zmenšován, dokud neprojde sítím s definovanou velikostí otvorů (Schmiemann a kol., 2022).

Výkon mlýnu a kvalita výstupního materiálu závisí na několika parametrech, včetně počtu rotorových a statorových nožů. Obvykle je jejich poměr 2:3 nebo 4:5, což zajišťuje optimální poměr mezi účinností stříhu a rovnoměrným opotřebením nožů (Schmiemann a kol., 2022).

Dalším faktorem ovlivňujícím efektivitu drcení je konstrukce rotorových nožů. Existují dva základní typy: uzavřené a otevřené nože. Uzavřené nože, znázorněné vlevo na Obr. 2, zabraňují hlubokému proniknutí materiálu mezi nože a dochází pouze k „okusování“, proto jsou vhodné pro drcení kompaktních a těžkých plastových dílů. Zatímco otevřené nože, zobrazené vpravo na obrázku 2, jsou navrženy tak, aby lépe přiváděly materiál do drtící komory, umožnily hlubší proniknutí do materiálu a tím jej rozřezaly. Z tohoto důvodu se používají pro objemné a tenkostěnné materiály, jako jsou např. plastové fólie. Použití uzavřených rotorových nožů je výhodnější z hlediska tepelného poškození materiálu, protože zpracovávaný materiál je držen na obvodu rotoru a zůstává v drtící komoře kratší čas (Schmiemann a kol., 2022).



Obr. 2: Typy rotorového nože

Zdroj: Schmiemann (2022a, s. 286)

1.5.3 Jemné drcení plastů

Tento proces drcení plastů je nutný pro výrobu regranulátu nebo přípravu materiálu pro vstřikování. Pro tuto aplikaci je většinou materiál předem rozmělněný pomocí pomaluběžného drtiče a následně se používají vysokorychlostní nožové mlýny nebo granulátory, které umožňují dosažení velmi jemných částic s velikostí menší než 1 mm (Schmiemann a kol., 2022).

Speciální kategorií jsou nožové mlýny vybavené sítovými vložkami. Dalším specifickým typem jsou poté drtiče pro zpracování kompozitních materiálů, kde se využívá selektivní drcení. Tento přístup zajišťuje rozdělení materiálu podle jeho složek, což je důležité zejména při recyklaci vícevrstevných obalů nebo plastů kombinovaných s jinými materiály (Schmiemann a kol., 2022).

1.5.4 Hlavní komponenty drtičů a mlýnů

Drtiče a mlýny určené pro zpracování plastových materiálů se skládají z několika důležitých komponent, jako je násypka, drtící komora, třídící síto, systém pro dopravu materiálu, hnací mechanismus a řídicí systém (CaiBeiTech, c2023a).

Násypka slouží jako vstupní komora, do které je shora dopravován nebo navážen plastový odpad před samotným procesem drcení. Její konstrukce usměrňuje materiál do drtící komory a snižuje riziko ucpání. Velikost a tvar násypky se liší v závislosti na typu drceného materiálu a kapacitě stroje (CaiBeiTech, c2023a).

Pod pojmem drtící komora si lze představit pracovní prostor, ve kterém dochází k mechanickému porušení plastového odpadu. Komora je nejčastěji vybavena pevnými a rotujícími noži, jejichž vzájemné působení způsobuje řezání, stříhání nebo trhání odpadu. Pevné nože bývají uchyceny na statoru, zatímco rotující nože se pohybují na rotoru. Kvalita nadrceného materiálu závisí na ostrosti nožů, jejich geometrii a materiálovém složení. Některé drtiče mohou mít ještě dodatečné segmenty pro efektivnější zpracování specifických

druhů plastů, jako jsou například přitlačné mechanismy, chladicí systémy nebo tlumiče vibrací a hluku (CaiBeiTech, c2023a).

Třídící síto je perforovaná nebo mřížková deska, která určuje velikost výsledných částic a zajišťuje jednotnost výstupního materiálu. Síto bývá zpravidla umístěno pod drtícími noži, kde slouží jako kontrolní prvek, který určuje, zda jsou částice dostatečně malé na to, aby prošly otvory síta a opustily drtící komoru. Plastový materiál je v komoře drcen opakovaně, dokud nedosáhne požadovaných rozměrů umožňujících jeho průchod sítem. Velikost a tvar otvorů síta má vliv na rychlost zpracování materiálu. Jemnější síta produkují jednotnější výstupní frakci, ale snižují celkový výkon stroje. Naopak hrubší síta umožňují rychlejší průchod materiálu, avšak za cenu větší variability ve velikosti částic. U některých typů drtičů lze síta snadno vyměnit, což poskytuje flexibilní nastavení výstupní velikosti materiálu podle specifických požadavků na další zpracování. Součástí sít mohou být i samočistící mechanismy, které minimalizují zanášení otvorů (CaiBeiTech, c2023a).

Po rozdrčení je materiál dopravován do sběrné nádoby nebo dále distribuován pomocí dopravníkových systémů. Tyto zařízení jsou důležité zejména pro automatizované linky, kde je materiál následně tříděn nebo připravován k regranulaci. Mezi nejčastěji používané typy patří pásové, šnekové a pneumatické dopravníky. Dopravníkové systémy se v některých případech používají také k přepravě plastového odpadu do násypky drtiče (CaiBeiTech, c2023a).

Drtiče a mlýny jsou poháněny elektromotory nebo hydraulickými systémy. Elektromotory poskytují vysokou účinnost, konzistentní výkon a nízké provozní náklady, což z nich činí nejčastější volbu pro menší drtiče. Pro optimalizaci výkonu lze elektromotory vybavit frekvenčními měniči, které podporují regulaci otáček a směru otáčení. Naopak hydraulické pohony umožňují generovat vysoký kroutící moment, proto se využívají u drtičů určených pro náročné aplikace. Navíc garantují zpětný chod, který pomáhá v případě zablokování nožů. Důležitou součástí hnacího mechanismu je také přenos síly mezi motorem a rotorem drtiče, který se realizuje prostřednictvím převodovek, spojek a převodových mechanismů. Nejčastěji jsou používány čelní a planetové převodovky, které snižují otáčky motoru a zvyšují kroutící moment. Oproti tomu spojky mají ochrannou funkci, kdy zabraňují přetížení stroje (CaiBeiTech, c2023a).

Nedílnou součástí moderních drtičů a mlýnů je také řídicí a regulační systém. K tomu se využívá elektronická řídicí jednotka, která monitoruje a optimalizuje provozní parametry. Tyto systémy zajišťují vyšší efektivitu a prodlužují životnost zařízení (CaiBeiTech, c2023b).

1.6 Typy drtičů a mlýnů

Existuje několik konstrukčních variant drtičů, které lze dělit podle různých kritérií. Z hlediska konstrukce rotoru se rozlišují dva základní typy drtičů: horizontální a vertikální. Horizontální drtiče mají rotor orientovaný vodorovně, zatímco u vertikálních drtičů je rotor umístěn svisle (Junga, 2015).

Dalším kritériem je umístění drtiče, podle kterého se dělí na stacionární a mobilní. Stacionární drtiče jsou pevně instalovány v recyklačních linkách a jsou určeny pro dlouhodobý provoz na jednom místě. Naopak mobilní drtiče jsou přenosné a určené k provozu na různých místech,

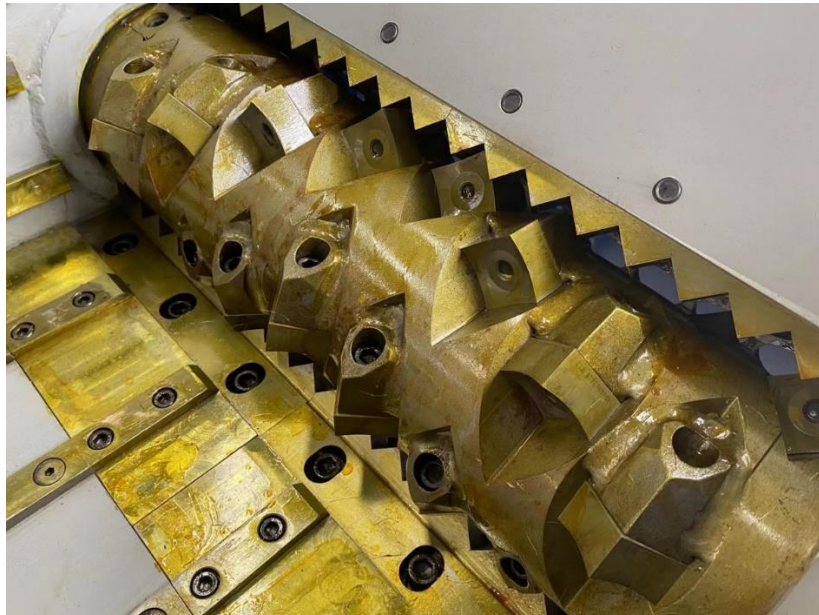
přičemž většina z nich je vybavena pásovým podvozkem, který zvyšuje jejich flexibilitu (Junga, 2015).

Podle principu drcení rozdělujeme drtiče do několika základních skupin: čelistové, odrazové, kuželové, kladivové, válcové a speciální drtiče (Junga, 2015). Pro efektivní recyklaci plastů se nejčastěji využívají jednohřídelové a dvouhřídelové drtiče, které budou podrobněji představeny v následujících podkapitolách spolu s dalšími vybranými typy drtičů a mlýnů používaných ke zpracování plastového odpadu.

1.6.1 Jednohřídelové drtiče

Jednohřídelové drtiče patří mezi nejběžnější typy zařízení pro drcení plastů, ale i dalších materiálů, jako je dřevo nebo papír. Jejich hlavní předností je schopnost nadrtit materiál na frakci v rozsahu od 8 do 50 mm již v jednom stupni drcení. Díky své konstrukci umožňují zpracování i neforemných a houževnatých odpadů. Drtiče jsou dostupné v různých velikostech i konfiguracích, což je činí vhodnými pro široké spektrum recyklačních aplikací (DEOS Technology, c2025a).

Tyto drtiče pracují na principu stříhání, kdy se materiál drtí mezi břity připevněnými na rotoru a pevnými břity statoru. Odpad je do pracovního prostoru vtlačován buď svou vlastní vahou nebo pomocí hydraulického přitlačného systému zajišťující plynulý chod. Pod drtící komorou je umístěno síto, jehož otvory určují konečnou velikost výstupní drtě. Nejdůležitější část přesto tvoří rotor s vyměnitelnými řeznými destičkami (Obr. 3), které jsou upevněny na přivařených držácích, což zaručuje snadnou a rychlou výměnu břitů při jejich otupení. Další hlavní částí je pevné statorové ostří ve tvaru hřebene, které spolupracuje s rotorem při drcení (DEOS Technology, c2025a).



Obr. 3: Rotor jednohřídelového drtiče

Zdroj: Wiscon Envirotech (2021)

Mezi hlavní výhody těchto strojů patří široké spektrum zpracovatelných materiálů, možnost přesného určení velikosti výstupních částic a snadná údržba. Navíc se jedná o poměrně kompaktní zařízení s relativně nízkou hlučností. Na druhou stranu mohou mít omezenou kapacitu při drcení velmi tvrdých materiálů a jejich pořizovací náklady mohou být vyšší než u některých jiných typů drtičů (DEOS Technology, c2025a).

V recyklačních linkách se často používají jako první stupeň drcení a díky pomaloběžnému rotoru a hydraulickému přítlaku se jedná o kompromis mezi nožovými mlýny a dvouhřídelovými drtiči (Terier, c2022-2025a).

1.6.2 Dvouhřídelové drtiče

Dvouhřídelové drtiče jsou robustní stroje navržené pro zpracování materiálů, jako jsou plasty, kartony, dřevo, laminát, pneumatiky a další odpadní produkty. Jejich konstrukce se vyznačuje dvěma paralelně uloženými hřídeli, které jsou osazeny speciálními drticími segmenty, viz obrázek 4. Ty se pomalu a synchronizovaně otáčejí proti sobě a postupně rozměňují vstupní materiál stříhovým a trhacím způsobem. Výsledkem tohoto procesu jsou proužky nebo části odpadu, jejichž velikost je dána šířkou segmentů. Součástí stroje může být stejně jako u jednohřídelového drtiče také přítlačné zařízení (DEOS Technology, c2025b).



Obr. 4: Pracovní prostor dvouhřídelového drtiče

Zdroj: Terier (c2022-2025d)

Vzhledem k jejich vysoké účinnosti se dvouhřídelové drtiče většinou využívají jako první stupeň zpracování odpadu, přičemž hrubě nadrcený materiál následně prochází dalším drcením nebo mletím na jemnější frakce. Ovšem dvouhřídelové drtiče mohou být vyráběny také v menších řadách, které se mohou využít na jemnější drcení s použitím síta. Ve srovnání s jednohřídelovými drtiči disponují větším drticím výkonem a kapacitou, jenž může přesáhnout i 10000 kg/hod. Také dokážou zpracovávat tvrdší materiály a vyznačují se vyšší spolehlivostí. Díky těmto důvodům se jedná o klíčové zařízení v průmyslovém odpadovém hospodářství používané nejen v recyklačních linkách, ale také ve spalovnách či sběrných dvorech (DEOS Technology, c2025b).

1.6.3 Čtyřhřídelové drtiče

Čtyřhřídelové drtiče jsou specializovaná zařízení určená pro zpracování obtížně drtitelných materiálů. Tento typ drtiče se vyznačuje kombinací vlastností dvouhřídelových systémů s přidanou efektivitou vyplývající z čtyřhřídelového uspořádání a použití síta pod drtící komorou. Tím se dosahuje vysoce přesné homogenní velikosti výstupních částic (DEOS Technology, c2025c).

Tyto stroje fungují na principu pomaluběžného stříhání a drcení, které zajišťují čtyři rotující hřídele osazené speciálními noži. Vstupní materiál je vtahován do pracovního prostoru, kde se postupně rozmělní mezi dvěma páry rotorů. Spodní dvojice provádí primární drcení, zatímco horní dvojice pomáhá s dodatečným rozměňováním a zároveň zabraňuje shlukování materiálu ve vstupní násypce. Tento systém je zvláště výhodný při zpracovávání materiálů s tendencí k hromadění, protože horní rotory nepřetržitě promíchávají materiál a vrací jej zpět do procesu drcení, čímž odlehčují chod drtiče, snižují namáhání rotorů a zároveň urychlují celý proces (Terier, c2022-2025b).

Na rozdíl od předchozích zmíněných drtičů jsou čtyřhřídelové navrženy tak, aby si poradily i s náročnějšími odpady, včetně kovových prvků. Další výhodou je, že disponují širším pracovním prostorem a jsou tak vhodné pro objemné odpady (DEOS Technology, c2025c). Obrázek 5 znázorňuje pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče.



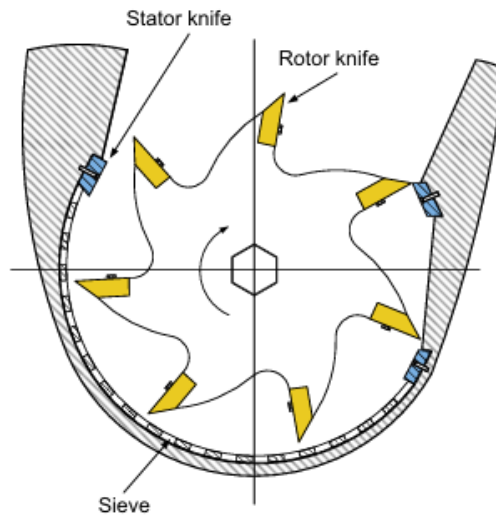
Obr. 5: Pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče

Zdroj: Terier (c2022-2025e)

1.6.4 Nožové mlýny

Jedním z dalších nejpoužívanějších zařízení pro drcení plastů je nožový mlýn. Tento typ mlýnu funguje na principu mechanického odřezávání materiálu. Zpracováváný plast je veden ze vstupní násypky do mlecí komory (Obr. 6), kde ho ostré rotorové nože zachytí a přitlačí proti statorovým nožům pevně umístěným ve skříni mlýnu. Tím dochází k odřezávání částic, které jsou dále postupně rozměňovány, dokud nepropadnou sítím umístěným ve spodní části mlýnu. Velikost výsledné drtě bývá většinou kolem 4 mm, ale lze nastavovat pomocí výměnných sítí.

Rozemletý materiál se následně shromažďuje v zásobníku pod pracovní komorou a zpravidla je odváděn prouděním vzduchu k dalšímu zpracování (1.PLASTCOMPANY, c2025).



