

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky 12118



**MECHANICKÁ DEZINTEGRACE
V TECHNOLOGIÍCH TERMOCHEMICKÉHO
ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Václav Bímon

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bímon** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **457636**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mechanická dezintegrace v technologiích thermochemického zpracování odpadů

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical size reduction in thermochemical waste treatment technologies

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologiemi thermochemického zpracování odpadů (zplyňování, pyrolýza).
- 2) Zpracujte rešerši zaměřenou na efektivní dezintegrační jednotky (konstrukční uspořádání, provozní parametry, energetická náročnost rozpojení) pro rozmělnění odpadů v technologiích pyrolýzy/zplyňování.
- 3) Pro vybraný typ odpadu navrhnete vhodnou dezintegrační jednotku, její základní konstrukční uspořádání a stanovte potřebný výkon elektromotoru.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

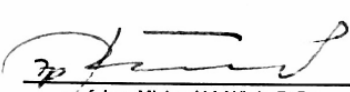
Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:


doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

3.0 -04- 2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své bakalářské práce ke studijním účelům.

V Praze dne

.....

Václav Bímon

Poděkování

Touto cestou děkuji doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za jeho cenné a podmětné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Jeho ochotný přístup mi byl cennou pomocí při tvorbě této práce.

Anotace

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení se s technologiemi termochemického zpracování, tedy pyrolýzou a zplyňováním, a nalezení efektivní technologie předúpravy typických vstupních surovin. Dále práce obsahuje rešerši nejpoužívanějších drtičů a mlýnů pro biomasu, pneumatiky a plast. V závěru práce je na základě teoretických poznatků navržena pro vybraný typ odpadu vhodná dezintegrační jednotka, její základní konstrukční uspořádání a stanoven potřebný výkon elektromotoru.

Klíčová slova: Dezintegrační jednotky. Drtiče. Mlýny. Pyrolýza. Zplyňování.

Annotation

The main goal of this bachelor thesis is to get acquainted with thermochemical processing technologies, i.e. pyrolysis and gasification, and to find effective technology of pretreatment of typical input raw materials. Further, the thesis includes a research of the most used crushers and mills for biomass, tyres and plastic. At the end of the thesis, based on the theoretical knowledge, a suitable disintegration unit, its basic structural design and the necessary performance of the electric motor are designed for the selected type of refuse.

Keywords: Gasification. Grinder. Mill. Pyrolysis. Size reduction machine.

Obsah

ÚVOD	7
1 TERMOCHEMICKÉ ZPRACOVÁNÍ	8
1.1 PYROLÝZA	8
1.2 ZPLYŇOVÁNÍ	10
1.3 TYPICKÉ SUROVINY	12
1.3.1 <i>Biomasa</i>	12
1.3.2 <i>Pneumatiky</i>	13
1.3.3 <i>Plast</i>	14
1.4 VLIV VELIKOSTI ČÁSTIC NA PYROLÝZU	15
1.5 PŘEDÚPRAVY MATERIÁLU PŘI TERMOCHEMICKÉM ZPRACOVÁNÍ	17
1.5.1 <i>Sušení</i>	17
1.5.2 <i>Mechanická dezintegrace</i>	18
2 DRCENÍ A MLETÍ	19
2.1 PRINCIP DRCENÍ	20
2.2 TYPY DRTIČŮ A MLÝNŮ	21
2.2.1 <i>Čelistové drtiče</i>	21
2.2.2 <i>Válcové drtiče a mlýny</i>	23
2.2.3 <i>Nožové drtiče</i>	25
2.2.4 <i>Nožové mlýny</i>	26
2.2.5 <i>Úderové drtiče a mlýny</i>	28
2.2.6 <i>Kulové mlýny</i>	29
2.3 ZHODNOCENÍ.....	31
2.4 ENERGETICKÁ NÁROČNOST	32
3 NÁVRH DEZINTEGRAČNÍ JEDNOTKY	34
3.1 VÝPOČET ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI	35
3.2 VÝPOČET OTÁČEK	35
3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	36
3.4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH.....	37
4 ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	39

SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM TABULEK.....	43
SEZNAM GRAFŮ	43
VZORCE	43

Úvod

S rostoucí populací lidstva, zvyšujícími se standardy a technologickou vyspělostí civilizace dochází k neustále větší poptávce po energiích. S ukojením této potřeby se pojí mnoho technologických a přírodních otázek, které je zapotřebí vyřešit, pokud nechceme předat svět další generaci ve zdevastovaném stavu.

I dnes je cca 85 % energie brána z tzv. vyčerpatelných zdrojů jako je uhlí či ropa. Přestože je stále možné nalézat nová naleziště těchto látek, tak zásoba se rapidně tenčí a je zapotřebí nalézt nové zdroje a metody, které dokáží fosilní paliva nahradit či nejlépe svými výhodami převýšit. Možností, jak tomuto problému zabránit, je například využívání obnovitelných zdrojů energie jako voda, vítr či slunce. Nicméně se svou efektivitou konvenčním způsobům výroby elektřiny nevyrovnají. Důležitost ropy nelze také zanedbat v transportní technice, kde je většina strojů na produktech této látky závislá.

Dalším významným problémem je nárůst množství odpadů, které společnost každým dnem vyprodukuje. I když se dá část recyklovat, většina skončí v lepším případě na skládkách, v horším ve volné přírodě. Jednou z možností, jak se odpadu zbavit je samozřejmě spalování. Nicméně zde dochází ke vzniku škodlivých emisí a také zde není již žádné materiálové využití, což je vzhledem k další využitelnosti odpadů škoda. Hlavním cílem by měla být co nejlepší materiálově energetická regulace. Tento zmíněný efekt si kladou pyrolitické a zplyňovací technologie. Zvýšení efektivity lze dosáhnout lepší technologickou předúpravou odpadů.

Cílem této bakalářské práce je zpracovat rešerši na téma efektivní dezintegrační jednotky pro mechanickou dezintegraci odpadů před jejich termochemickým zpracováním pomocí pyrolýzy či zplyňování.

1 Termochemické zpracování

Termochemické zpracování spočívá v rozkladu základní suroviny na požadovaný produkt za vysoké teploty a tlaku. Lze ho rozdělit na dva základní typy, a to pyrolýzu a zplyňování.