Obr. 6: Mlecí komora nožového mlýna

Zdroj: Schmiemann (2022b, s. 285)

Jde o rychloběžné stroje, jejichž rotor se otáčí rychlostí 500 až 1000 otáček za minutu. Pro specifické aplikace se však používají mlýny s nižšími otáčkami. Jsou určeny především ke zpracování plastových odpadů jednoho druhu, ale lze je také použít pro drcení dřeva, papíru nebo textilu (Terier, c2022-2025c).

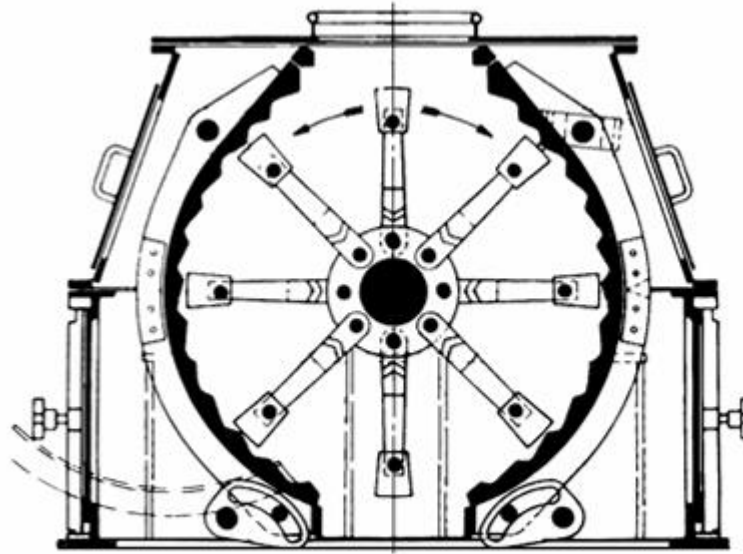
Nožové mlýny jsou široce využívány přímo ve výrobních procesech pro zpracování technologického odpadu. Nejčastěji nachází své uplatnění při technologiích, jako je vstřikování, vyfukování nebo extruze. Zde se používají pro recyklaci vtokových soustav, přetoků, vadných výrobků a odpadních okrajů při výrobě desek, trubek a dalších profilů (1.PLASTCOMPANY, c2025).

Hlavním přínosem je možnost opětovného využití rozemletého materiálu ve výrobě, což snižuje náklady a ekologickou zátěž. Vzhledem k tomu, že nožové mlýny zpracovávají materiál krájením bez výrazného tepelného namáhání, tak nedochází k tepelné degradaci, čímž jsou zachovány jeho původní vlastnosti. Nevýhodou je však nerovnoměrná velikost výsledných částic, kdy materiál obsahuje jak jemné, tak i hrubší částice (1.PLASTCOMPANY, c2025).

1.6.5 Kladivové mlýny

Kladivové mlýny představují technologii určenou ke zmenšování objemu materiálu pomocí mechanického nárazu. Princip jejich činnosti spočívá v rotaci vodorovně uloženého rotoru, na němž jsou upevněna pevná nebo výkyvná kladiva. Ta při své rotaci dosahují dostatečné kinetické energie k účinnému rozdržení vstupního materiálu na menší částice. Proces drcení probíhá tak, že rotující kladiva opakovaně narážejí do zpracovávaného materiálu a zároveň jej vrhají na pancéřové desky skříně, což přispívá k jeho dalšímu rozmělnění. Materiál po dostatečném rozdrčení následně propadáva skrz síťový rošt, který je umístěn v dolní části komory a reguluje velikost výsledných částic. Kvůli rovnoměrnému opotřebením kladiv

a prodloužení jejich životnosti jsou kladivové mlýny často konstruovány jako reverzní, čímž je umožněna změna směru otáčení rotoru (Fries, 2007). Tento typ je možno vidět na obrázku 7.



Obr. 7: Reverzní kladivový mlýn

Zdroj: Fries (2007, s. 233)

Jsou ideální pro drcení tvrdých i křehkých materiálů, avšak nejsou vhodné pro zpracování elastických materiálů, které by mohly tlumit nárazy a zamezit drcení. Nejčastěji se využívají pro zpracování stavebních a demoličních odpadů. V oblasti recyklace plastů se uplatňují zejména při drcení silnostěnných dílů a lisovaných plastových balíků, které by mohly způsobit rychlé opotřebení nožových mlýnů. Výsledný produkt obvykle obsahuje vyšší podíl jemných frakcí, což může být vhodné pro některé aplikace, ale zároveň může vést ke ztížení další separace (Fries, 2007).

Jejich hlavními výhodami je robustnost, vysoká účinnost při drcení tvrdších materiálů a možnost regulace výstupní frakce. Nelze však opomenout vyšší energetickou náročnost a také zvýšenou prašnost (Fries, 2007).

1.6.6 Talířové nárazové mlýny

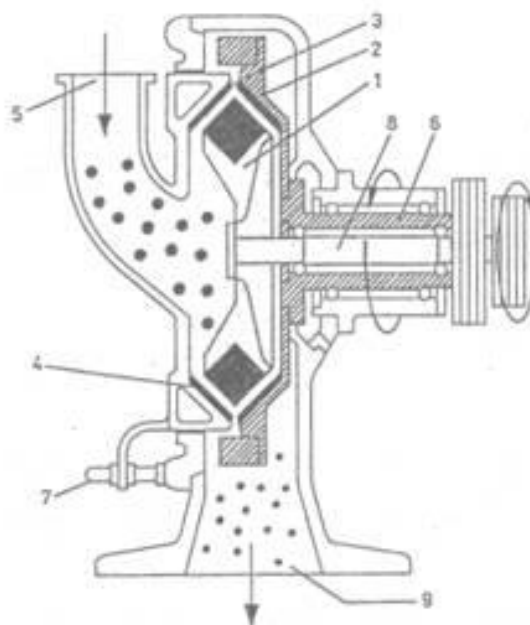
Talířový nárazový mlýn představuje jednu z variant drtících zařízení využívaných pro jemné mletí různých materiálů. Jeho hlavní předností je schopnost rozemlít vstupní materiál na rovnoměrnou frakci. Velikost výsledných částic je ovlivněna nastavením regulační štěrbině mezi bočnicemi, přičemž se zde nepoužívají síta, což eliminuje riziko přehřívání materiálu během mletí (Lenfeld, nedatováno).

Princip činnosti spočívá ve vysokorychlostní rotaci jednoho ze dvou protilehlých drtících talířů (bočnic) s rýhovaným povrchem. Materiál je dopravován násypkou do středu jednoho z disků, odkud je odstředivou silou unášen směrem k okrajům. V těchto místech je nastavena minimální štěrbině, skrze kterou jemně rozemleté částice procházejí ven z pracovní komory. K mletí dochází díky nárazům a tření materiálu o drtící talíře. Výsledné částice jsou následně přesměrovány na jemné síto, kde se oddělují frakce požadované velikosti. Hrubší částice,

které sítím neprojdou, se vrací zpět do drtící komory k opětovnému zpracování (1.PLASTCOMPANY, c2025).

Tento typ mlýna je vhodný pro měkké až středně tvrdé plasty, včetně dřevěných odpadů. Díky své konstrukci umožňuje dosažení velmi jemné zrnitosti až v řádu mikrometrů. Z těchto důvodů činí preferovanou volbu tam, kde je nutné zachovat fyzikální vlastnosti zpracovávaného materiálu a vysokou homogenitu výsledné frakce (Lenfeld, nedatováno).

Na obrázku 8 je zobrazeno schéma talířového nárazového mlýna. Jak uvádí Lenfeld (nedatováno) mezi jednotlivé části tohoto mlýna patří: „1 – rotor, 2 – otáčející se rýhovaná bočnice, 3 – regulovatelná štěrbina, 4 – pevná axiálně posuvná rýhovaná bočnice, 5 – plnicí otvor, 6 – hřídel bočnice, 7 – šrouby, 8 – hřídel rotoru, 9 – výpustní otvor“.



Obr. 8: Talířový nárazový mlýn

Zdroj: Lenfeld (nedatováno)

2 Praktická část

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci se společností Žďas, a.s., což je česká strojírenská společnost sídlící ve Žďáru nad Sázavou. Firma se specializuje na výrobu tvářecích strojů, zařízení pro volné kování a další technologické celky pro zpracování kovových materiálů, včetně strojů na zpracování kovového odpadu. V návaznosti na své zkušenosti v oblasti zpracování kovového šrotu se společnost rozhodla rozšířit svou nabídku produktů také o stroje určené k recyklaci plastového odpadu. Z tohoto důvodu byla vypracována tato závěrečná práce, která je zaměřena na návrh drtícího zařízení pro zpracování plastů.

Cílem závěrečné práce je navrhnout technické řešení drtiče plastů, který bude schopný zpracovávat různé druhy plastových odpadů. Návrh zahrnuje konstrukční řešení drtícího stroje, specifikaci drtících segmentů a návrh optimálního pohonu stroje, přičemž je kladen důraz na robustnost, spolehlivost, jednoduchou údržbu a dlouhou životnost jednotlivých komponent. Součástí návrhu je výpočet působících sil v drtící komoře, dimenzování hlavních konstrukčních prvků a volba vhodného typu pohonu s ohledem na výkon a zatížení.

Výstupem diplomové práce je komplexní technická dokumentace, která zahrnuje 3D modely a 2D výkresy vybraných komponent drtiče plastů, výpočtovou zprávu a technický popis konstrukčního řešení. Navržené zařízení se oproti běžným komerčně dostupným drtičům vyznačuje jednoduchým mechanickým uspořádáním, možností samostatného řízení otáček obou hřídelí a současně svou univerzálností a robustností. Tyto materiály společně s řešením z teoretické části budou sloužit společnosti jako podklad pro další vývoj a případnou výrobu nového zařízení na recyklaci plastových materiálů.

2.1 Specifikace požadavků na zařízení

Společnost Žďas, a.s. stanovila technické požadavky na zařízení určené k recyklaci plastového odpadu. Jedním z hlavních požadavků je návrh stacionárního drtiče plastů, který bude sloužit ke střednímu drcení s cílem efektivně zmenšit objem odpadu a připravit materiál pro další fáze zpracování. Zařízení musí být schopno zpracovávat převážně větší plastové materiály, jako jsou desky, trubky nebo různé objemnější plastové díly. Současně musí zajistit i efektivní drcení menších předmětů, jako jsou plastové kanystry, PET lahve atd. Tento široký rozsah využití je pro společnost zásadní, protože umožňuje vyhovět různorodým požadavkům recyklačních procesů.

Zařízení musí zpracovávat materiál na výslednou frakci o maximální velikosti 5 cm, přičemž menší velikost frakce je preferována pro dosažení vyšší efektivity při přepravě a dalších zpracování rozdrčených částic. Zároveň by měl být drtič univerzální a schopný drtit různé druhy běžných plastů, zejména nejčastěji recyklované typy, jako je polyethylen o nízké hustotě (LDPE), polyethylen o vysoké hustotě (HDPE), PET, PS, PP, PVC a akrylonitrilbutadienstyren (ABS).

Mezi další klíčové požadavky patří kapacita zařízení, která by se měla pohybovat kolem 1500 kg zpracovaného plastového odpadu za hodinu, což odpovídá průmyslovému nasazení a zároveň zajišťuje plynulý provoz. Z hlediska konstrukčního řešení je požadována délka rotoru okolo 1 m, aby se zajistila průchodnost materiálu drtící komorou a současně nedocházelo k velkým průhybům hřídelí.

Dále je požadována robustní konstrukce stroje a dlouhá životnost. Konstrukce musí rovněž umožňovat snadnou údržbu a výměnu opotřebovaných částí. Z důvodu zajištění spolehlivého provozu i při vyšším zatížení je požadováno použití výkonného pohonného systému s ochranou proti přetížení a optimalizací spotřeby energie.

2.2 Software pro návrh 3D modelů a tvorbu výkresové dokumentace

Pro tvorbu 3D modelů a technické dokumentace byl zvolen software Siemens NX ve verzi 2206. Tento program byl vybrán především proto, že se využívá při výuce na Vysoké škole polytechnické Jihlava, kde jsou studentům k dispozici akademické licence, a zároveň ho používá společnost Žďas, a.s. při konstruování podobných průmyslových strojů. Volba tohoto softwaru usnadňuje spolupráci a umožňuje kompatibilitu modelů s firemními standardy.

Siemens NX 2206 umožňuje vytváření parametrických 3D modelů a sestav nezbytných pro návrh a optimalizaci konstrukčního řešení drtiče plastů. Kromě modelování zahrnuje i nástroje pro pevnostní analýzy a přípravu technické dokumentace. Výběr programu byl ovlivněn jeho přehledným uživatelským prostředím a schopností pracovat s rozsáhlejšími sestavami, jako je například zařízení pro recyklaci plastů.

2.3 Návrh zařízení pro drcení plastů

Na základě provedené rešerše uvedené v teoretické části, konkrétně v kapitolách 1.5 Přehled technologií pro drcení plastů a 1.6 Typy drtičů a mlýnů, byl zpracován návrh zařízení určeného pro drcení plastů. Tento návrh se opírá o teoretické poznatky a principy popsané v uvedených kapitolách, které sloužily jako podklad pro stanovení konstrukčních a technologických parametrů.

Jako nejvhodnější řešení pro danou aplikaci bylo zvoleno dvouhřídelové drtící zařízení, které umožňuje efektivní zpracování plastového odpadu a splňuje požadavky společnosti na provozní zařízení. Princip fungování dvouhřídelového drtiče spočívá v proti sobě se otáčejících rotorech, na jejichž obvodu jsou umístěny drtící kotouče se střížnými břity. Materiál je mezi tyto rotory vtahován, postupně stříhán a drcen na požadovanou velikost.

Při návrhu pohonného systému dvouhřídelového drtiče bylo nejprve nutné zvážit vhodný typ pohonu. V průmyslových aplikacích se běžně využívají dvě hlavní varianty: elektrický pohon s převodovkou nebo hydraulický pohon. Hydraulické systémy sice poskytují vysoký kroutící moment při kompaktních rozměrech, avšak nevýhodou je vyšší složitost systému, nutnost častější údržby a možnost úniku hydraulického oleje. S ohledem na požadavky společnosti, vyšší účinnost, jednodušší konstrukci a nižší provozní náklady bylo zvoleno řešení s elektrickým pohonem a převodovkou.

Na základě požadavků na zařízení bylo rozhodnuto, že drtič bude konstruován jako pomaloběžné zařízení, kdy výstupní otáčky hřídele se budou pohybovat v rozmezí 15 až 20 otáček za minutu. Pohon bude realizován pomocí dvou elektromotorů a převodovek, což zajistí dostatečný kroutící moment pro zpracování různých druhů plastového materiálu. Použití dvou menších samostatných pohonů místo jednoho většího centrálního pohonu s ozubeným převodem přináší několik zásadních výhod. Nezávislé řízení obou hřídelů umožní větší flexibilitu provozu, což se může hodit při zpracování různých druhů plastových materiálů, které mohou vyžadovat

rozdílné otáčky nebo kroutící moment. Další výhodou je, že odpadá potřeba ozubených kol pro přenos kroutícího momentu na druhou hřídel, čímž se snižuje mechanická složitost, riziko opotřebení zubů a nároky na údržbu. Dva samostatné pohony také lépe rozloží zatížení mezi hřídele, což zvyšuje spolehlivost zařízení a prodlužuje jeho životnost. Rovněž bude zajištěna účinnější ochrana proti přetížení, vyšší úroveň kontroly nad celým procesem a hladší náběh pohonu. Zároveň se zjednoduší konstrukce, jelikož nebude nutné řešit mazání a těsnění olejové komory pro převody. Současně při zohlednění nákladů na ozubení není z ekonomického hlediska výrazný rozdíl mezi jedním větším a dvěma menšími pohony. Tento koncept je rovněž běžně využíván u konkurenčních průmyslových drtičů, což potvrzuje jeho osvědčenost v praxi.