1.1 Pyrolýza

Pyrolýza je fyzikálně-chemický děj, při kterém se surovina termicky rozkládá na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek, to vše bez přístupu kyslíku či případně za jeho velmi omezeného množství vůči potřebnému množství k naprostému spálení suroviny. Během procesu dochází ke vzniku syntézního plynu, oleje a polokoxsu. Reakčními produkty jsou plyny, plynné uhlovodíky, stejně jako pevné, koxsu podobné zbytky s inertními materiály. [1]

Průběh pyrolýzy můžeme obecně rozdělit do třech fází.

Tou první je sušení, kdy dochází v oblasti cca do 200 °C ke zplynění fyzikálně vázané vody. Tento proces je energeticky velice náročný, jelikož je zapotřebí zhruba 2250 KJ energie na 1 kg vody. Z tohoto důvodu je vhodná předúprava vstupního materiálu, například tříděním, mletím, drcením, sušením atd. [2]

V druhé fázi při teplotách okolo 300-500 °C dochází ke karbonizaci a vzniká odštěpení výšemolekulárních organických látek (celulóza, bílkoviny, tuky atd.), plyn, kapalné uhlovodíky a pevný podíl. [2]

K dalšímu štěpení dochází při teplotách nad 500 °C a vznikají stabilní plyny jako vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan. [2]

Obecně lze pyrolýzní procesy rozdělit na dva základní postupy, a to rychlou a pomalou pyrolýzu. [2]

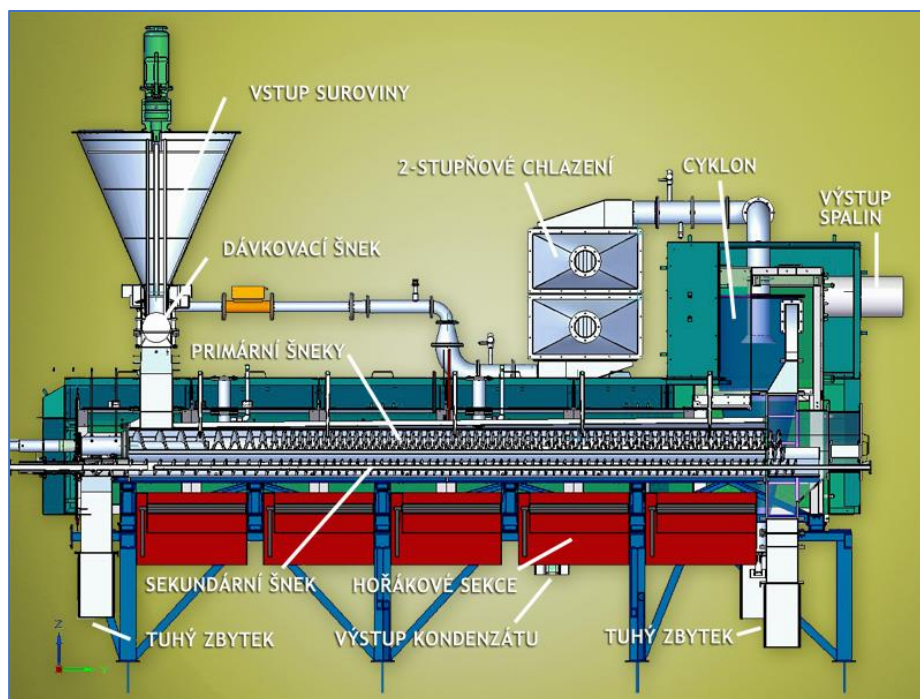
Při rychlé pyrolýze je pro vysokou rychlost ohřevu (500 až 1000 °C za minutu) nezbytná malá velikost částic, ze které se pyrolýzovaný materiál skládá. Proto je nutné vstupní surovinu nejdříve nadrtit na malé kousky, řádově několik milimetrů. Výtěžek pyrolýzního oleje se pohybuje okolo 60-75 %_{hm.}, koxsu zhruba 20 %_{hm.} a plyn 10-20 %_{hm.}. U pomalé pyrolýzy je možné použít větší kusy materiálu a výtěžek biokoxsu tvoří zhruba 35 %_{hm.} [2]

U tlaku a teploty platí, že se stoupajícím tlakem probíhá štěpení uhlovodíkových molekul symetričtěji a dochází ke snížení požadavků na teplo pyrolýzy. S rostoucí teplotou se štěpí silnější vazby, což má za následek rozdílných výtěžků pyrolýzních produktů, tedy pyrolýzního oleje, pevného zbytku a plynu. [2] [3]

Vstupní surovinou je nejčastěji odpadní biomasa, ale používá se i mnoho jiných materiálu jako jsou pneumatiky, plastové odpady, komunální odpad, městské kaly i různé

druhy nebezpečných odpadů. Dle vstupního materiálu je zapotřebí použít vhodné technologické uspořádání a způsob zpracování. [4]

Výstupním primárním produktem je pyrolýzní olej (bioolej) tmavě hnědé barvy s hustotou zhruba $1,2 \text{ kg/dm}^3$ a výhřevností 16-19 kJ/kg. Dalšími hlavními produkty jsou tuhý zbytek (koks) a pyrolýzní plyn. Pyrolýzní olej i plyn je možné využívat jako palivo do spalovacích motorů. Koks je hojně užíván jak topné palivo [4]



Obr. 1. Schéma jednotky Pyromatic [9]

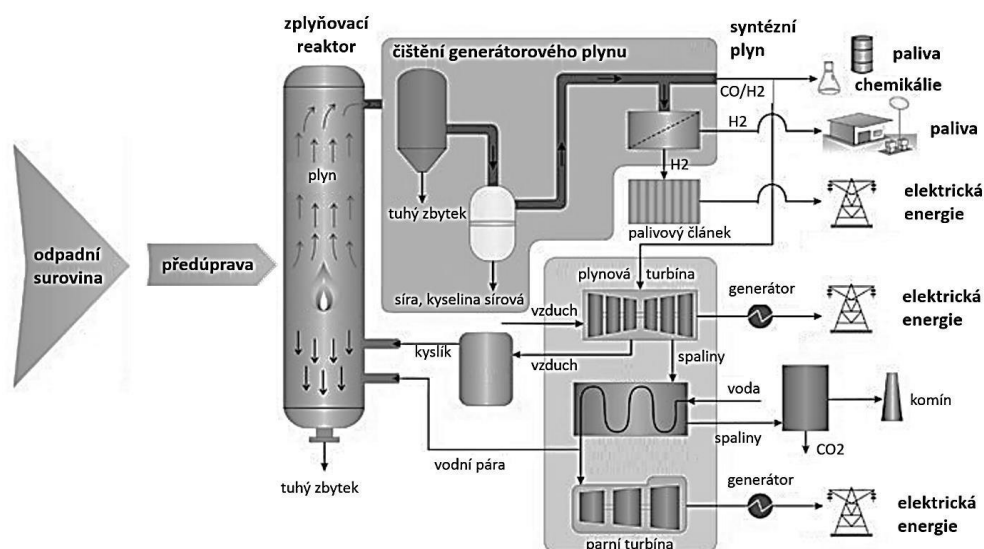
Příklad technologického uspořádání zpracování odpadů lze vidět na obr. 1, kde je vyobrazeno schéma jednotky od firmy Pyromatic [5], kde zpracovávaným odpadem jsou převážně pneumatiky a plasty. Vstupní surovina zde může být podávána v několika formách, nejlepší je však nadrcená či nařezaná na částice o objemu 125 cm^3 . Zpracovávat ale lze i materiály sypké či tekuté. Vstup materiálu do násypky je dodáván přes pásový dopravník. Dále je posun suroviny řízen pomocí tří šneků s plynule regulovatelnými otáčkami. Jakmile je pec vyhřátá na požadovanou teplotu, nastává postupný přesun materiálu do pyrolýzní retorty. Ta je ohřívána pomocí pěti sekcí plynových hořáků napájených propanem, které umožňují dosažení provozní teploty až na $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro většinu materiálů je minimální setrvání v pyrolýzní jednotce zhruba 30 minut. Během procesu dochází k rozkladu suroviny na pevný uhlíkový zbytek, který je odebírán do popelového boxu na konci pyrolýzní trasy, a plynou fází, která je odváděna do cyklonu. V tomto zařízení dochází ke zpomalení proudu plynu, díky čemuž gravitační síly stačí na odloučení tuhých znečišťujících látek. [6]

1.2 Zplyňování

Technologie zplyňování spočívá v termochemické konverzi uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný generátorový plyn za působení vysoké teploty a katalytických zplyňovacích medií, například vodík, nebo volný či vázaný kyslík. Výsledným produktem zplyňovacího procesu je plyn obsahující výhřevné složky (vodík, oxid uhelnatý, methan a další), doprovodné složky (oxid uhličitý, voda, dusík) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkalie atd.). [7]

Jednou z výhod technologie využívající zplynění biomasy je možnost dosáhnout vyšší elektrické účinnosti oproti technologiím využívajících přímého spálení biomasy. To má za následek hned několik pozitiv, například úsporu primárních paliv, nižší měrné provozní náklady, či celkového zmenšení funkčního technologického zařízení. Na druhou stranu je proces zplyňování zatížen nutností čištění generátorového plynu, hlavně od dehtu a sloučenin síry. Další významnou nevýhodou jsou vyšší investiční náklady na jednotku výkonu. [7]

Samotnou technologii zplyňování lze shrnout do pěti základních kroků, kterými jsou příjem a skladování (1), předúprava (2), zplyňování (3), čištění plynu (4) a využití generátorového plynu (5). Proces je znázorněn na obr. 2. [8]



Obr. 2. Technologie zplyňování [8]

U zplyňování odpadní biomasy je jedním z nejdůležitějších faktorů teplota, která ovlivňuje mnoho důležitých parametrů jako složení a koncentraci jednotlivých složek plynu, reakční rychlost či tvorbu popílku. Nízké teploty při zplyňování mají za následek vysoký obsah dehtu a nízký obsah oxidu uhličitého a vodíku ve výrobním plynu. Naopak vyšší teploty jsou žádoucí pro minimalizaci znečišťujících složek, nesmí však být překročena teplota měknutí popela, neboť by mohlo docházet k aglomeraci částic, tedy zvětšování jejich objemu

a hmotnosti, což by vedlo k provozním problémům. Teploty se různí podle typu zplyňovacího generátoru. U generátorů s fluidním ložem se pohybujeme v rozmezí teplot 750-950 °C, zato například u hořákových generátorů od 1300 - 1600 °C. [7] [9]

V závislosti na následném použití plynného produktu je proces často prováděn pod vysokým tlakem, který může dosahovat až 7 MPa. [7]

Požadavky na vstupní surovinu se liší podle typu zplyňovacího generátoru. Přehled požadavků ohledně velikosti částic a vlhkosti je uveden v tabulce 1. [9]

Tab. 1. Požadavky na kvalitu paliva pro jednotlivé typy generátorů [7]

Parametr	Typ generátoru			
	sesuvný protiproudý	sesuvný souproudý	fluidní	hořákový
Velikost částic [mm]	5-100	20-100	1-100	<0.1
Vlhkost [hm %]	<50	15-20	<40	<15

Vstupní surovinou pro zplyňování lze použít biomasu všech typů, tedy od zemědělské a rostlinné biomasy (dřevo, sláma, řasy atd.) až k biomase komunálních odpadů či kontaminované průmyslové biomasy. Díky plazmatickým reaktorům lze zplyňovat i pneumatiky, staré ekologické zátěže, chemické látky a zbraně, dokonce i radioaktivní odpady. [10, 11]

Výstupním produktem je výhřevný plyn, jehož výhřevnost se pohybuje v rozmezí 4 až 6 MJ/m³. Plyn je možno používat bez větších úprav jako palivo pro klasické kotlové hořáky, či po dodatečném vyčištění ve spalovacích komorách spalovacích turbín a upravených spalovacích motorů. [4]

1.3 Typické suroviny

Jak už bylo uvedeno v předchozích kapitolách, mezi typické vstupní suroviny pro proces pyrolýzy a zplyňování lze zařadit biomasu, čistírenský kal, ale i například komunální odpad, plast či pneumatiky. Vzhledem k zaměření této bakalářské práce bude blíže specifikována biomasa, pneumatiky a plast.