Při volbě vhodné převodovky pro pohon drtiče bylo zvažováno použití planetové, čelní nebo ploché převodovky. Čelní převodovky jsou jednoduché, spolehlivé a také účinné. Nicméně pro dosažení požadovaného převodového poměru by bylo nutné použít vícestupňovou variantu, což by vedlo k větším rozměrům a vyšší hmotnosti. Planetové převodovky se vyznačují vysokou účinností a schopností přenášet velký kroutící moment při rovnoměrném rozložení zatížení mezi více planetových kol, čímž se značně zvyšuje její spolehlivost a životnost. Díky těmto vlastnostem jsou často využívány v aplikacích s vysokým zatížením a cyklickým provozem. V případě středního drtiče plastů by však použití planetové převodovky vedlo k vyšším nákladům a nevýhodné prostorové dispozici. Převodka by nadměrně vyčnívala do boku drtičího stroje, čímž by se komplikovala její integrace do konstrukce zařízení. Z těchto důvodů byla zvolena plochá převodovka s paralelními hřídeli, která představuje kompromis mezi kompaktními rozměry, dostatečnou únosností a vhodným prostorovým uspořádáním. Tento typ převodovky díky paralelnímu uspořádání hřídelí minimalizuje nároky na prostor a zajišťuje efektivní zástavbu v rámci rámu drtiče. Navíc nabízí dobrý poměr mezi hmotností, náklady a výkonovými parametry, čímž splňuje všechny klíčové požadavky kladené na pohon středního drtiče plastového odpadu.

Pro zajištění bezpečného a efektivního provozu drtiče plastů bude pohon vybaven frekvenčním měničem, který umožní regulaci otáček, plynulý rozběh motoru, optimalizaci výkonu podle aktuální zátěže a také ochranu před přetížením. Frekvenční měnič také umožní zpětný chod rotoru, který je důležitý při zablokování drtičí komory tvrdými nebo nesprávně podanými materiály. V případě hrozcího přetížení se zařízení automaticky zastaví, čímž se zabrání poškození mechanických částí. Díky schopnosti plynule řídit výkon frekvenční měnič eliminuje potřebu použití spojky, která by jinak sloužila k ochraně zařízení právě při dosažení přetížení. Navíc frekvenční měnič zvyšuje energetickou efektivitu celého systému a přispívá k delší životnosti jeho komponent.

Dalším klíčovým faktorem ovlivňujícím spolehlivost a životnost celého zařízení je způsob přenosu kroutícího momentu z hřídele na drtičí segmenty. V rámci návrhu byly zvažovány různé možnosti uchycení drtičích segmentů na hřídel. Mezi tyto varianty patří čtyřhranná hřídel, šestihřanná hřídel, profil s různými typy drážek nebo profil hřídele ve tvaru polygonu. Každé z těchto řešení má své výhody i nevýhody. Čtyřhranná hřídel představuje jednoduché a snadno realizovatelné spojení, ale nevýhodou je omezená rotační polohovatelnost jednotlivých kotoučů a vyšší koncentrace napětí v rozích profilu, což by mohlo vést k únavovému poškození v těchto bodech. Šestihřanná hřídel zlepšuje možnost pootočení jednotlivých kotoučů, ale vyžaduje složitější výrobu a neumožňuje přesné pevné uchycení segmentů. Během provozu tak může docházet k mikropohybům, což může vést ke zhoršení přesnosti nebo opotřebení spojení. Profil hřídele

ve tvaru polygonu je zase vysoce odolný vůči opotřebení a dokáže efektivně přenášet sílu při náročných provozních podmínkách. Nevýhodou však může být technologická náročnost a méně běžná výroba spojená s komplikovaným servisem a omezenou variabilitou při polohování kotoučů. Profil s drážkami je vhodný zejména pro aplikace vyžadující rovnoměrné rozložení zatížení a schopnost přenášet vysoké kroutící momenty. Je univerzální, flexibilní pro různé typy zatížení a má výrazně lepší možnosti nastavení úhlu drtících kotoučů, avšak vyžaduje přesnou výrobu drážek. Na základě těchto úvah bylo jako nejlepší řešení zvoleno evolventní drážkování s 12 zuby, jenž kombinuje rovnoměrné rozložení zatížení, spolehlivý přenos sil a dlouhou životnost.

Důležitou součástí drtícího zařízení jsou také ložiska, kdy při jejich volbě je nutné brát v potaz zatížení, provozní podmínky, požadavky na údržbu a samozřejmě životnost. Mezi hlavní možnosti patřila kluzná nebo valivá ložiska, přičemž v rámci valivých ložisek připadaly v úvahu kuličková, válečková nebo kuželíková. Kluzná ložiska jsou vhodná pro vysoké zatížení a odolná vůči rázům, ale vyžadují pravidelné mazání a jejich vyšší tření vede k energetickým ztrátám. Z tohoto důvodu byla tato varianta vyhodnocena jako méně vhodná. Válečková ložiska mají vysokou únosnost v radiálním směru, ale nejsou ideální pro kombinované zatížení s axiální složkou, která může při drcení materiálu vznikat vlivem vibrací nebo nerovnoměrným pohybem materiálu. Kuželíková ložiska jsou sice schopna přenášet kombinované zatížení, avšak jejich vyšší tření a náročnější údržba přináší další komplikace. Po zohlednění všech provozních požadavků bylo rozhodnuto pro použití kuličkových ložisek. Tento typ ložisek nabízí optimální kombinaci vlastností pro drtič plastů. Díky nízkému tření a schopnosti přenášet jak radiální, tak axiální zatížení jsou tato ložiska spolehlivou volbou pro zajištění plynulého chodu zařízení. Zakrytí ložisek navíc poskytuje ochranu před prachem a nečistotami, což je v prostředí drtiče plastů zásadní. Zároveň zabraňuje úniku maziva, čímž snižuje požadavky na údržbu a zvyšuje životnost ložisek.

Celé navržené zařízení se bude skládat z několika hlavních částí, jako je vstupní násypka, drtič, pohon, skluz, nosný rám, záchytná vana a pásový dopravník. Nosný rám bude tvořit základní konstrukční prvek stroje, na který bude upevněna drtící komora spolu se dvěma pohonnými jednotkami a skluzem. Tento rám bude vyroben z ocelových profilů, které garantují dostatečnou pevnost a zároveň pro zvýšení celkové stability konstrukce bude rám vyztužen vzpěrami. Celý rám bude vybaven nohami, jenž zajistí umístění drtícího zařízení do dostatečné výšky, aby pod ním mohl být nainstalován pásový dopravník. Kromě toho bude rám navržen s možností zakotvení k podlaze, aby vzniklo pevné uchycení a nemohlo dojít k rozkmitání soustavy silami vznikajícími při provozu.

Vstupní násypka bude zajišťovat plynulé podávání materiálu do drtící komory, kde následně dojde k jeho rozmělnění. Naopak pod drtící komorou bude umístěn skluz, který bude sloužit k vedení rozdrčeného materiálu směrem k výstupu. Pod výstupním otvorem bude připraven pásový dopravník, jenž zajistí řízené odvádění výstupní frakce do další části recyklačního procesu.

Zařízení bude doplněno o záchytnou vanu určenou k zachycení kapalin, jež mohou být přítomny ve vstupním materiálu, jako například zbytky tekutin z PET lahví a plastových nádob nebo dešťová voda zadržena v plastovém odpadu. Záchytná vana tak zabrání úniku těchto

kapalin a zároveň usnadní jejich následné odstranění, což lze realizovat například pomocí čerpadla nebo prostřednictvím kohoutu umístěného na dně vany.

Přesné technické parametry jednotlivých částí zařízení a detaily konstrukčního řešení budou podrobně popsány v kapitole 2.6 Výsledný návrh drtícího zařízení.

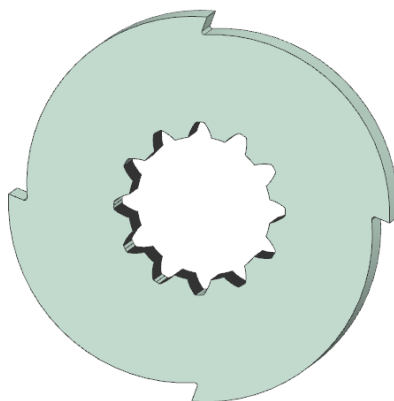
2.3.1 Konceptní návrh drtících segmentů a konstrukce drtící komory

Drtící segmenty společně s celou drtící komorou tvoří jádro drtiče, ve kterém dochází k mechanickému namáhání plastového odpadu a jeho redukci na požadovanou velikost.

Přesná geometrie drtících kotoučů je považována za citlivé know-how jednotlivých výrobců drtičů a je chráněna patentovými právy nebo formami obchodního tajemství. Dosud nebyly provedeny ani žádné studie, které by podrobně analyzovaly účinky různých geometrií břitů z hlediska optimalizace výkonu drcení. Z tohoto důvodu se návrh kotoučů opírá pouze o obecné poznatky získané z dostupné literatury. Konceptní návrh drtících segmentů tak vychází ze zjištění shrnutých v článku od J. H. Wong a kol. (2022), přičemž tato studie popisuje různé konfigurace a geometrie nožů.

Navržené drtící kotouče mají kruhový tvar o průměru 300 mm a jsou osazeny čtyřmi rovnoměrně rozmístěnými břity po 90 °, jak je znázorněno na obrázku 9. Šířka každého břitu činí 30 mm a hloubka řezu dosahuje zhruba 15 mm. Pro zajištění optimálního řezného procesu byl úhel řezu stanoven na přibližně 64 °, což je dle J. H. Wong a kol. (2022) v optimálním rozmezí, které je mezi 50 až 80 °. Tento úhel odpovídá ostrému tvaru břitu, čímž se zlepšuje průchodnost materiálem a současně snižují nároky na výkon pohonného systému. Střížná vůle mezi jednotlivými kotouči činí 0,5 mm, což umožňuje zpracování různých druhů plastového odpadu. Dle zvolených parametrů drtících kotoučů by výsledná výstupní frakce měla tvarem odpovídat pásům o přibližných rozměrech 30 x 15 mm. Reálná velikost částic však může být ovlivněna druhem plastového materiálu a způsobem podávání, ale díky poměrně nízkým otáčkám by mělo být dosaženo rovnoměrné velikosti výstupních částic a zároveň zamezeno nežádoucí tvorbě prachu.

Mezi plochou břitu a kruhovým tvarem kotouče je navržen rádius přechodu o velikosti 2 mm, který pomáhá rozložit napětí vznikající při zpracování plastového odpadu, čímž se snižuje koncentrace napětí a zvyšuje pevnost a odolnost drtícího kotouče proti únavovému lomu.



Obr. 9: Konceptní návrh drtících kotoučů

Zdroj: vlastní zpracování

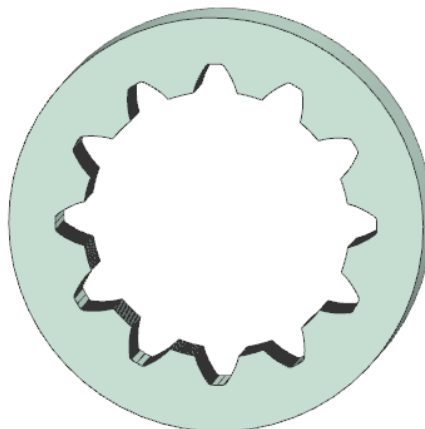
Drtící segmenty budou vystaveny intenzivnímu mechanickému namáhání a abrazivnímu opotřebení. Aby bylo dosaženo vysoké životnosti a spolehlivosti, tak je nezbytné zvolit materiál s vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení a dostatečnou houževnatostí. Po zhodnocení různých materiálových variant byla jako nejlepší možnost zvolena nástrojová ocel s označením 1.2379 neboli X153CrMoV12. Tato legovaná ocel nabízí vysokou tvrdost a současně díky vysokému obsahu chromu vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení a korozi. Další výhodou je její pevnost, dostatečná houževnatost a stabilita tvaru. Zároveň poskytuje možnost opakovaného broušení břitů, čímž se prodlužuje jejich životnost.

Pro získání optimálních mechanických vlastností by bylo vhodné podrobit drtící segmenty i tepelnému zpracování, jako je kalení a následné popouštění, s cílem upravit jejich tvrdost na zhruba 60 HRC a snížit vnitřní pnutí. To by zaručilo dlouhou životnost drtících kotoučů a konzistentní výkon drtiče plastů.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3 Návrh zařízení pro drcení plastů, tak přenos kroutícího momentu bude zajišťovat evolventní drážkování, které bude vytvořeno přesně ve středu drtícího kotouče. Jednotlivé segmenty na hřídelích budou pootočený, aby vytvořily spirálové uspořádání břitů na hřídeli. Tento design umožní plynulejší chod zařízení, rovnoměrné rozložení zatížení, snížení rázového namáhání a minimalizaci vibrací. Výpočet základních parametrů tohoto drážkování je uveden v kapitole 2.4.9 Návrh evolventního drážkování.

V závislosti na požadované délce rotoru, šířce drtících kotoučů a střižné vůli byla vybrána varianta s rozdílným počtem kotoučů na každém rotoru. Na jedné hřídeli bude nasazeno 16 kusů drtících segmentů a na druhé pouze 15 ks. Drtící kotouče na protilehlých rotorech budou do sebe vzájemně zapadat, čímž se zajistí účinné stříhání materiálu. Segmenty budou navíc navrženy, aby se jejich pracovní části překrývaly o 60 mm.

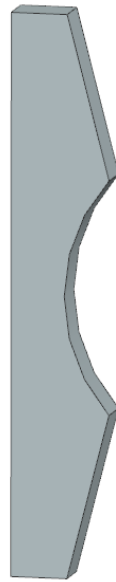
Pro zajištění přesného nastavení střižné vůle bude mezi drtící kotouče pravidelně vkládána distanční vložka, která zaručí správné vzájemné zapadnutí rotorů. Navržená vložka má kruhový tvar o průměru 174 mm a šířce 31 mm. Stejně jako drtící kotouče je opatřena evolventním drážkováním a vyrobena z nástrojové oceli 1.2379. Řešení distanční vložky je vyobrazeno na následujícím obrázku 10.



Obr. 10: Konceptní návrh distanční vložky

Zdroj: vlastní zpracování

Konstrukce drtící komory bude navržena tak, aby odpovídala geometrii drtících segmentů a optimalizovala průchod materiálu během zpracování, proto musí mít obdélníkový tvar o vnitřních rozměrech 955 x 560 mm. Konstrukce komory rovněž musí umožňovat přístup k jednotlivým částem pro snadnou údržbu a výměnu opotřebovaných komponent. Důležitým prvkem jsou také pevné segmenty, které budou umístěné na krajích drtící komory. Jejich hlavním účelem bude usměrňovat zpracovávaný materiál do pracovní oblasti drtící komory, čímž se zamezí hromadění plastového odpadu v bočních částech komory, zajistí efektivní drcení materiálu mezi rotory a současně poslouží k čištění drtících kotoučů od zbytků plastu přichyceného na jejich povrchu. Konstrukčně budou řešeny jako pevné desky s rádiusem ve středové části, který bude přizpůsoben tvaru distančních vložek. Tvar pevných segmentů, viz obrázek 11, je navržen tak, aby materiál, který se dostane k okrajům drtící komory, měl tendenci sklouzávat zpět mezi rotory a tím se zabránilo jeho hromadění v nežádoucích místech.



Obr. 11: Koncepční návrh pevných segmentů

Zdroj: vlastní zpracování

Pro pevné segmenty byla vybrána konstrukční ocel 1.7131. Jde o legovanou cementační ocel, která se vyznačuje dobrou houževnatostí, obrobiteľnosťou a odolnosťou proti opotřebení. Její vlastnosti lze dále vylepšit cementací a následným kalením, čímž se povrch segmentů zpevní na tvrdost až 60 HRC. Díky této volbě je dosaženo optimálního poměru mezi cenou a životností segmentů.

2.4 Výpočet působících sil a návrh pohonného systému dvouhřídelového drtiče

Při návrhu dvouhřídelového drtiče plastů byly definovány klíčové parametry, které vycházejí z požadavků na efektivní zpracování plastového odpadu a současně ovlivňují jeho výkon a životnost. Tyto parametry, podrobně popsány v kapitole 2.3, hrají zásadní roli při výpočtu působících sil, což přímo ovlivňuje návrh pohonu a dimenzování důležitých součástí zařízení, jako jsou hřídele a ložiska.

Prvním krokem tedy bylo stanovit materiálové vlastnosti plastů, které budou v drtiči zpracovávány, jelikož hodnota pevnosti ve smyku slouží jako vstupní parametr pro další výpočty.

Následně byl proveden výpočet sil působících při drcení plastů. Přesné určení průběhu těchto sil je náročné, protože materiál nemusí vždy plynule vstupovat do drtící komory a zároveň se během procesu může natáčet do různých poloh. Z tohoto důvodu je výpočet založen na odhadech a provádí se pro nejhorší možný případ, kdy se předpokládá, že drtič bude pracovat po celé své délce současně.