1.3.1 Biomasa

Jedná se o nejrozšířenější obnovitelný zdroj energie na Zemi. Je tvořena téměř kterýmkoliv organismem živočišného či rostlinného původu, pro energetické účely je preferován rostlinný zdroj. [2]

V České republice je hojně rozšířená těžba dřeva a dřevozpracující průmysl, který produkuje velké množství odpadního dřeva. Ve většině případů je toto odpadní dřevo neefektivně spalováno, přitom se jedná o jeden z významných vstupních materiálů pro účely energetického využití. Pozitivním krokem posledních let je uvědomění si energetického potenciálu odpadního dřeva, jehož následkem je upouštění od jeho prostého spalování a využívání jako vstupní suroviny při pyrolýze a zplyňování. [2]

Další dostupné rostlinné materiály jsou zemědělské odpady, které vznikají při chovu dobytka a pěstování plodin. Nejvýznamnějším zástupcem této kategorie je sláma. Pro petrochemické jsou velmi vhodné rostlinné oleje, jelikož se svým složením podobají surovinám ropným. Například řepka olejná, která má vysokou výhřevnost – až 16 MJ/kg a zároveň nízký obsah vody cca 10 %. [12]

Tab. 2. Druhy rostlinné biomasy a jejich průměrná vlhkost a výhřevnost [12]

Biomasa	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ kg⁻¹]
Listnaté dřevo	15	14,6
Jehličnaté dřevo	15	15,6
Dřevní štěpka	30	12,2
Sláma obilovin	10	15,5
Sláma řepky	10	16,0

Vlhkost a výhřevnost se liší v závislosti na druhu biomasy. Například sláma obsahuje 10 % vody a výhřevnost má až 16 MJ kg⁻¹, zatímco dřevo z listnatých nebo jehličnatých stromů obsahuje o 5 % více vody než sláma, proto je jeho výhřevnost nižší. Dle tab. 2 je nejvíce vlhká dřevní štěpka, která je zároveň nejméně výhřevná. Z toho vyplývá, že čím více

vody surovina obsahuje, tím je méně výhřevná. Pro zvýšení výhřevnosti je třeba zbavit surovinu vody. Například dřevní štěpka po těžbě obsahuje více než 55 % vody, ovšem po přirozeném dosoušení během letních měsíců vlhkost štěpky klesá na 30 %. [22]

Biomasa obsahuje hlavně uhlík, vodík, kyslík, dusík a anorganické složky, jejichž koncentrace se pohybuje přibližně 1-15 %_{hm.}, kdy se nejmenší podíl nachází v jehličnanech a největší v bylinách a zemědělských zbytcích. [12]

1.3.2 Pneumatiky

S pneumatikami se nejčastěji setkáváme v automobilovém průmyslu. Každá pneumatika se skládá ze tří hlavních komponentů, a to pryž (80-85 %), různá textilní vlákna (12-15 %) a ocelový kord (2-3 %). Pryž se skládá ze syntetických (27 %) a přírodních kaučuků (14 %), dále obsahuje síru, saze, oxid zinku, uhlovodíkové oleje a další chemické sloučeniny jako jsou například stabilizátory či antioxidanty. Obsahuje také 30 % sazí jako zpevňovací plnidlo. [2, 13]

Jelikož je roční světová produkce pneumatik zhruba 17 miliónů tun a zároveň se jedná o produkt s víceméně stálými chemickými a fyzikálními vlastnostmi, jeví se pneumatika jako jedna z nejperspektivnějších vstupních surovin. Avšak lepším zpracováním použitých pneumatik je jejich recyklace. Díky separaci jednotlivých složek lze jednotlivé suroviny opět využít, například pro výrobu nových pneumatik, ale i v jiných průmyslových odvětvích, jako je stavebnictví (příměs asfaltu, povrch dětských hřišť), zemědělství (univerzální mulčovací materiál) a v průmyslu (filtrační médium při biofiltraci prchavých organických látek z ovzduší). Dostupnost pneumatik usnadňuje možnost bezplatného odevzdání pneumatik v pneuservisích a autoservisích, které zajistí vhodnou likvidaci. [2, 14]

Pneumatiky disponují skvělou výhřevností (25-32 MJ/kg), což je důvod pro jejich časté využití v teplárnách a cementárnách coby alternativa fosilního paliva. Největší výhodou ve spalování pneumatik vidí mnohé provozovny v tom, že jednotlivé pneumatiky není třeba před spálením drtit. Tento způsob využití pneumatik však není šetrný pro životní prostředí kvůli emisím oxidu uhelnatého a polycyklických uhlovodíků. [14]

Vlhkost pneumatik je poměrně nízká. Pneumatika obsahuje vodu v méně než 0,75 %_{hm.}. Z této hodnoty vyplývá, že není potřeba surovinu před zpracováním sušit. [21]

Samotnému drcení, tedy než pneumatiky najedou na pásový dopravník a putují do komory drtiče, předchází mnohdy ještě několik operací. [38]

Pro snazší drcení a menší opotřebení jednotlivých nožů dezintegrační jednotky bývají často pneumatiky zbavovány patních lanek, které se nachází na vnitřním průměru pneumatiky a slouží k jejímu správnému dosednutí k ráfku. To se uskutečňuje pomocí tzv. trhaček,

viz obr. 3. Jedná se o stroj, jehož základní konstrukcí je trhací hák, který pohání hydraulický mechanismus. Poté, co je pneumatika vidlemi vyvednuta na čelo stroje, vyjede trhací hák, zasekne se o vnitřní hranu pneumatiky a při zpětném pohybu vytáhne patní lanka ven. Při úplném vytažení obsluha stroje lanka odstraní, pneumatika z čela stroje odpadne a tím se proces ukončí. [13, 40]



Obr. 3. trhačka ocelových lanek z pneumatik [40]