Během drcení plastového odpadu působí na břity drtících kotoučů síly, jejichž velikost závisí nejen na mechanických vlastnostech zpracovávaného materiálu, ale také na geometrii břitů. Vzhledem k tomu, že drcení probíhá především stříhem, bylo nejprve nutné určit střížnou plochu břitu. Na základě této plochy byla stanovena síla potřebná k proříznutí či přestřížení plastového odpadu. Z této síly byl následně určen kroutící moment působící na hřídele drtiče, který je klíčovým parametrem pro návrh pohonného systému, protože díky němu je možné spočítat potřebný výkon elektromotorů.

Po určení potřebného výkonu motorů následoval návrh pohonného systému. Z otáček motoru a požadovaných otáček hřídelí byl vypočítán převodový poměr na jehož základě byla vybrána vhodná převodovka.

Dalším krokem bylo dimenzování hřídelí. Z tohoto důvodu byl proveden pevnostní výpočet, při kterém byl minimální průměr hřídele stanoven podle metody HMM. Výsledný průměr hřídele pak posloužil pro návrh evolventního drážkování a výběr ložisek.

2.4.1 Pevnost ve smyku pro běžné plasty

Aby bylo možné určit síly působící na břity, je třeba znát pevnost drcených plastů. Mez pevnosti ve smyku lze odhadnout pomocí vztahu (1), kde je přepočtena z meze pevnosti v tahu. Výsledná hodnota je poté zaokrouhlena směrem nahoru na celá čísla.

$$\tau_S = 0,77 * R_m \quad (1)$$

Kde: τ_S [MPa] - mez pevnosti ve smyku
 R_m [MPa] - mez pevnosti v tahu

Přibližné hodnoty meze pevnosti ve smyku pro běžné plasty, které se nejčastěji recyklují, jsou zobrazeny v následující tabulce 1.

Tab. 1: Mechanické vlastnosti běžných plastů

Typ plastu	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti ve smyku [MPa]
LDPE	13	10
HDPE	31	24
PET	85	66
PS	24	19
PP	33	26
PVC	52	40
ABS	42	33

Zdroj: vlastní zpracování dle E-konstruktor (2013a)

Vzhledem k tomu, že polyethyltereftalát (PET) je nejpevnější plast z uvedených materiálů, bude použit jako referenční materiál pro výpočet nejhoršího možného zatížení. Tato volba umožní navrhnout konstrukci, která obstojí i při maximálním namáhání.

2.4.2 Střížná plocha břitu

Střížná plocha břitu se určuje na základě kontaktní plochy břitu, jak je uvedeno v rovnici (2), přičemž se jedná o plochu podílející se na stříhu materiálu. Její velikost je dána součinem šířky břitu a hloubky řezu:

$$A_k = b * h = 30 * 15 = 450 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

Kde: A_k [mm²] - kontaktní plocha břitu
 b [mm] - šířka drtících segmentů
 h [mm] - hloubka řezu

Lollek (2023) uvádí, že při použití drtících segmentů s úhlem břitu menším než 90 ° je potřeba zavést korekční koeficient k_1 , který je empiricky stanoven jako 0,1. Toto doporučení vychází z geometrie břitů s ostrým tvarem, které pronikají do materiálu postupně, místo aby do něj vnikaly naráz, což má vliv na velikost střížné plochy.

Výpočet střížné plochy břitu:

$$A = A_k * k_1 = 450 * 0,1 = 45 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

Kde: A [mm²] - střížná plocha břitu
 A_k [mm²] - kontaktní plocha břitu
 k_1 [-] - korekční koeficient závislý na tvaru břitu

2.4.3 Výpočet působících sil

Smyková síla působící na jeden břit může být určena pomocí základního vztahu pro výpočet smykového napětí $\tau_s = \frac{F}{A}$, který lze upravit na výpočet síly F .

Výpočet síly působící na jeden břit při drcení odpadu z PET:

$$F = \tau_s * A = 66 * 45 = 2\,970 \text{ N} \quad (4)$$

Kde: F [N] - síla působící na jeden břit
 τ_s [MPa] - mez pevnosti ve smyku
 A [mm²] - střížná plocha břitu

Výsledný návrh zahrnuje 16 drtících kotoučů, které jsou na hřídeli umístěny ve šroubovici, což je umožněno díky evolventnímu drážkování s 12 drážkami. Každý kotouč je posunut o jednu drážku, což představuje pootočení o 30 ° vůči předchozímu kotouči. Zároveň má každý drtící segment čtyři břity pravidelně rozmístěné v úhlech po 90 °. Tato konfigurace umožňuje, aby bylo v kterémkoli okamžiku v záběru maximálně 6 kotoučů, konkrétně kotouče č. 1, 4, 7, 10, 13 a 16. Tato pravidelnost vyplývá z toho, že nejmenší společný násobek mezi pootočením kotoučů o 30 ° a rozmístěním břitů po 90 ° je právě 90 °. Z tohoto důvodu je potřeba vypočtenou smykovou sílu

vynásobit šesti, aby zohledňovala celkové zatížení vyvolané současným působením všech zapojených kotoučů.

Výpočet maximální síly při drčení pro nejhorší možný případ:

$$F_{max} = F * k = 2970 * 6 = 17\,820\, N \quad (5)$$

Kde:	F_{max} [N]	-	maximální možná síla při drčení
	F [N]	-	síla působící na jeden břit
	k [-]	-	maximální počet současně zabírajících břitů

2.4.4 Výpočet kroutícího momentu

Maximální kroutící moment působící na hřídel je dán následujícím vztahem (6):

$$M_K = F_{max} * r = 17820 * 0,15 = 2\,673\, Nm \quad (6)$$

Kde:	M_K [Nm]	-	maximální kroutící moment
	F_{max} [N]	-	maximální možná síla při drčení
	r [m]	-	poloměr drtících kotoučů

2.4.5 Výpočet potřebného výkonu motoru

Při návrhu elektromotorů pro dvouhřídelový drtič plastů je klíčové určit potřebný výkon motoru, který zajistí dostatečný kroutící moment. Potřebný výkon motorů lze spočítat podle vzorce (7):

$$P = \frac{M_K * \omega}{\eta} \quad (7)$$

Nejprve je však nutné stanovit úhlovou rychlost hřídele, která souvisí s požadovanými otáčkami:

$$\omega = \frac{2 * \pi * n}{60} = \frac{2 * \pi * 20}{60} = 2,094\, s^{-1} \quad (8)$$

Kde:	ω [s^{-1}]	-	úhlová rychlost hřídele
	n [min^{-1}]	-	požadované otáčky hřídele

Následně lze určit požadovaný výkon motoru na základě maximálního kroutícího momentu a úhlové rychlosti. Při započítání 90 % účinnosti elektromotoru vychází potřebný výkon motorů následovně:

$$P = \frac{M_K * \omega}{\eta} = \frac{2673 * 2,094}{0,9} = 6\,219\, W = 6,2\, kW \quad (9)$$

Kde:	P [W]	-	potřebný výkon motoru
	M_K [Nm]	-	maximální kroutící moment
	ω [s^{-1}]	-	úhlová rychlost
	η [-]	-	účinnost elektromotoru

Vzhledem k možným provozním odchylkám a různorodosti drceného materiálu je vhodné zahrnout bezpečnostní faktor, jenž odpovídá alespoň hodnotě $S_F = 1,7$. Skutečný výkon motoru tedy musí být minimálně:

$$P_{skutečný} = P * S_F = 6,2 * 1,7 = 10,6 \text{ kW} \quad (10)$$

Kde: $P_{skutečný}$ [kW] - skutečný výkon motoru
 P [kW] - potřebný výkon motoru
 S_F [-] - bezpečnostní faktor

Na základě výpočtů a zohlednění bezpečnostního faktoru byl zvolen elektromotor s nejbližším vyšším standardním výkonem. Jako pohon drtiče byl tedy vybrán elektromotor o výkonu 11 kW, což zajistí dostatečnou rezervu pro provoz zařízení.

2.4.6 Návrh převodovky

Zvolené elektromotory o výkonu 11 kW pracují s otáčkami 1500 min^{-1} , avšak pro navržený drtič plastů jsou požadovány výstupní otáčky hřídele pouze 20 min^{-1} . Z tohoto důvodu je potřeba použít převodovku, která umožní snížení otáček prostřednictvím vhodného převodového poměru.

Pro výpočet potřebného převodového poměru byl použit následující vztah:

$$i = \frac{n_{motor}}{n_{hřídele}} = \frac{1500}{20} = 75 \quad (11)$$

Kde: i [-] - převodový poměr
 n_{motor} [min^{-1}] - otáčky motoru
 $n_{hřídele}$ [min^{-1}] - otáčky hřídele

Na základě vypočteného převodového poměru byla zvolena převodovka, která umožňuje převod alespoň s poměrem 75:1, což znamená, že otáčky motoru budou sníženy 75krát. Tato převodovka je katalogovou součástí použitého pohonu a nebyla individuálně konstruována. Jedná se o standardní plochou převodovku, která je blíže specifikována v kapitole 2.5.

2.4.7 Výpočet minimálního průměru hřídele na základě kroutícího momentu

Pro správný návrh hřídele je klíčové určit její minimální průměr, aby bezpečně přenesla maximální kroutící moment. Tento výpočet vychází ze základního vztahu mezi napětím v krutu a modulem průřezu (12), kdy napětí musí být menší nebo rovno dovolenému napětí v krutu.

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} \leq \tau_{DK} \quad (12)$$

Kde: τ_K [MPa] - napětí v krutu
 M_K [Nmm] - maximální kroutící moment
 W_K [mm^3] - modul průřezu v krutu
 τ_{DK} [MPa] - dovolené napětí v krutu

Jelikož hřídel má plný kruhový průřez, tak průřezový modul v krutu lze spočítat jako:

$$W_K = \frac{\pi * d^3}{16} \quad (13)$$

Z těchto vztahů lze odvodit vzorec pro minimální průměr hřídele následovně:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 * M_K}{\pi * \tau_{DK}}} \quad (14)$$

Kde: d [mm] - minimální průměr hřídele
 M_K [Nmm] - maximální kroutící moment
 τ_{DK} [MPa] - dovolené napětí v krutu

Jako materiál hřídele byla zvolena ocel E335, jenž odpovídá staršímu označení oceli 11 600. Dovolené napětí pro tuto ocel při střídavém namáhání v krutu se podle E-konstruktor (2013b) pohybuje v rozmezí 50 až 70 MPa. Při zvolení střední hodnoty dovoleného napětí byla získána hodnota minimálního průměru hřídele:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 * 2673 * 10^3}{\pi * 60}} \geq 61 \text{ mm} \quad (15)$$

Minimální vypočtený průměr hřídele je 61 mm. Pro zajištění dostatečné bezpečnosti byl zvolen průměr hřídele 65 mm.

2.4.8 Výpočet minimálního průměru hřídele podle teorie HMM

Výpočet minimálního průměru hřídele pouze na základě kroutícího momentu není dostatečný, protože v průběhu drcení bude hřídel namáhána kombinovaně, konkrétně na krut a ohyb. Při kombinovaném namáhání se musí zohlednit jak maximální kroutící moment, tak ohybový moment působící na hřídel. Proto se pro přesnější výpočet používá hypotéza HMM, která stanovuje redukované napětí a porovnává jej s dovoleným napětím materiálu.

Maximální ohybový moment vzniká uprostřed hřídele a lze jej určit z rozložení sil působících na drtící kotouče, přičemž klíčovým faktorem je současný záběr břitů. Z geometrického uspořádání kotoučů vyplývá, že v každém okamžiku může být současně v záběru maximálně šest břitů. To nastává, když jsou v záběru břity kotoučů 1, 4, 7, 10, 13 a 16. Další varianty záběru pak obsahují maximálně pět břitů. Aby mohl být určen maximální ohybový moment je však nutné spočítat reakční síly.

Výpočet reakčních sil vychází z podmínek silové a momentové rovnováhy:

$$\Sigma F_Y = 0 \quad (16)$$

$$\Sigma M_B = 0 \quad (17)$$

Kde: ΣF_Y [N] - součet sil působících ve svislém směru
 ΣM_B [Nmm] - součet momentů působících na těleso vůči bodu B

Dosazením do rovnic (16) a (17) byly vypočteny reakční síly působící v bodech A a B.

$$\Rightarrow R_A - 6 * F + R_B = 0 \quad (18)$$

$$\Rightarrow R_A * 1130 - F * 1015 - F * 835 - F * 655 - F * 475 - F * 295 - F * 115 = 0 \quad (19)$$

$$R_A = \frac{F * (1015 + 835 + 655 + 475 + 295 + 115)}{1130} = \frac{2970 * 3390}{1130} = 8\,910 \text{ N} \quad (20)$$

$$R_B = 6 * F - R_A = 6 * 2970 - 8910 = 8\,910 \text{ N} \quad (21)$$

Kde: R_A [N] - reakční síla v bodě A
 R_B [N] - reakční síla v bodě B
 F [N] - síla působící na jeden břít

Maximální ohybový moment je předpokládán uprostřed nosníku, protože díky geometrickému uspořádání kotoučů je zatížení rovnoměrně rozloženo podél hřídele. Jeho hodnota je vypočtena pomocí následujícího vztahu (22):

$$M_{Omax} = R_B * 0,565 - F * 0,45 - F * 0,27 - F * 0,09 = 2\,628 \text{ Nm} \quad (22)$$

Kde: M_{Omax} [Nm] - maximální ohybový moment

Redukované napětí při kombinovaném namáhání bylo určeno ze vzorce (23):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_O^2 + 3 * \tau_K^2} \leq \sigma_{dov} \quad (23)$$

Kde: σ_{red} [MPa] - redukované napětí
 σ_O [MPa] - normálové napětí z ohybu
 τ_K [MPa] - smykové napětí z krutu
 σ_{dov} [MPa] - dovolené napětí materiálu

Jednotlivé složky napětí lze vyjádřit následovně:

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} = \frac{32 * M_O}{\pi * d^3} \quad (24)$$

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} = \frac{16 * M_K}{\pi * d^3} \quad (25)$$

Kde: M_O [Nmm] - ohybový moment
 W_O [mm³] - modul průřezu v ohybu
 M_K [Nmm] - krutící moment
 W_K [mm³] - modul průřezu v krutu
 d [mm] - průměr hřídele

Dosazením těchto vztahů do rovnice pro redukované napětí byl stanoven vztah (26):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_O}{\pi * d^3}\right)^2 + 3 * \left(\frac{16 * M_K}{\pi * d^3}\right)^2} \leq \sigma_{dov} \quad (26)$$

Úpravou vztahu (26) byl získán vzorec pro výpočet minimálního průměru hřídele:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi * \sigma_{dov}} \sqrt{4 * M_O^2 + 3 * M_K^2}} \quad (27)$$

Pro návrh minimálního průměru hřídele metodou HMH je také nezbytné stanovit dovolené napětí materiálu. V tomto případě je zvolena ocel E335 (11 600), která má dle E-konstruktér (2013b) mez kluzu v tahu v rozmezí od 300 do 340 MPa. Dovolené napětí se pro výpočet stanoví jako podíl meze kluzu a koeficientu bezpečnosti. S ohledem na požadavek spolehlivosti a bezpečnosti konstrukce byl zvolen koeficient bezpečnosti $k_B = 2$, což vede k následující hodnotě dovoleného napětí:

$$\sigma_{dov} = \frac{\sigma_{kt}}{k_B} = \frac{300}{2} = 150 \text{ MPa} \quad (28)$$

Kde: σ_{dov} [MPa] - dovolené napětí
 σ_{kt} [MPa] - mez kluzu v tahu
 k_B [Nmm] - koeficient bezpečnosti

Po dosazení hodnot do vzorce (27) pro výpočet minimálního průměru hřídele podle metody HMH bylo zjištěno:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi * 150} \sqrt{4 * (2628 * 10^3)^2 + 3 * (2673 * 10^3)^2}} \geq 62 \text{ mm} \quad (29)$$

Vypočtený minimální průměr hřídele podle teorie HMH vychází na 62 mm. S ohledem na bezpečnost a dostupnost materiálu je zvolen minimální průměr hřídele 70 mm.