1.3.3 Plast

V roce 2016 bylo v České republice vyprodukováno 3,6 mil. tun komunálního odpadu, přičemž samotné plasty zde zastupují téměř čtyři procenta, které na jednoho obyvatele činí 12 kg. Zastoupení jednotlivých druhů plastů je znázorněno v tab. 3. Nejzastoupenější polymer je polyethylen, který je hojně využíván jako obalový materiál. Samotná produkce plastových odpadů v ČR každoročně roste, což se odráží v poptávce po jejich efektivním způsobu zpracování. [15]

Tab. 3. Zastoupení jednotlivých druhů plastů v komunálním odpadu [16, 39]

Polymer + typ. zástupce	Zastoupení [%]
PE (fólie, sáčky)	59
PS (polystyren)	12
PVC (lína, rukavice)	9
PP (lana, provazy)	6
PET (láhve, obaly)	6
Ostatní	8

Jedním z možných řešení se nabízí i procesy pyrolýzy či zplyňování, které se jeví jako vhodné a perspektivní varianty. Při teplotně programovatelné pyrolýze je možné zpracovávat i různé druhy plastů vzhledem k jejich rozdílnému mechanismu štěpení, rychlosti štěpení a obzvláště jejich teplotním závislostem. Krom zpracování samotného plastového odpadu bylo velkým stimulem pro využití této možnosti i cílené získávání již definovaných chemických látek, avšak vzhledem ke složitosti procesu a množství nežádoucích vedlejších produktů nebylo možné toto realizovat v jednoduché formě. [1]

Před mechanickou dezintegrací by bylo vhodné některý plastový odpad, například typu PET, i vysušit. Poté by se měla vlhkost materiálu pohybovat řádově pouze v několika desetínách procenta. U většiny plastového odpadu jako PE, PS či PP to není potřeba. [17, 39]

1.4 Vliv velikosti částic na pyrolýzu

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující výtěžek pyrolýzního oleje a plynu je mimo vlhkosti a složení vstupní suroviny bezpochyby velikost jejich částic. [8]

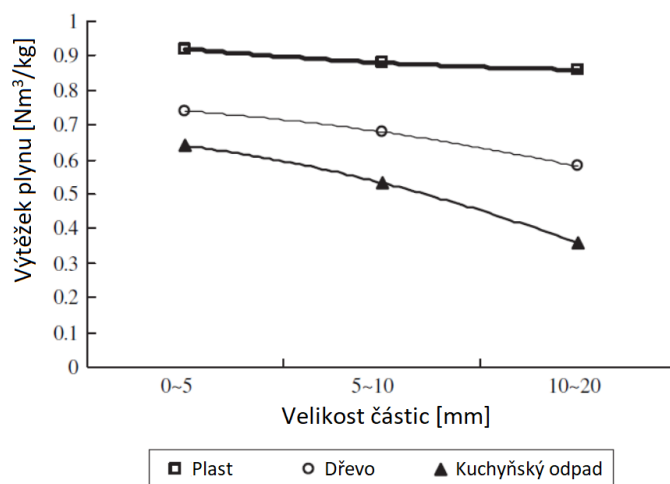
Studie z roku 2009 z Huazhongské univerzity vědy a techniky zkoumala vliv velikosti částic na pyrolýzu na třech surovinách – dřevě, plastu a kuchyňském odpadu. Složení jednotlivých testovaných odpadů je k vidění v tab. 4. [18]

Tab. 4. Složení testovaných druhů odpadů [18]

vzorek	Podíl složek [% _{hm.}]			Prvková analýza [% _{hm.}]				
	Prchavé látky	Pevný uhlík	Popel	C	H	O	N	S
Plast	100	0,00	0,00	86,10	13,00	0,90	Nedostupný údaj	Nedostupný údaj
Dřevo	74,32	16,25	9,43	54,91	4,75	38,56	1,52	0,26
Kuch. odpad	63,50	8,75	27,75	4,39	2,33	5,27	0,57	0,07

Vzorky byly rozděleny do tří skupin podle velikosti částic (0-5 mm, 5-10 mm a 10-20 mm). Pyrolytické testy byly provedeny v laboratorním reaktoru s pevným ložem, kde byl materiál zahříván rychlostí 20 °C za minutu až po požadovanou teplotu 800 °C. [18]

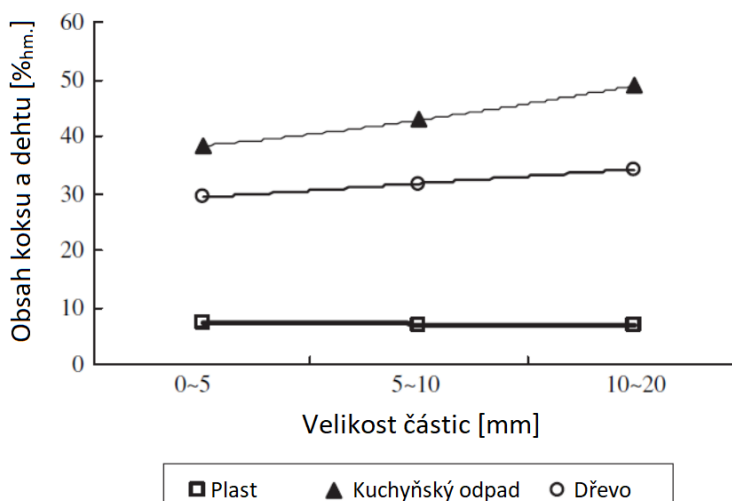
Výsledky ukázaly, že při menších velikostech dochází k většímu výtěžku pyrolýzního plynu a zároveň menšího vzniku dehtu a koku. Efekt většího výtěžku plynu při menší



Graf 1. Závislost výtěžku plynu na velikost částic [18]

velikosti částic může pramenit z aspektu, který poukazuje na větší povrch jednotlivých částic surovin, který způsobuje lepší přenos tepla a hmoty, tedy vyšší rychlost vytápění a produkci více plynů. Závislost vytěženého plynu na velikosti částic je znázorněn v grafu 3. [18]