2.4.9 Návrh evolventního drážkování

Jako optimální řešení pro přenos kroutícího momentu z hřídele na drtící kotouče bylo zvoleno evolventní drážkování, které zajišťuje rovnoměrné rozložení zatížení po obvodu hřídele. Drážkování bylo navrženo s modulem 10 mm, přičemž modul určuje velikost jednotlivých zubů. Tato volba odpovídá požadavkům na pevnost a byla provedena s ohledem na dostatečnou únosnost spoje. Počet zubů byl stanoven na hodnotu $z = 12$, což znamená, že každý zub je na kružnici pootočen o úhel 30° . Současně byl zvolen úhel záběru $\alpha = 30^\circ$.

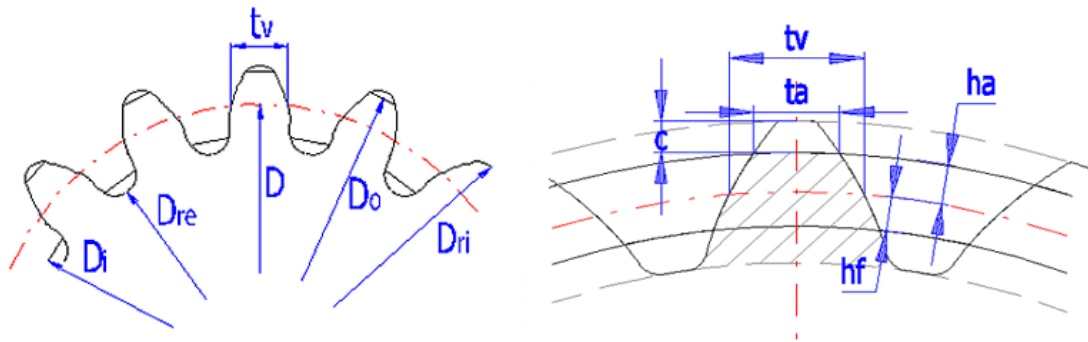
Aby bylo možné zkonstruovat toto drážkování, bylo nutné provést výpočet základních parametrů. Tento výpočet byl realizován pomocí softwaru MITCalc, který vychází z normy ISO 4156 pro 30° evolventní drážkování s plochým dnem drážky a středěním na boky zubu. Výpočet zahrnuje stanovení hlavních rozměrů, jak pro hřídel s evolventním drážkováním, tak i pro náboj s odpovídajícím vnitřním drážkováním. Výhodou softwaru je, že zohledňuje detailní tolerance a výrobní parametry, což umožňuje přesný výpočet nezbytný pro zajištění správného lícování. Výsledné hodnoty jednotlivých rozměrů jsou uvedeny v následující tabulce 2.

Tab. 2: Základní parametry evolventního drážkování

Parametr	Značka	Hřídel	Náboj
Počet zubů [-]	z	12	12
Modul [mm]	m	10	10
Úhel záběru [°]	α	30	30
Rozteč zubů [mm]	P_z	31,4159	31,4159
Průměr roztečné kružnice [mm]	D	120	120
Průměr hlavové kružnice [mm]	D_o / D_i	130	111,9818
Průměr patní kružnice [mm]	D_{re} / D_{ri}	105	135
Průměr základní kružnice [mm]	D_b	103,923	103,923
Výška hlavy zubu [mm]	h_a	5	4,0091
Výška paty zubu [mm]	h_f	7,5	7,5
Tloušťka zubu na hlavové kružnici [mm]	t_a	10,0876	10,8435
Tloušťka zubu na roztečné kružnici [mm]	t_v	15,708	15,708
Tloušťka zubu na patní kružnici [mm]	t_b	19,3884	28,8949
Hlavová vůle [mm]	c_a	2,5	3,4909

Zdroj: vlastní zpracování dle MITCalc (c2003-2025)

Pro snazší orientaci v technických specifikacích evolventního drážkování je přiložen obrázek 12, na kterém jsou znázorněny a zakótovány základní rozměry.



Obr. 12: Základní rozměry evolventního drážkování

Zdroj: MITCalc (c2003-2025)

Současně byl tento software použit na vygenerování přesného profilu zubu, což poskytlo základ pro zhotovení 3D modelů drážkování na hřídeli i náboji.

2.4.10 Výpočet a volba ložisek

Pro správný výběr ložisek je nutné určit minimální hodnotu dynamické únosnosti ložiska, což je parametr, který udává schopnost ložiska odolávat zatížení po určitou dobu při daných provozních podmínkách. Výpočet lze vyjádřit ze vztahu pro základní trvanlivost ložiska (30):

$$L = \left(\frac{C}{R_A}\right)^p * \frac{10^6}{n_{hřídele} * 60} \quad (30)$$

Kde:	L [h]	-	trvanlivost ložiska
	C [N]	-	základní dynamická únosnost ložiska
	R _A [N]	-	reakční síla v bodě A
	p [-]	-	mocnitel závislý na typu ložiska
	n _{hřídele} [min ⁻¹]	-	otáčky hřídele

Jelikož byla v konstrukčním návrhu zvolena kuličková ložiska, tak mocnitel závislý na typu ložiska odpovídá hodnotě p = 3. Po úpravě lze spočítat minimální hodnotu dynamické únosnosti pro dosažení základní trvanlivosti ložiska L = 25000 h následovně:

$$C_v = R_A * \sqrt[3]{\left(\frac{n_{hřídele} * L * 60}{10^6}\right)} = 8910 * \sqrt[3]{\left(\frac{20 * 25000 * 60}{10^6}\right)} = 27\,685\,N \quad (31)$$

Kde:	C _v [N]	-	minimální dynamická únosnost ložiska
------	--------------------	---	--------------------------------------

Na základě výsledku byla zvolena jednořadá kuličková ložiska 6016-Z s těsněním na jedné straně od společnosti SKF, jenž disponují základní dynamickou únosností 49,4 kN (SKF, nedatováno). Výsledná trvanlivost ložiska poté vychází z původního vzorce (30) následovně:

$$L = \left(\frac{C}{R_A}\right)^3 * \frac{10^6}{n_{hřídele} * 60} = \left(\frac{49,4 * 10^3}{8910}\right)^3 * \frac{10^6}{20 * 60} = 142\,025\,h \quad (32)$$

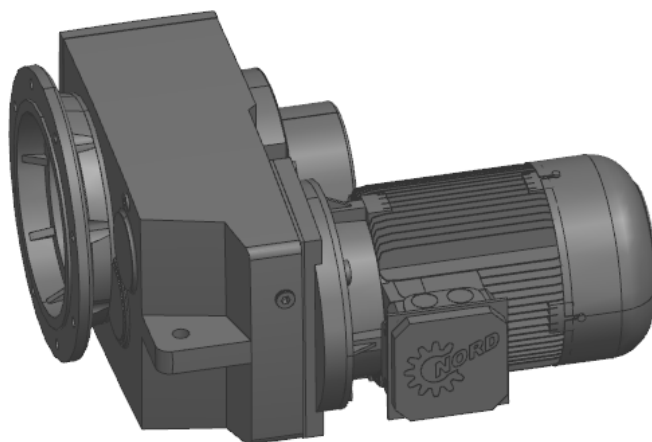
Skutečná trvanlivost zvoleného ložiska je 142025 h, což značně převyšuje požadovanou hodnotu a zajišťuje vysokou provozní spolehlivost.

2.5 Volba pohonu drtiče

Na základě provedeného návrhu zařízení pro drcení plastů (kapitola 2.3) a výpočtů z kapitoly 2.4 byl vybrán vhodný pohonný systém, který zahrnuje elektromotor, plochou převodovku a frekvenční měnič pro řízení otáček a momentu v závislosti na zatížení drtiče.

Při výběru pohonu byl využit konfigurátor výrobků od společnosti NORD – Poháněcí technika, s.r.o., který po zadání potřebných parametrů nabídne vhodné konfigurace pohonného systému. Na základě této konfigurace byly stanoveny specifické požadavky, které zajistily optimální volbu. Zařízení bylo navrženo pro provoz v metrické soustavě při frekvenci 50 Hz a zároveň bylo určeno pro běžné průmyslové prostředí bez nebezpečí výbuchu. Mezi provozní parametry patří požadovaný výkon motoru 11 kW a výstupní otáčky v rozmezí 15 až 20 min⁻¹. Dále byla vybrána možnost přímé montáže motoru na převodovku a definován provozní faktor 1,3, jenž zohledňuje náročnost pracovních podmínek a zajišťuje dostatečnou rezervu pro zatížení převodovky. Minimální požadovaný výstupní moment byl stanoven na 2673 Nm. Z hlediska konstrukčního provedení byla zvolena varianta přírubové skříně (B5), která umožňuje pevné uchycení pohonu k rámu stroje. Pro přenos síly na hřídel drtiče byl vybrán dutý hřídel se svěrným spojem, což usnadní výrobu hřídelí pro drtič a současně zajistí snadnou instalaci pohonů bez nutnosti použití drážkových spojů.

Z dostupných možností byla nakonec zvolena sestava, zobrazená na Obr. 13, s typovým označením SK 7382AFSH – 160MP/4 TF, jenž splňuje veškeré požadavky na výkon, spolehlivost, prostorovou zástavbu a kompatibilitu s frekvenčním měničem.



Obr. 13: Plochá převodovka s motorem

Zdroj: NORD (2025b)

Základní parametry zvoleného pohonu lze nalézt v tabulce 3.

Tab. 3: Základní parametry pohonu

Parametr	Hodnota
Otáčky motoru [min^{-1}]	1465
Převodový poměr	78,81
Výstupní otáčky [min^{-1}]	19
Provozní faktor	1,3
Výstupní kroutící moment [Nm]	5647
Výkon motoru [kW]	11
Napětí [V]	400/690
Frekvence [Hz]	50 Hz
Třída účinnosti	IE3
Jmenovitý proud [A]	20,5/11,8
Cos ϕ	0,85
Druh provozu	S1 – Trvalý provoz
Krytí motoru	IP55
Pracovní poloha převodovky	M5
Typ skříně	Příruba B5
Propojení pohonu	Dutý hřídel se svěrným spojem
Rozměry hřídele [mm]	80H7
Průměr příruby [mm]	450
Množství maziva [l]	23
Lakovací předpis	NSD3 – Pro venkovní instalace
Hmotnost [kg]	338

Zdroj: vlastní zpracování dle NORD (2025a)

Zvolený elektromotor o výkonu 11 kW a účinnosti třídy IE3 je navržen pro provoz při standardním síťovém napětí 400/690 V s frekvencí 50 Hz. Krytí motoru IP55 zajišťuje ochranu proti prachu a stříkající vodě, což ho činí vhodným pro náročnější prostředí a díky povrchové úpravě je připraven i pro venkovní instalace. Motor je vybaven teplotními čidly pro ochranu proti přehřátí a inkrementálním magnetickým snímačem otáček, který poskytuje údaje o počtu otáček nebo poloze hřídele, což je klíčové při použití frekvenčního měniče pro řízení pohybu. Převodovka používá jako mazivo minerální olej ISO VG 220 o objemu 23 litrů. Její pracovní poloha, označená jako M5, určuje přibližnou hladinu oleje a polohu odvodušňovacího ventilu. Odvzdušnění je řešeno standardně odvodušňovacím šroubem. Mezi příslušenství převodovky patří také kryt svěrného spoje, který přispívá k celkové bezpečnosti (NORD, 2025a).

K této sestavě byl vybrán frekvenční měnič pro vestavbu do rozvaděče NORDAC PRO s označením SK 535E, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4: Základní parametry frekvenčního měniče

Parametr	Hodnota
Krytí	IP20
Třída účinnosti	IE2
Výkon [kW]	11
Fáze	3AC
Vstupní napětí [V]	380–480 (-20 % / +10 %)
Vstupní proud [A]	33,6
Výstupní proud [A]	24
Frekvenční charakteristika [Hz]	50
Digitální vstupy	7
Digitální výstupy	2
Analogové vstupy	2
Analogové výstupy	1
Ovládání	ControlBox

Zdroj: vlastní zpracování dle NORD (2025a)

Tento měnič je navržen pro třífázové napájení v rozmezí 380 až 480 V a je vhodný pro motory s jmenovitým výkonem až 11 kW. Ovládání měniče je možné několika způsoby. Pro základní řízení je k dispozici externí technologická jednotka ControlBox, která umožňuje přímé ovládání, zobrazení provozních hodnot na displeji a snadné nastavování parametrů. Dále je možné využít servisní ovládací přístroj s připojovacím kabelem, jenž zajišťuje individuální nastavení parametrů měniče. Rovněž je vybaven digitálními a analogovými vstupy a výstupy, díky nimž je možné jeho snadné začlenění do nadřazeného automatizačního systému (NORD, 2025a).

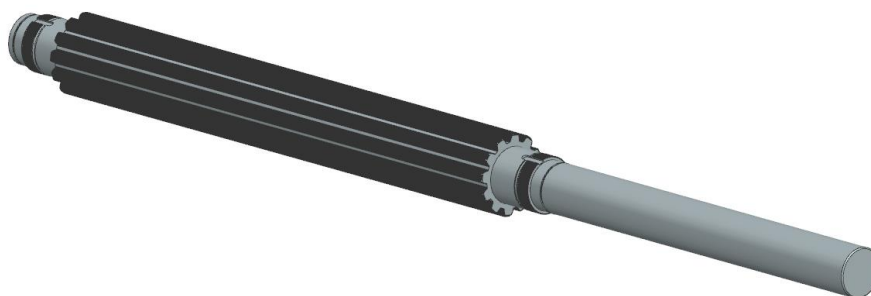
2.6 Výsledný návrh drtícího zařízení

Tato kapitola se věnuje finálnímu konstrukčnímu řešení dvouhřídelového drtiče plastů, který byl navržen na základě technických požadavků, provedených výpočtů a rešerše dostupných technologií. Konstrukční provedení drtiče, ocelové konstrukce, násypky, skluzu a záchytné vany je podrobně popsáno v následujících podkapitolách, včetně informací o použitých materiálech, způsobu výroby a vzájemného propojení jednotlivých částí. Pro lepší přehlednost a názornost jsou doplněny ukázky 3D modelů, které znázorňují finální podobu drtícího zařízení. Kompletní

3D modely jednotlivých komponent a výsledný model sestavy je součástí připojené přílohy A, zatímco příloha B zahrnuje výkresovou dokumentaci klíčových komponent, výkresy sestav a podsestav drtiče, včetně kusovníku, který obsahuje seznam všech součástí tvořících finální produkt. Veškeré nakupované katalogové díly, jako ložiska, šrouby, maznice atd., jsou uvedeny v příloze C spolu s jejich nákupní specifikací.

2.6.1 Finální konstrukční řešení drtiče

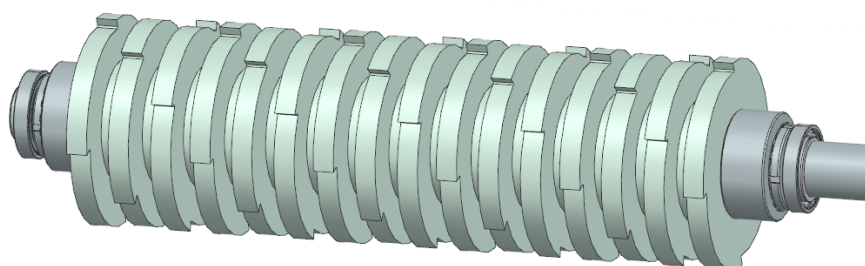
Nejdůležitější částí celého zařízení je samotný drtič. Drtící mechanismus je tvořen dvěma rotory, které jsou vybaveny robustními drtícími kotouči, jejichž geometrie je popsána v kapitole 2.3.1. Tyto rotory se mezi sebou liší pouze v počtu drtících kotoučů a distančních vložek. Oba jsou tvořeny hřídelí, na které jsou nasazeny jednotlivé segmenty. Samotná hřídel je zobrazena na obrázku 14. Mezi nejzajímavější prvky hřídele patří evolventní drážkování, které umožňuje pevné spojení hřídele s drtícími kotouči a zajišťuje přenos kroutícího momentu. Hřídele budou vyrobeny z polotovaru ČSN EN 10060, což jsou ocelové kruhové tyče válcované za tepla z materiálu E335.