Z grafu 1 vyplývá, že nejcitlivější na velikost částic je kuchyňský odpad, kdy rozdíl výtěžku plynu od částic nejmenších po největší je až 83 %. Menší nárůst byl pozorován u dřeva, kde se jednalo o hodnotu zhruba 28 %. Nejmenší změna nastala u plastového materiálu, kde se zvýšila výtěžnost plynu pouze o 7 %. Lze tedy konstatovat, že čím vyšší je u materiálu obsah pevného uhlíku a popílku, tím se zvyšuje účinek změny velikosti částic na výtěžnost plynu. [18]



Graf 2. Závislost na obsahu koksu a dehtu na velikosti částic [18]

Z grafu 2 vyplývá, že u plastů má velikost částic zanedbatelný vliv na obsah dehtu a koksu v produktu. Zatímco u dřeva a kuchyňského odpadu graf vykazuje výrazné snížení obsahu množství koksu a dehtu ve výsledném produktu při snižující se velikosti částic vstupní suroviny. Pro kuchyňský odpad je tato tendence ještě výraznější než u dřeva. Tento jev je způsoben vrstvou popela na povrchu jednotlivých částic, který během pyrolýzního procesu brání uvolňování těkavých látek z částic a prodlužuje dobu jejich pobytu, následkem je vyšší produkce koksu a dehtu. Čím vyšší obsah popela v surovině, tím je spalování pomalejší. [18]

Studie prokázala, že na velikosti částic záleží dle složení vstupního materiálu. Pokud surovina obsahuje vysoké množství popela, příliš nezáleží na velikosti částic, proto není nutné jemné drcení. Naopak u surovin jako je například biomasa, je výhodné upravit materiál na menší částice, právě kvůli zefektivnění procesu pyrolýzy. [18]

1.5 Předúpravy materiálu při termochemickém zpracování

Pro zpracování odpadů existuje hned několik metod, jakými lze vstupní surovinu vhodně připravit. Nicméně v technologiích termochemického zpracování se nejvíce uplatňují metody fyzikální, tj. mechanické dezintegrace, a fyzikálně-chemické metody, které jsou zde zastoupeny sušením. [8]

1.5.1 Sušení

Vlhkost suroviny má zásadní vliv na účinnost zpracování odpadní biomasy termochemickými metodami. Z hlediska energetické efektivity a účinnosti technologie pyrolýzy a zplyňování by vlhkost suroviny neměla přesáhnout cca 10-15 %_{hm}. [9, 19]

K dosažení optimální vlhkosti lze dosáhnout dvěma způsoby, a to pasivním nebo aktivním sušením. Sušení pasivní se řadí mezi nejlevnější metody, jelikož vyžaduje nejméně vybavení a vložené energie. Je založena na samovolném vysychání materiálu při samotném skladování. Přes nízké náklady se však jedná o metodu nejpomalejší. Metodou aktivního sušení se rozumí snižování vlhkosti materiálu pomocí přívodu tepla, kterým mohou být spaliny, ohřátý vzduch či odpadní zdroje. K tomuto způsobu sušení je tedy zapotřebí zpravidla vstup energie z vnějšího zdroje, což zvyšuje provozní náklady. Z tohoto důvodu se doporučuje nejvyšší možná míra využití technologického odpadního tepla. K aktivnímu sušení se používají sušárny konvektivní pásové, bubnové či fluidní. [8, 19]

1.5.2 Mechanická dezintegrace

Při zpracovávání jakýchkoliv odpadů by mělo docházet nejprve k mechanické dezintegraci. Během ní probíhá zmenšování částic, čímž se dosáhne jak zvětšení povrchu biomasy, tak ke snížení stupně krystalinity celulózy, tedy k narušení její krystalické formy. Tímto procesem se výrazně zefektivní přenos hybnosti, tepla a hmoty při termochemickém zpracování suroviny, čímž dojde ke zvýšení účinnosti přeměny odpadu na žádaný bioprodukt, zvýšení výtěžnosti produktu či k zrychlení procesu termochemického zpracování. Zmenšením velikosti částic vstupního materiálu je také docíleno zvýšení sypné hustoty suroviny a minimalizování tvorby odpadů. Mechanická dezintegrace je tedy vhodným krokem, jak zlepšit ekonomiku provozu celé technologie. Dochází ke zvýšení zisku z prodeje a zároveň se sníží investiční náklady na pořízení reaktorů, jímek a skladovacích nádrží nebo se sníží provozní náklady na likvidaci produkovaných odpadů. Na druhou stranu dochází k růstu nákladů spojených s pořízením dezintegračních zařízení a jejich následnou údržbou a servisem. [8, 20]

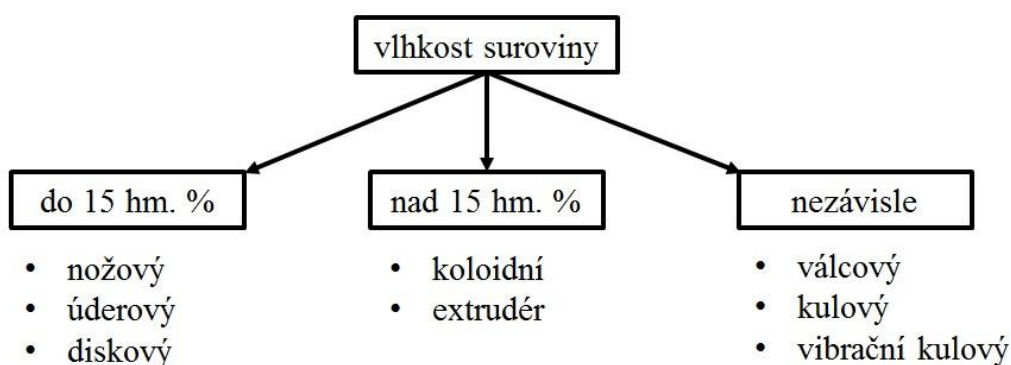
Do mechanické dezintegrace patří mletí, drcení, mixování, sekání, stříhání, otírání, působení úderů či tření. Drcením obvykle získáváme velikost materiálu 10-30 mm, mletím 0,2-2 mm. Více je problematika popsána v kapitole 2. [19]