Obr. 14: Hřídel drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

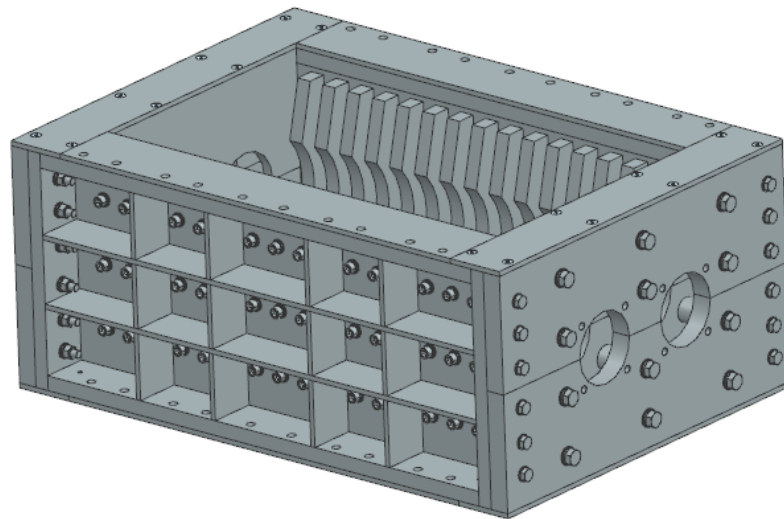
První rotor je poskládán tak, že na evolventním drážkování začíná a končí drtícím kotoučem, zatímco druhý rotor začíná a končí distanční vložkou. To znamená, že první rotor obsahuje 16 drtících kotoučů a 15 vložek a druhý rotor je tvořen 15 kotouči a 16 vložkami. Pro zabránění posunu v axiálním směru jsou kotouče z obou stran staženy přes distanční kroužek KM maticí a MB podložkou, což zároveň zajistí i snadnou výměnu drtících segmentů. Detailní sestavení prvního rotoru a jeho komponent je možno vidět na obrázku 15.



Obr. 15: Část rotoru drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

Oba rotory jsou umístěny v drtící komoře, která představuje pevnou a robustní konstrukci drtícího mechanismu, viz Obr. 16. Komora je složena ze dvou bočních stěn, jež jsou vyrobeny svařováním z plechů. Stěny jsou navíc vyztuženy podélnými i příčnými žebry, což zajišťuje stabilitu celé sestavy při provozu. Tyto stěny plní nosnou i ochrannou funkci a slouží jako základ pro montáž pevných segmentů, které jsou přišroubovány přes závity v bočních stěnách. Každý tento segment je uchycen pomocí tří šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Tím je zajištěna přesná pevná fixace segmentů a současně možnost jejich snadné výměny. Boční stěny drtící komory jsou spojeny pomocí šroubů se šestihrannou hlavou s předními stěnami, které jsou dělené, což zajišťuje snadné vložení rotorů při montáži a usnadňuje případnou demontáž a výměnu opotřebovaných součástí. Aby bylo zabráněno vnikání drčeného materiálu do prostoru ložisek, tak je mezi přední stěnu a samotný drtící prostor vložena dělicí stěna, jež slouží jako ochranný prvek. Na tuto stěnu jsou přivaženy distanční válečky s vnitřním závitem pro připevnění k přední stěně komory. Dělicí stěnou tedy prochází pouze hřídele rotorů, na kterých je nasazen distanční kroužek.



Obr. 16: Drtící komora

Zdroj: vlastní zpracování

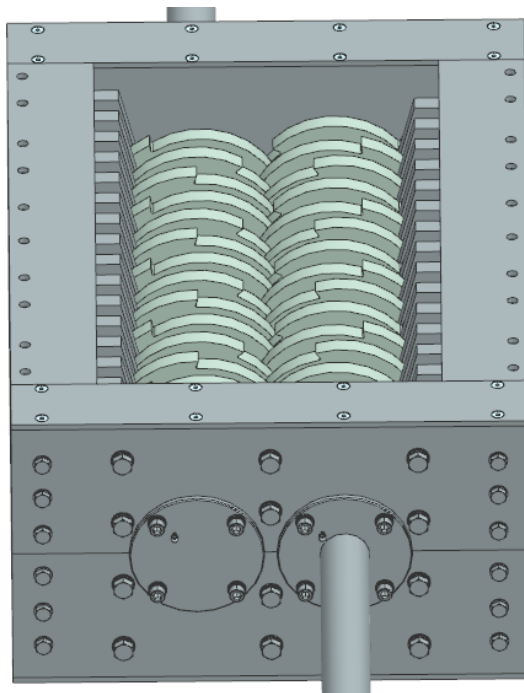
V prostoru mezi dělicí a přední stěnou vzniká meziprostor, v němž jsou uložena kuličková ložiska SKF 6016-Z, která jsou osazena v ložiskových domečcích. Pro zajištění jejich správné polohy jsou ložiska z jedné strany fixována víčkem a pojistným kroužkem, zatímco z druhé strany jsou opřena o osazení na hřídeli. Ze strany přiléhající k drtící komoře jsou ložiska jednostranně zakrytována a utěsněna, aby byla chráněna před nečistotami. Naopak z druhé strany jsou ložiska bez krytu, aby bylo možné je mazat. Mazání je řešeno pomocí mazací hlavice kuželového tvaru, která je zalomená o 90 ° a našroubována ve víčku domečku.

Vzhledem k možnému pronikání prachu, drobných nečistot či kapalin do meziprostoru byly do spodní části ochranného krytu drtící komory navrženy drážky, viz obrázek 18, které umožňují volný odvod těchto nečistot ven z konstrukce. Hřídel procházející víčkem ložiskového domečku je navíc utěsněna O-kroužkem, jež zabraňuje úniku maziva, vnikání nečistot a zajišťuje správnou funkčnost ložisek.

Celá drtící komora je uložena na ocelovém rámu, ke kterému je připevněna přes přírubu na bočních stěnách šroubovými spoji. Jelikož ochranné kryty meziprostoru vyčnívají nad úroveň

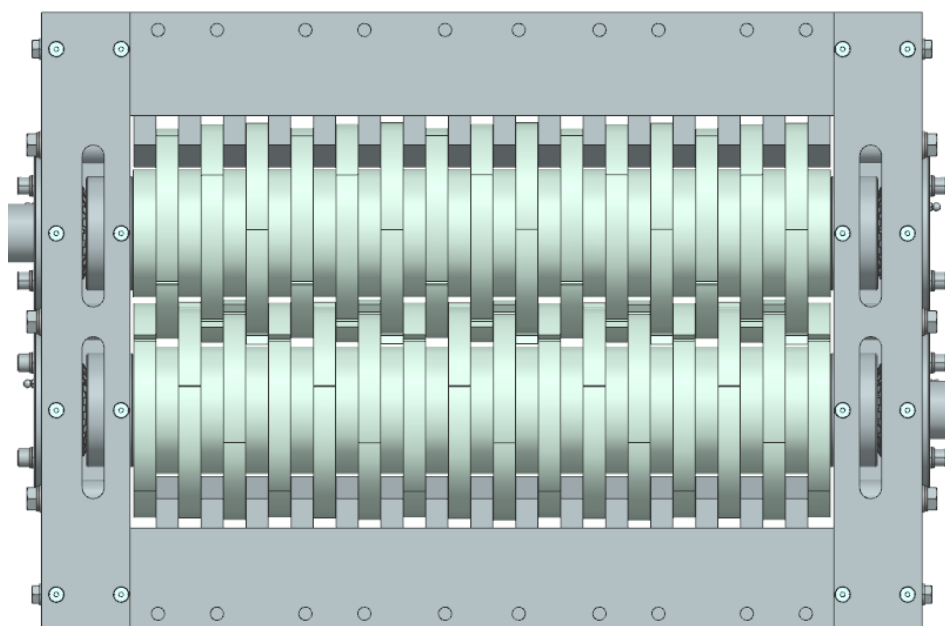
drtící komory, tak je mezi rám a komoru ještě vložen distanční plech, který tuto mezeru vyplňuje a zajišťuje správné dosednutí. Ochranný kryt je upevněn k drtící komoře pomocí šroubů se zápusťnou hlavou, aby byla zachována kompaktnost drtiče. Všechny komponenty drtící komory, s výjimkou pevných segmentů, jsou vyrobeny z běžné konstrukční oceli S355J2, která se vyznačuje dobrou svařitelností a dostatečnou pevností pro dané namáhání.

Finální podoba drtícího mechanismu je znázorněna na obrázku 17, kde je zobrazen boční pohled na drtič, zatímco obrázek 18 zachycuje pohled na drtič ze spodní strany.



Obr. 17: Boční pohled na drtič

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 18: Pohled na drtič ze spodní strany

Zdroj: vlastní zpracování

2.6.2 Finální konstrukční řešení ocelové konstrukce

Nosnou část celého zařízení tvoří ocelová konstrukce, která zajišťuje stabilitu, pevnost a správné ukotvení všech klíčových prvků drtiče. Tato konstrukce se skládá z rámu a čtyř nohou, přičemž její návrh byl přizpůsoben dynamickému zatížení a provozním podmínkám drtiče. Celá konstrukce je vyrobená svařováním a využívá vhodné výtuhy a zesílení.

Hlavním nosným prvkem konstrukce je rám, ke kterému je pevně připevněn drtič, včetně pohonů a skluzu. Pro jeho výrobu byl zvolen profil HEB 160 dle ČSN EN 10025-2, který poskytuje dostatečnou tuhost. Zároveň díky profilu ve tvaru písmene „H“ s širokými přírubami je vhodný pro snadné přišroubování ostatních částí zařízení. Vnější rozměry rámu jsou 1555 x 880 mm. Aby byl spoj profilů vizuálně i konstrukčně kvalitní, byly jejich konce seříznuty pod úhlem 45 °. V rámu jsou vyvrtány otvory o průměru 18 mm, které slouží k upevnění drtiče a skluzu pomocí šroubů M16. Pro zvýšení pevnosti a tuhosti je rám ještě zesílen výtuhami, které jsou umístěny z vnější strany HEB profilu. Celkem jsou do konstrukce začleněny tři výtuhy na delší straně a jedna na kratší straně, což zabraňuje kroucení a deformacím při provozu.

Dalším důležitým prvkem rámu jsou výplně z plechu o tloušťce 5 mm, které jsou navařeny z vnitřní strany rámu. Tyto výplně vytvářejí uzavřený profil, jenž zabraňuje hromadění rozdrčeného plastu uvnitř rámu. Tato úprava je zásadní při drcení různých typů plastů, kde je klíčové zachovat co nejvyšší čistotu recyklovaného materiálu.

Celý rám je podepřen čtyřmi nosnými nohami. Ty jsou vyrobeny z dutého profilu s čtvercovým průřezem, nazývaným „jekl“, s rozměry 160 x 160 x 12,5 mm podle ČSN EN 10219-2. Na užší straně jsou nohy rozšířeny na šířku širší strany, což přispívá k lepší stabilitě zařízení při provozu. Konstrukce je ze všech stran zavětrována, aby byla eliminována možnost deformací. Zavětrování je vedeno vždy do středu rámu a je vyrobeno opět z profilu „jekl“, ale o rozměrech 100 x 100 x 10 mm.

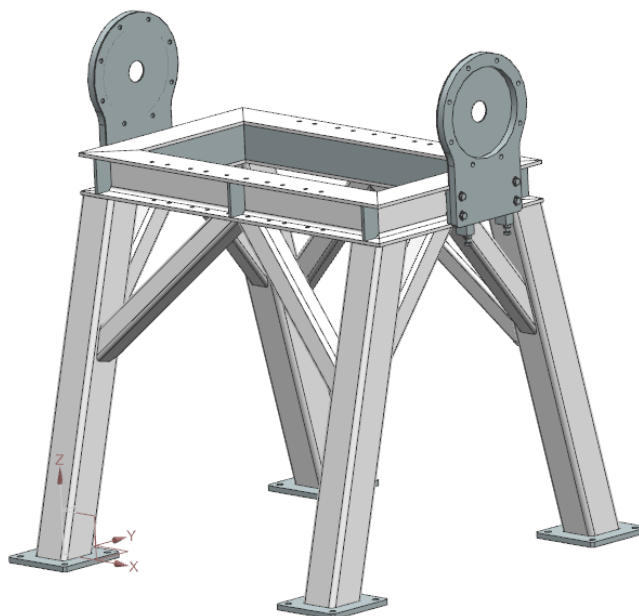
Ocelová konstrukce bude pevně ukotvena k betonové podlaze pomocí chemických kotev. Na každé noze je přivařena kotvicí deska o rozměrech 300 x 300 x 20 mm, která obsahuje čtyři otvory o průměru 26 mm. Tyto díry umožňují kotvení pomocí závitových tyčí M22, přičemž jejich průměr je o 4 mm větší, aby bylo možné vrtání přímo skrz desku do betonu. Celkové rozměry rámu včetně kotvicích desek jsou 1695 x 1695 x 1500 mm.

Na straně rámu, kde jsou umístěny pohony, je do HEB profilu vyvařena upevňovací deska pohonu, která slouží pro připevnění konzole pohonu a zároveň jako výtuhy profilu. Elektromotor s plochou převodovkou je upevněn k rámu přes tyto konzole, které zároveň fungují i jako reakční ramena zabraňující otáčení pohonu při přenosu kroutícího momentu.

Ke spodní stěně rámu je navíc přivařen stavěcí mechanismus pohonu, který umožňuje přesné nastavení výšky pohonu. Tento mechanismus je vyroben z ocelové čtvercové tyče dle ČSN EN 10059 s rozměry 40 x 40 x 55 mm, ve které je vyříznut závit M16. Do závitu je našroubován stavěcí šroub, jenž zajišťuje seřízení pohonu tak, aby nedocházelo k ohýbání hřídelí drtiče a nadměrnému namáhání ložisek. Pro přesné nastavení jsou v konzoli pohonu vyfrézovány drážky, které umožňují posun pohonu ve svislém směru (ose Z) až o ± 10 mm. Po nastavení správné výšky je proti povolení použit princip kontra matice, který zabrání nechtěnému pohybu pohonu při vystavení vibracím.

Nosný rám a nohy jsou vyrobeny z konstrukční oceli S235JR. Naopak výztuhy, výplně rámu, kotvící desky, konzole pohonu a stavěcí mechanismus byly zhotoveny z konstrukční oceli S355J2, protože disponují lepšími mechanickými vlastnostmi.

Na obrázku 19 je znázorněna kompletní ocelová konstrukce, která představuje finální řešení této části zařízení.



Obr. 19: Ocelová konstrukce drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

2.6.3 Finální konstrukční řešení násypky

Vstupní násypka je klíčovým prvkem drtícího zařízení, který zajišťuje plynulé podávání a usměrňování materiálu do drtící komory. Její konstrukce je navržena tak, aby umožňovala dopravu plastového odpadu jednak pásovým dopravníkem, ale také kolovým nakladačem nebo manipulátory s drapákem. Kromě funkce podávání materiálu plní násypka také ochrannou roli, kdy chrání drtič před možnými nárazy při navážení plastového odpadu. Díky optimálnímu sklonu stěn je zajištěno, že se materiál bez problémů dostane do drtící komory bez hromadění nebo ucpávání.

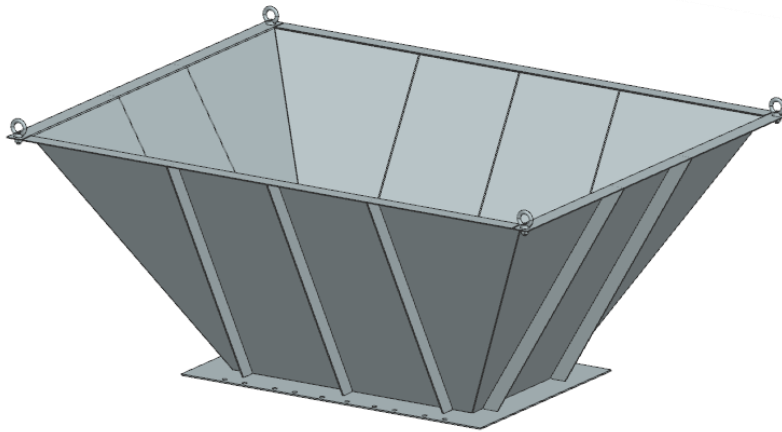
Celá násypka je vyrobena svařováním plechů z materiálu S355J2. Základna násypky kopíruje tvar drtiče, tudíž je vyříznuta z plechu o rozměrech 1195 x 840 mm s tloušťkou 5 mm. Vnitřní rozměry zase odpovídají rozměrům drtícího prostoru (955 x 560 mm), čímž je zajištěna její kompatibilita s drtičem. Zároveň je základna opatřena stejnými otvory jako příruby drtiče, aby bylo možné pevné připevnění pomocí šroubů.

Boční a čelní stěny násypky jsou rovněž vyrobeny z plechu, ale o tloušťce 3 mm a mají lichoběžníkový tvar. Tyto stěny svírají se základnou úhel 60 °, což umožňuje plynulé skluzávání materiálu do drtící komory. Vrchní hrana všech stěn je ohnutá v délce 60 mm pod úhlem 60 ° a následně svařena se sousedními hranami, čímž se vytvořil pevný lem, který zvyšuje celkovou

tuhost konstrukce. Násypka se na každou stranu rozšiřuje o 500 mm, což znamená, že její celkové rozměry činí 2080 x 1685 x 875 mm. Konstruktivní řešení násypky je znázorněno na obrázku 20.

Pro zajištění dostatečné odolnosti proti deformacím při zatížení materiálem jsou stěny násypky vyztuženy žebry o tloušťce 5 mm. Na delších stranách jsou umístěna tři žebra a na kratších stranách dvě žebra.

Pro snadnou manipulaci a montáž je násypka ještě vybavena čtyřmi šrouby s okem, přičemž každý z nich je umístěn na jednom rohu. Tyto šrouby umožňují bezpečné uchycení při transportu a instalaci zařízení.



Obr. 20: Násypka drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

2.6.4 Finální konstrukční řešení skluzu

Skluz je nedílnou součástí drtícího zařízení. Slouží k odvádění rozdrčeného materiálu z drtící komory na pásový dopravník umístěný pod drtičem.

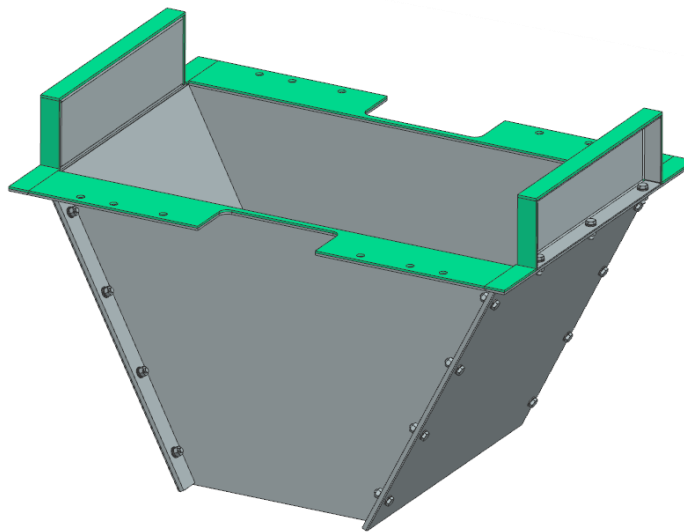
Je tvořen dvěma bočními a dvěma čelními stěnami z plechu o tloušťce 3 mm. Boční stěny jsou přivařeny k přírubám tloušťky 5 mm pod pravým úhlem, zatímco čelní stěny jsou připevněny pod úhlem 117 °, což zaručuje požadované zúžení skluzu na šířku 450 mm. Toto zúžení je nutné pro optimální navázání skluzu na pásový dopravník se šířkou pásu 600 mm. Příruby bočních stěn jsou v místě zavětrování vyříznuty tak, aby zapadly do rámu ocelové konstrukce. Čelní stěny skluzu nejsou s bočními stěnami svařeny, ale jsou k nim připojeny pomocí spojovacích výztuh a šroubových spojů. Tento konstrukční prvek umožňuje snadnou montáž skluzu pod drtič, což by u svařovaného provedení nebylo možné.

Vzhledem k tomu, že skluz je připevněn ke spodní části rámu drtiče, vzniká mezi jeho vstupem a drtící komorou mezera. Tato mezera je vyplněna krycím plechem, který je k přírubě čelní stěny připevněn třemi šrouby. Krycí plech je vyroben z 3 mm plechu. Jeho hrany jsou po celém obvodu ohnuty a následně zavařeny, aby na ně bylo možné nalepit pryžové těsnění. Toto řešení, zobrazené na Obr. 21, zabraňuje úniku rozdrčeného plastu mimo požadovaný prostor.

Pro zajištění maximální těsnosti skluzu je pryžové těsnění umístěno nejen mezi krycím plechem, ale také mezi skluzem a rámem ocelové konstrukce. Těsnění bude vyrobeno na míru a nalepeno pomocí chemoprenu na přírubu skluzu i krycí plech.

Výstupní otvor skluzu má rozměry 580 x 450 mm a jeho celková výška bez krycích plechů je 650 mm. Naopak vstupní otvor je navržen tak, aby přesně kopíroval tvar drtící komory, přičemž na každou stranu je rozšířen o 10 mm. Tím se zajistí, že ve skluzu nezůstanou zbytky rozdrčeného plastu, což je důležité pro zachování čistoty výstupní frakce při změně drčeného materiálu.

Veškeré části skluzu jsou vyrobeny z materiálu S355J2 a jeho finální řešení je zobrazeno na následujícím obrázku 21.



Obr. 21: Skluz drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

2.6.5 Finální konstrukční řešení záchytné vany

Záchytná vana, která je umístěna na betonové podlaze přímo uprostřed pod drtícím zařízením, tvoří nezbytnou součást konstrukce. Jejím hlavním úkolem je zachytávat kapaliny, jež mohou být součástí plastového odpadu. Díky umístění vratné stanice pásového dopravníku uvnitř vany jsou veškeré kapaliny odváděny do této sběrné vany, čímž se zabraňuje jejich nekontrolovanému úniku do okolního prostředí.

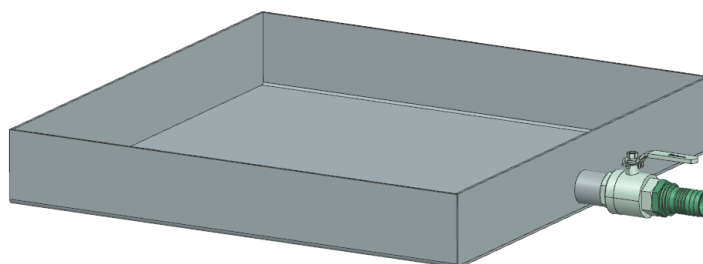
Vana má čtvercový tvar a je vyrobena z plechu o tloušťce 5 mm. Konstrukčně je řešena tak, že na dvou protilehlých koncích je plech ohnut, čímž vzniká nejen dno vany, ale i dvě boční stěny. Do tohoto základního těla vany jsou přivařena čela, která uzavírají celou konstrukci.

Jedno z čel obsahuje otvor o průměru 56 mm, který je umístěn 14 mm od dna vany. Tento otvor slouží jako výpustný bod pro odvod zachycených kapalin. Na otvor navazuje přivařený ocelový nátrubek s jmenovitou světlostí DN 50 podle normy ČSN EN 10241. Nátrubek má celkovou délku 56 mm a vnější průměr 66,3 mm. Je vybaven závitem G 2", který umožňuje připojení mosazného kulového kohoutu DN 50 s vnitřním a vnějším závitem, odpovídajícím normě ČSN EN 1254-4.

Kohout se ovládá pomocí páky a na jeho výstup je našroubován mosazný hadicový násadec se šestihranem a vnějším závitem G 2", který dovoluje připojení běžných 2palcových hadic.

Tento systém zajišťuje jednoduché vypouštění zachycených kapalin buď přímo pomocí připojené hadice nebo alternativně prostřednictvím různých typů čerpadel. Díky tomu je možné kapaliny bezpečně odvádět do sběrné nádoby či kanalizačního systému podle potřeby provozu.

Rozměry vany bez připojeného nátrubku a dalšího šroubení činí 1000 x 1000 x 150 mm. Celá konstrukce, viz Obr. 22, je vyrobena z materiálu S355J2, přičemž pro zvýšení odolnosti proti korozi bude záchytná vana pozinkována. Tato povrchová úprava zajistí vyšší životnost vany i při dlouhodobém vystavení vlhkosti a chemickým látkám obsaženým v zachycených kapalinách.



Obr. 22: Záchytná vana drtícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

2.6.6 Kompletní konstrukční řešení drtícího zařízení

Finální konstrukční řešení drtícího zařízení je koncipováno jako stacionární dvouhřídelový pomaloběžný drtič, který je schopen zpracovávat různé druhy běžně recyklovatelných plastů, jako jsou LDPE, HDPE, PET, PS, PP, PVC, ABS a další materiály s maximální pevností ve smyku 65 MPa. Kromě plastů je zařízení vhodné také pro zpracovávání kartonů, dřeva, kabelů nebo plechovek, což zajišťuje jeho využití v různých recyklačních aplikacích. Zařízení je poháněno dvěma elektromotory o výkonu 11 kW, které jsou spojeny s plochými převodovkami. Tento zvolený pohon zajišťuje výstupní otáčky hřídelí 19 min^{-1} a výstupní krouticí moment 5 647 Nm, což je dostatečný výkon pro drcení i houževnatějších plastových materiálů. Ochrana proti přetížení je řešena pomocí frekvenčního měniče, který umožňuje plynulou regulaci otáček. Tento systém zajišťuje spolehlivý a bezpečný provoz, přičemž poskytuje možnost přizpůsobit rychlost otáčení hřídelí v závislosti na drceném materiálu.

Drtecí jednotka se skládá ze dvou rotorů, na nichž je umístěno celkem 16 + 15 drtecích kotoučů. Každý kotouč má průměr 300 mm, přičemž břit je široký 30 mm a hloubka řezu činí 15 mm. Střížná vůle mezi kotouči je nastavena na 0,5 mm, což zajišťuje efektivní rozmělnění plastového odpadu na požadovanou frakci. Odhadovaná velikost výstupního materiálu činí přibližně 30 x 15 mm.

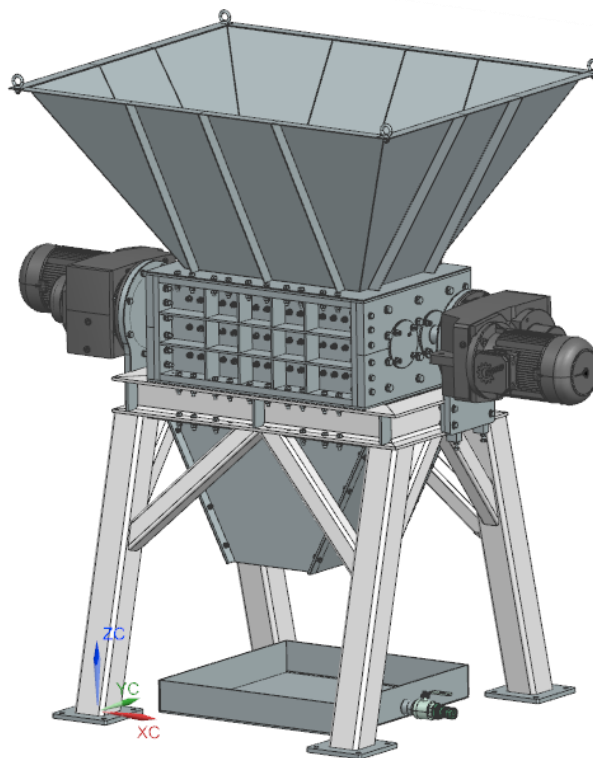
Velikost vstupního otvoru je 1955 x 1560 mm, čímž je zajištěno snadné plnění drtecí komory různými způsoby, jako například pomocí dopravníku nebo nakladače. Pracovní prostor drtecí komory má rozměry 955 x 560 mm, zatímco výstupní otvor, kterým je drcený materiál odváděn na pásový dopravník, má rozměry 580 x 450 mm. Přesná kapacita zařízení závisí na konkrétním

drceném materiálu, nicméně dle navržených parametrů lze odhadnout průchodnost drtiče v rozmezí cca 1500 až 2000 kg plastového odpadu za hodinu.

Drťící jednotka je pevně uchycena v ocelové konstrukci, která je přizpůsobena pro uchycení pohonné soustavy, drťící komory, skluzu a dalších prvků. Elektromotory s převodovkami jsou upevněny na konzolách s drážkami, což umožňuje jejich přesné seřízení a minimalizuje deformace hřídelí během provozu.

Součástí drťícího zařízení není pásový dopravník, protože jeho délka, sklon a konfigurace závisí na specifických požadavcích zákazníka a způsobu, jakým bude zařízení využíváno. Zařízení může být integrováno do recyklační linky, kde bude dopravník přepravovat rozdrcený materiál do dalších zařízení, jako jsou např. mlýny, granulátory, mycí a sušící linky, extrudéry nebo lisovací stroje. Alternativně může sloužit pouze k rozdrcení materiálu a následné dopravě přes pásový dopravník do kontejnerů určených pro následnou přepravu. Nicméně drťící zařízení je navrženo tak, aby bylo kompatibilní se standardními dopravníky o šířce 500 až 700 mm. Jejich umístění je plánováno ve směru, kde nejsou umístěny pohony, tedy kolmo k ose elektromotorů a převodovek. Toto uspořádání minimalizuje nároky na prostor a umožňuje efektivní tok rozdrceného materiálu směrem k dalšímu zpracování.

Celkové rozměry drťícího zařízení činí přibližně 3330 x 1695 x 2936 mm a hmotnost celého stroje je přibližně 4300 kg. Konstrukce zařízení je navržena s důrazem na mechanickou odolnost, dlouhou životnost a snadnou údržbu. Většina spojů je realizována pomocí šroubů, což zajišťuje jednodušší montáž, přepravu i případné servisní zásahy. Zařízení je koncipováno tak, aby poskytovalo vysokou efektivitu, spolehlivost a univerzálnost při recyklaci plastových materiálů. Kompletní podoba drťícího zařízení je zobrazena na obrázku 23.



Obr. 23: Kompletní konstrukční řešení drťícího zařízení

Zdroj: vlastní zpracování

3 Diskuze

V rámci diplomové práce byla vytvořena studie konstrukčního řešení dvouhřídelového drtícího zařízení určeného pro recyklaci plastových materiálů a zároveň byl proveden výpočet jeho klíčových částí. Navržené zařízení nabízí široké možnosti využití v různých recyklačních procesech. Vyhodnocení konstrukčního návrhu ukázalo, že zařízení plně odpovídá specifikovaným požadavkům společnosti Žďas, a.s. Splněny byly všechny klíčové parametry, včetně schopnosti zpracovávat různorodé druhy plastových materiálů od větších po menší předměty. Zařízení rovněž splňuje požadavek na výslednou velikost výstupní frakce. Maximální velikost 5 cm byla překonána, jelikož drtič produkuje frakci o velikosti přibližně 30 x 15 mm. Dále odpovídá požadavkům na kapacitu, kterou podle odhadů dokonce převyšuje o zhruba 500 kg, a na požadované rozměry, jako je délka rotoru nebo možnost naložení na běžný kamion, což vylučuje náklady spojené s přepravou nadměrného nákladu.

Předností konstrukce je především její univerzálnost, robustnost, snadná montáž a jednoduchá údržba. Díky použití šroubových spojů je možné snadno vyměnit nejnáchylnější součásti, což zaručuje dlouhou životnost jednotlivých komponent. Oproti běžným drtičům, zaměřeným na konkrétní oblast zpracování, je toto zařízení všestrannější a schopné zpracovávat nejen plasty, ale také jiné materiály, jako například kartony, elektrické kabely, dřevo či plechovky. Navíc jeho konstrukce je mechanicky jednodušší, což přináší ekonomické výhody v podobě nižších nákladů na výrobu, montáž a údržbu.

Specifikem drtiče je použití dvou rotorů otáčejících se proti sobě, díky čemuž není potřeba přítlačné zařízení, protože drtící kotouče si sami vtahují materiál mezi sebe. Použití dvou samostatných elektrických pohonů s převodovkou a frekvenčním měničem navíc výrazně snižuje riziko kontaminace výstupní frakce hydraulickým olejem, minimalizuje potřebu častější údržby a umožňuje nezávislé řízení otáček obou hřídelí. To zvyšuje flexibilitu provozu, poskytuje účinnější ochranu proti přetížení a usnadňuje optimalizaci výkonu podle aktuální zátěže. Robustní konstrukce zařízení také umožňuje v budoucnu zvýšit výkon pohonů až na 15 kW, pokud by bylo potřeba. Pro aktuální požadavky společnosti Žďas, a.s. však výkon 11 kW plně dostačuje, protože zařízení je schopno zpracovávat materiály s maximální pevností ve smyku až 65 MPa.