2 Drcení a mletí

Jak už bylo psáno v kapitole 1.4, velikost částic je jedním z nejdůležitějších faktorů při termochemickém zpracování, který ovlivňuje energetickou náročnost, délku doby termického procesu a procentuální obsah jednotlivých složek výstupního produktu. Malé částice mají tedy plnou řadu výhod, nicméně na druhou stranu se snižující se velikostí částic narůstá potřebná energie k jejich dosažení, což je vzhledem k stále rostoucím cenám energií velmi nežádoucí. Z tohoto důvodu je velmi důležité najít energeticky efektivní dezintegrační jednotku. Pro zjištění optimální velikosti částic je nutné najít vzájemný vztah mezi velikostí částic, energetickou náročností pro její dosažení a výtěžností výstupního produktu. [8]

Drcení spolu s mletím patří mezi nejvyužívanější metody mechanické dezintegrace suroviny. Tyto dva děje se rozdělují na základě velikosti vstupní suroviny, kdy se rozlišuje rozpojování hrubé a jemné. Jako hrubé rozpojování se označuje drcení a příslušná zařízení drtiče, rozpojování jemné se nazývá mletí a dezintegrační jednotky k tomu určené jako mlýny. Charakteristická výstupní velikost částic pro drcení je zhruba 10-30 mm, pro mletí se tato hodnota pohybuje v rozmezí 0,2-2,0 mm. Přesná hranice mezi drcením a mletím je však pouze fiktivní, i některé typy mlýnů lze použít k drcení. [8, 23]

Při výběru vhodného drtiče či mlýnu také závisí na vlhkosti vstupní suroviny. Pro materiály s vlhkostí menší jak 15 %_{hm.} se využívají diskové, nožové či úderové drtiče a mlýny. Pro rozměňování vlhčích odpadů nad 15 %_{hm.} se používají koloidní drtiče, koloidní mlýny nebo konstrukčně modifikované extrudéry. Za univerzálnější dezintegrační jednotky lze považovat například mlýny kulové a válcové, viz obr. 4. [8]

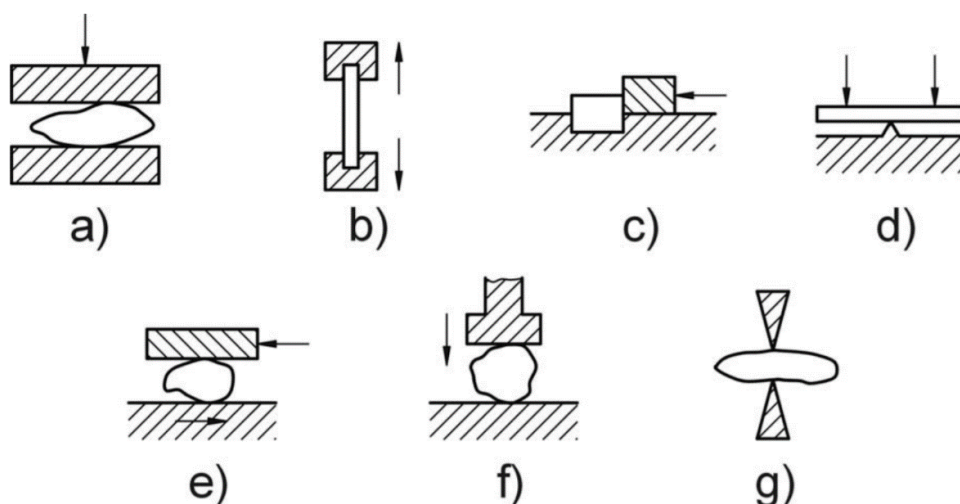


Obr. 4. Přehled nejčastěji používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkost suroviny [8]

Obecně jsou drtiče označovány stroji, které slouží k hrubému rozpojování materiálu, naopak mlýny k rozpojování jemnému. Někdy je ale vhodná kombinace obou dezintegračních jednotek zároveň. Primární velikost vstupního materiálu totiž může být značně velká, takže by její přímé zpracování v mlýnu vyžadovalo dlouhé doby zdržení. V takovém případě je vhodné umístit před mlecí stanici drtič, který suroviny před samotným mletím rozmělní na efektivnější velikost. [8]

2.1 Princip drcení

Základním principem drcení je rozpojování materiálu, kdy dochází ke zmenšení velikosti částic suroviny na rozměr, který je potřebný pro její další zpracování. Způsobů rozpojování pevných částic je hned několik, a to drcení, trhání, smýkání, lámání, otírání (stříhu), rozbíjení a rozlupování, viz obr. 5. Dominance jednotlivých principů při dezintegraci materiálů závisí na typu drtiče či mlýnu a samotné vstupní surovině. Například v drtičích a mlýnech pro rostlinnou biomasu se nejčastěji uplatňují mechanismy smýkání, drcení a otěru. U rozpojovaného materiálu záleží na tvrdosti (odolnost vůči průniku cizí částice), houževnatosti (odolnost vůči šíření trhlin), abrazivitě (vztah k tvrdosti), adhezivitě (schopnost slepování částic) a bodu tání (při rozpojování dochází k zahřívání materiálu). Obecně rozpojování vstupní suroviny může probíhat mezi tvarově různě uspořádanými pracovními členy nebo dynamickým účinkem vyvolaným samotným nárazem na pevnou plochu, resp. vzájemnými nárazy jednotlivých částic. [8, 23, 24]



Obr. 5. Způsoby rozpojování pevných částic [23]

a – drcení, b – trhání, c – smýkání, d – lámání, e – otírání, f – rozbíjení, g – rozlupování

Výhody ve zmenšení částic spočívá v prostém zvětšení jejich specifického povrchu, což může být výhodné pro celou řadu následných procesů. Například pro přenos hmoty a tepla, chemické reakce apod. Nevýhodou je již zmíněná vysoká energetická náročnost. [8]

2.2 Typy drtičů a mlýnů

Existuje celá řada typů drtičů a mlýnů, které lze rozdělit podle různých hledisek. Například je možné jednotlivé typy drtičů rozčlenit do několika skupin dle jejich provedení pracovních elementů a principu využívaného k rozmělnování částic, nebo je možné je rozlišovat dle stupně výsledného rozmělnění, viz tab. 5. [23, 24]

Tab. 5. Stupně výsledného rozmělnění [24]