Přestože návrh splňuje všechny klíčové požadavky, existují možnosti pro jeho další optimalizaci. Jedním z aspektů, které by mohli být v budoucnu vylepšeny, je konfigurace drtících kotoučů. Zvýšení hloubky řezu břitů by mohlo přispět k účinnějšímu uchopení materiálu a eliminaci rizika jeho vyklouznutí při vtahování mezi rotory. Dále by bylo možné zvážit lepší utěsnění meziprostoru, kde jsou uložena ložiska, ačkoli použití zakrytovaných ložisek a drážek ve spodní části krytu tohoto prostoru již poskytuje dostatečnou ochranu. Alternativou by mohlo být použití dvouřadých kuličkových ložisek pro ještě vyšší životnost, i když současná konfigurace již splňuje požadovanou trvanlivost. Další možnou úpravou by mohlo být zavedení antivibračních prvků, např. silentbloků, v případě, že by zařízení při provozu vykazovalo nadměrné vibrace. Kromě toho by bylo možné na drtící kotouče implementovat vyměnitelné břitové destičky, které by prodloužily jejich životnost a snížily náklady na výměnu. Tento prvek by zároveň umožnil lepší přizpůsobení drtících segmentů konkrétnímu zpracovávanému materiálu.

Za vhodné se rovněž jeví uvažovat o konstrukční úpravě týkající se počtu drtících kotoučů na jednotlivých hřídelích. Použití stejného počtu kotoučů, například 16 ks na každé hřídeli, umožní vytvořit dva identické rotory, čímž by se zjednodušil návrh drtiče. Toto řešení by přineslo výhody při výrobě a montáži díky unifikaci součástí. Drtící komora by navíc mohla mít jednodušší konstrukci, protože by nebylo nutné vytvářet rozdílné boční stěny pro každý rotor. Zařízení by se tak stalo levnějším na výrobu.

Celkově však lze konstatovat, že navržený drtič představuje spolehlivé a ekonomicky výhodné řešení pro recyklaci plastů i dalších materiálů. Přínos drtiče spočívá především v podpoře recyklace, což významně přispívá ke snížení odpadu, ochraně životního prostředí a šetrnému využívání přírodních zdrojů.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout technické řešení dvouhřídelového drtiče plastů, který bude odpovídat požadavkům společnosti Žďas, a.s. a současně nabídne spolehlivé, efektivní a ekonomicky výhodné řešení pro recyklaci různorodých plastových materiálů. Důraz byl kladen především na univerzálnost zařízení, jednoduchost údržby a vysokou životnost klíčových součástí.

V rámci práce byla vypracována konstrukční studie celého zařízení a proveden výpočet nejdůležitějších částí. Byl zvolen vhodný pohonný systém tvořený dvěma elektromotory s převodovkami a frekvenčními měniči. Následně byly navrženy jednotlivé sestavy zařízení, jako je drtící komora s rotory, ocelová konstrukce, násypka, výstupní skluz a záchytná vana. Výsledkem jsou kompletní 3D modely a výkresová dokumentace zpracována ve zvoleném softwaru Siemens NX. Součástí výstupu jsou také kusovníky jednotlivých sestav, výpočetní zpráva, technický popis navrženého řešení a nákupní specifikace nakupovaných katalogových dílů.

Na základě provedených výpočtů a návrhu zařízení lze konstatovat, že všechny stanovené cíle byly úspěšně splněny. Zařízení splňuje požadované parametry společnosti Žďas, a.s. z hlediska kapacity, výstupní frakce, rozměrů i univerzálnosti použití. Navržený drtič je schopný efektivně zpracovávat jak větší plastové odpady, tak i drobnější materiály typu PET lahví, ale rovněž další suroviny jako dřevo, karton či kovové plechovky.

Z konstrukčního hlediska se jedná o robustní a spolehlivé zařízení, jenž nabízí možnost dalšího vývoje a rozšíření. Jako doporučení pro další výzkum se nabízí zejména optimalizace geometrie břitů drtících kotoučů a použití antivibračních prvků v případě potřeby tlumení vibrací. Dále by bylo vhodné konstrukčně sjednotit oba rotory na variantu se stejným počtem kotoučů, což by přispělo k jednodušší a levnější výrobě celého zařízení.

Diplomová práce tak přináší nejen návrh konstrukčního řešení zasazeného do rámce předem definovaných technických parametrů, ale i podněty pro jeho budoucí vývoj a optimalizaci ve společnosti Žďas, a.s. Navržený drtič může v praxi přispět ke zvýšení efektivity recyklačních procesů, ochranně životního prostředí a k odpovědnému nakládání s odpady.

Seznam použité literatury

1. PLASTCOMPANY. *Nožový mlýn – drtič plastů a jak vybrat vhodný stroj?* Online. 1PLASTCOMPANY. C2025. Dostupné z: <https://1plastcompany.cz/Nozovy-mlyn-drtic-plastu>. [cit. 2025-03-14].
- CAIBEITECH. *The Complete Guide to Plastic Crusher: Essential Tips and Best Practices*. Online. CaiBeiTech. C2023a. Dostupné z: <https://www.caibeitech.com/guide-to-plastic-crusher/>. [cit. 2025-03-14].
- CAIBEITECH. *The Complete Guide To Plastic Recycling Machinery*. Online. CaiBeiTech. C2023b. Dostupné z: <https://www.caibeitech.com/plastic-recycling-machinery/>. [cit. 2025-03-14].
- DE NAOUM, Kat. *All About Plastic*. Online. Xometry. 2023, November 15, 2024. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-plastic/>. [cit. 2025-03-14].
- DEOS TECHNOLOGY. *Čtyřhřídelové drtiče*. Online. Deostech. C2025c. Dostupné z: https://www.deostech.cz/drtice/ctyrhridelove_drtice. [cit. 2025-03-14].
- DEOS TECHNOLOGY. *Dvouhřídelové drtiče*. Online. Deostech. C2025b. Dostupné z: https://www.deostech.cz/drtice/dvouhridelove_drtice. [cit. 2025-03-14].
- DEOS TECHNOLOGY. *Jednohřídelové drtiče*. Online. Deostech. C2025a. Dostupné z: https://www.deostech.cz/drtice/jednohridelove_drtice. [cit. 2025-03-14].
- E-KONSTRUKTÉR. *Hodnoty mezí pevnosti, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel*. Online. Portál pro strojní konstruktéry. 2013b. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>. [cit. 2025-03-17].
- E-KONSTRUKTÉR. *Plasty- mechanické vlastnosti*. Online. Portál pro strojní konstruktéry. 2013a. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>. [cit. 2025-03-17].
- FRIES, Jiří. *Reverzní kladivový mlýn*. Online. In: STROJE PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADU. 2007. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/SZO/vyukovy_text.pdf. [cit. 2025-03-14].
- FRIES, Jiří. *STROJE PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADU*. Online. Ostrava: Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1511-4. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/SZO/vyukovy_text.pdf. [cit. 2025-03-14].
- HARPER, Charles A. a PETRIE, Edward M. *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. Online. Wiley, 2003. ISBN 9780471459217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471459216>. [cit. 2025-03-14].
- HOPEWELL, Jefferson; DVORAK, Robert a KOSIOR, Edward. *Plastics recycling: challenges and opportunities*. Online. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009, roč. 364, č. 1526, s. 2115-2126. ISSN 0962-8436. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>. [cit. 2025-03-14].

- HOPMANN, Christian; DAHLMANN, Rainer; FACKLAM, Martin a NIESSNER, Norbert. Overview of Major Recycling Technologies. Online. In: *Recycling of Plastics*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2022, s. 239-273. ISBN 978-1-56990-856-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908570.007>. [cit. 2025-03-14].
- JANSEN, Jeffrey. Plastics – It's All About Molecular Structure. Online. *Plastics Engineering*. 2016, roč. 72, č. 8, s. 44-49. ISSN 1941-9635. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2016.tb01587.x>. [cit. 2025-03-13].
- JUNGA, Petr. *TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ (1)*. Online. E-Learning Mendelu. 2015. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/210/17165.pdf. [cit. 2025-03-14].
- KHAIT, K. Recycling, Plastics. Online. In: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley, 2003, s. 657-678. ISBN 9780471440260. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst311>. [cit. 2025-03-14].
- KRAIBURG TPE. *What is TPE*. Online. KRAIBURG TPE. Dostupné z: <https://www.kraiburg-tpe.com/en/thermoplastic-elastomers>. [cit. 2025-03-14].
- LENFELD, Petr. *Přípravné zpracování plastů*. Online. Katedra tváření kovů a plastů - Skripta. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm#036. [cit. 2025-03-14].
- LENFELD, Petr. *Talířový nárazový mlýn*. Online. In: *Přípravné zpracování plastů*. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm#036. [cit. 2025-03-14].
- LI, Houqian; AGUIRRE-VILLEGAS, Horacio A.; ALLEN, Robert D.; BAI, Xianglan; BENSON, Craig H. et al. Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges. Online. *Green Chemistry*. 2022, roč. 24, č. 23, s. 8899-9002. ISSN 1463-9262. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D2GC02588D>. [cit. 2025-03-14].
- LOLLEK, Petr. *Konstrukce drtiče plastového odpadu po 3D tisku*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Petr Křivohlavý. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/211778>. [cit. 2025-03-17].
- MITCALC. *Evolventní drážkování*. Online. MITCalc - Strojírenské, průmyslové a technické výpočty. C2003-2025. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/doc/shaftcon/help/cz/Splines1.htm>. [cit. 2025-03-19].
- MITCALC. *Základní rozměry evolventního drážkování*. Online. In: MITCalc - Strojírenské, průmyslové a technické výpočty. C2003-2025. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/doc/shaftcon/help/pic/ShaftSplineDim2.gif>. [cit. 2025-03-21].
- NORD. *Plochá převodovka s motorem: SK 7382AFSH - 160MP/4 TF*. Online. In: NORD – POHÁNĚCÍ TECHNIKA, S.R.O. NORD. 2025b. Dostupné z: https://shop.nord.com/CZ-cs/mynord/configurator?_gl=1*19rfawj*_gcl_au*MjEwMDQ5MTkzNy4xNzQyODQwOTg2*_ga*MTg2ODQzMTYxOC4xNzQyODQwOTg2*_ga_HYCKNKBTCV*MTc0Mjg0MDk4NS4xLjEu

- [MTc0Mjg0MTAwNy4wLjAuMA..#/configurator/d85bdb3-1e7c-412d-809c-dde9ce94360e](https://api.nord.com/ws/Service.svc/print/pdf/NORD_H7KTQV.0.pdf?BusinessObjectId=df6c423c-302b-4fc7-9201-178eb5c589e0&isdatasheet=true&configurationid=9bea5d52-cb12-4cd2-82ab-88a370d97034&lang=2B1420FF-AEEC-4014-BEFE-060F2D6F272E). [cit. 2025-03-26].
- NORD. *Technická specifikace: SK 7382AFSH - 160MP/4 TF 535E-112-340-A*. Online. In: NORD – POHÁNĚČÍ TECHNIKA, S.R.O. NORD. 2025a. Dostupné z: https://api.nord.com/ws/Service.svc/print/pdf/NORD_H7KTQV.0.pdf?BusinessObjectId=df6c423c-302b-4fc7-9201-178eb5c589e0&isdatasheet=true&configurationid=9bea5d52-cb12-4cd2-82ab-88a370d97034&lang=2B1420FF-AEEC-4014-BEFE-060F2D6F272E. [cit. 2025-03-26].
- PETERS, Edward N. Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers—Descriptions and Properties. Online. In: *Mechanical Engineers' Handbook*. Wiley, 2015. ISBN 9781118985960. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118985960.meh109>. [cit. 2025-03-14].
- PILAPITIYA, P.G.C. Nayanathara Thathsarani a RATNAYAKE, Amila Sandaruwan. The world of plastic waste: A review. Online. *Cleaner Materials*. 2024, roč. 11, article 100220. ISSN 2772-3976. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>. [cit. 2025-03-13].
- PLASTICS EUROPE. *Recycling technologies*. Online. Plastics Europe. C2025. Dostupné z: <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/>. [cit. 2025-03-14].
- PLASTICS FOR CHANGE. *Příklad kaskádové recyklace*. Online. In: Plastics for Change. 2021. Dostupné z: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/650bf3ee96714871f4364ce8/6913a308-2f71-4845-a9da-5e860e862993/Blog6.1.png?format=1500w>. [cit. 2025-03-14].
- PLASTICS FOR CHANGE. *The Different Types Of Recycling*. Online. Plastics For Change. 2021. Dostupné z: <https://www.plasticsforchange.org/blog/types-of-recycling>. [cit. 2025-03-14].
- SAMOSEBOU. *Doba plastová: (nejen) oceány jsou plné plastového odpadu*. Online. Samosebou. 2024. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2024/09/20/doba-plastova-nejen-oceany-jsou-plne-plastoveho-odpadu/>. [cit. 2025-03-14].
- SCHMIEMANN, Achim. *Mlecí komora nožového mlýna*. Online. In: Recycling of Plastics. 2022b. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908570.008>. [cit. 2025-03-14].
- SCHMIEMANN, Achim. *Typy rotorového nože*. Online. In: Recycling of Plastics. 2022a. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908570.008>. [cit. 2025-03-14].
- SCHMIEMANN, Achim; AMICI, Marco; SCHRÖDER, Thomas; VAN ROOST, Herman; JAHNKE, Eike et al. Mechanical Recycling. Online. In: *Recycling of Plastics*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2022, s. 275-433. ISBN 978-1-56990-856-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908570.008>. [cit. 2025-03-14].
- SKF. *6016-Z Kuličkové ložisko s těsněním nebo kryty*. Online. SKF. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6016-Z>. [cit. 2025-03-17].
- TECNOFER. *History of Plastic*. Online. Tecnofer. C2025. Dostupné z: <https://www.tecnofer.biz/en/history-of-plastic/>. [cit. 2025-03-14].

- TECH, Lars. *Termosety vs. termoplasty*. Online. Dr. Dietrich Mueller GmbH. 2022. Dostupné z: <https://www.mueller-ahlhorn.com/cs/termosety-vs-termoplasty/>. [cit. 2025-03-14].
- TERIER. *4 Hřídelové*. Online. Terier. C2022-2025b. Dostupné z: <https://www.terier.cz/cz/vyrobky/drtice/4-hridelove-drtice>. [cit. 2025-03-14].
- TERIER. *Jednohřídelové drtiče*. Online. Terier. C2022-2025a. Dostupné z: <https://www.terier.cz/cz/vyrobky/drtice/1-hridelove-drtice>. [cit. 2025-03-14].
- TERIER. *Mlýny*. Online. Terier. C2022-2025c. Dostupné z: <https://www.terier.cz/cz/vyrobky/mlyny>. [cit. 2025-03-14].
- TERIER. *Pracovní prostor čtyřhřídelového drtiče*. Online. In: Terier. C2022-2025e. Dostupné z: https://www.terier.cz/data/x_katalog/84/images/i4sb90070052kw_06m_f.jpg. [cit. 2025-03-14].
- TERIER. *Pracovní prostor dvouhřídelového drtiče*. Online. In: Terier. C2022-2025d. Dostupné z: https://www.terier.cz/data/x_katalog/7/images/p1040988m_f.jpg. [cit. 2025-03-14].
- WASTETRADE. *Historie Plastů*. Online. WasteTrade. C2025a. Dostupné z: <https://www.wastetrade.com/cs/resources/plastics/introduction-to-plastics/history-of-plastics/>. [cit. 2025-03-14].
- WASTETRADE. *Recyklace plastů*. Online. WasteTrade. C2025b. Dostupné z: <https://www.wastetrade.com/cs/resources/plastics/plastic-waste-management/plastic-recycling/>. [cit. 2025-03-14].
- WILHELMUS, Bianca; STAPF, Dieter; SCHMIDT-RODENKIRCHEN, Achim; ASCHAUER, Stephan; GERDES, Thorsten et al. *Chemical Recycling*. Online. In: *Recycling of Plastics*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2022, s. 435-594. ISBN 978-1-56990-856-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908570.009>. [cit. 2025-03-14].
- WISCON ENVIROTECH. *Rotor jednohřídelového drtiče*. Online. In: Wiscon Envirotech. 2021. Dostupné z: <https://www.wiscon-tech.com/wp-content/uploads/2018/12/One-Shaft-Shredder.jpg>. [cit. 2025-03-14].
- WONG, J H; GAN, M J H; CHUA, B L; GAKIM, M a SIAMBUN, N J. *Shredder machine for plastic recycling: A review paper*. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022, roč. 1217, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1217/1/012007>. [cit. 2025-03-23].

Přílohy

Příloha A – 3D modely jednotlivých komponent a model sestavy

Příloha B – Výkresová dokumentace ve formátu PDF

Příloha C – Nákupní specifikace katalogových dílů