Hrubé drcení (předdrcení)	Do průměru částic 100 mm
Střední a drobné drcení	1 – 100 mm
Mletí	0,1 – 1,0
Velmi jemné mletí	0,01 – 0,10 mm
Koloidní mletí	< 0,01 mm

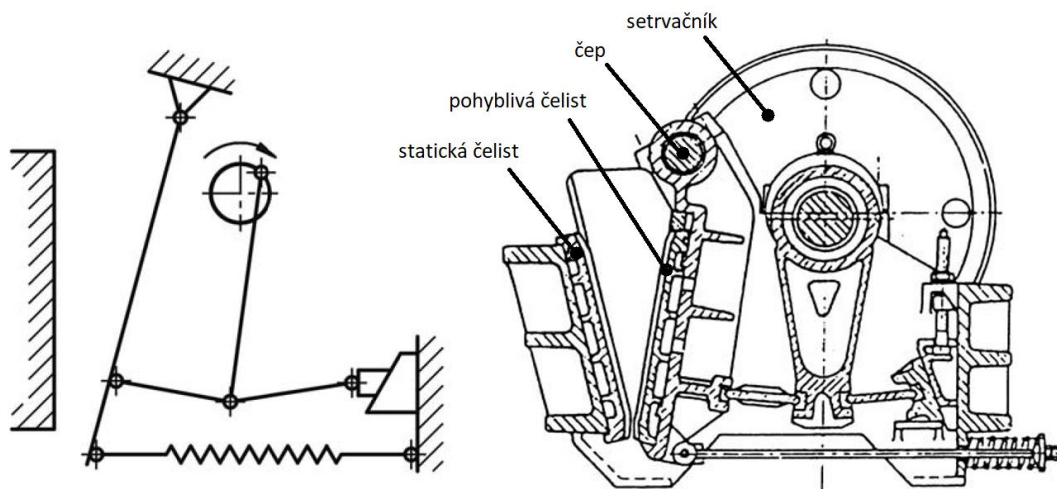
Vzhledem k velice široké škále možných surovin, které lze pro pyrolýzu a zplyňování použít, je zde zpracován přehled nejpoužívanějších drtičů a mlýnů pro odpadní biomasu, pneumatiky a plast.

2.2.1 Čelist'ové drtiče

Jedná se o typ drtičů, jejichž pracovní element je tvořen dvěma rovinnými či mírně vyklenutými deskami (čelistmi), z nichž alespoň jedna koná periodický kývavý pohyb. K drcení materiálu dochází při jeho průchodu neustále se zmenšujícím prostorem mezi čelistmi drtiče, kde je rozmělnován přenášeným tlakem, který mezi těmito dvěma čelistmi vzniká. [23, 24]

Charakteristické uspořádání konstrukčního řešení pohonu čelist'ových drtičů je založeno na pohyblivé drtící čelisti, která je otočně uložena na pevném čepu. Princip konstrukčního řešení a jeho kinematické schéma je znázorněno na obr. 6. Takovéto řešení umožňuje různé modifikace pohonů. Používané alternativy jsou například mechanismy klikové či hydraulické. U hydraulického pohonu lze vhodnou regulací nastavit vyšší rychlost čelistí při vracení než při pracovním zdvihu. To má za následek zvýšení výkonnosti drtiče až o 50 % oproti klikovému mechanismu. Hojně využíván je i pohon obou čelistí, kdy jedna

z nich oproti druhé kmitá dvojnásobnou frekvencí, čímž lze dosáhnout zvýšení výkonnosti o 60 až 70 %. [23]



Obr. 6. Čelistový drtič a jeho kinematické schéma [23]

Materiál je přiváděn do ústí drtiče, které bývá velké od pár desítek až po několik stovek milimetrů. Dále bývá rozmělněván čelistmi, které jsou vyrobeny z tvrdé legované oceli s obsahem manganu 12 až 18 %. Tvar a povrch čelistí je uzpůsoben pro typickou přijímanou surovinu. Rozmělnění probíhá pouze v jedné polovině otáček, v druhé se pouze překonávají pasivní odpory drtiče. Z tohoto důvodu je ve strojním mechanismu důležitý setrvačnick. Ten akumuluje energii při chodu naprázdno a zajišťuje rovnoměrný chod stroje. Velikost výstupních částic lze regulovat nastavením šířky výstupní šterbiny, což je nejužší místo mezi čelistmi. [23, 24, 25]



Obr. 7. Čelistový drtič [26]

Čelistový drtič je běžně používán pro primární a sekundární hrubé drcení suchého, nelepivého a pevného materiálu. Často bývá zařazován jako předstupeň drcení následujícího. Mezi největší výhody čelistových drtičů se řadí velký výkon, jednoduchá

obsluha a schopnost rozdrtit téměř jakýkoliv materiál. Nevýhodou jsou silné otřesy a hlučnost chodu. [24]

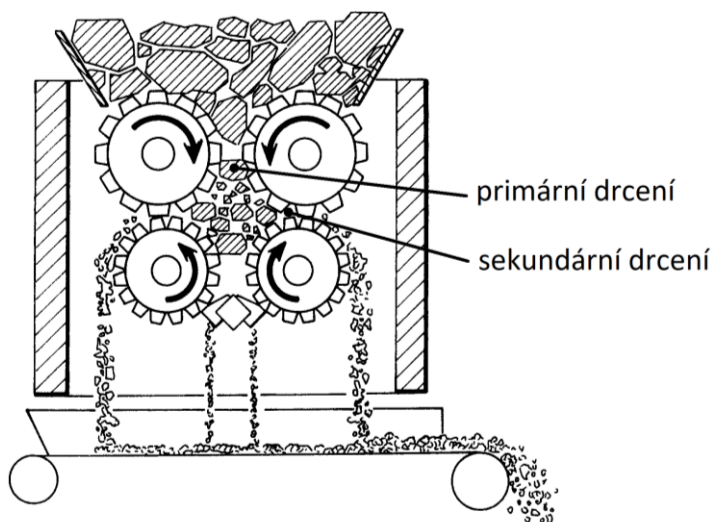
Spotřeba práce se odvíjí od vlastností rozpojovaného materiálu a pohybuje se v rozsahu od 0,3 do 20 kWh/t. Čelistové drtiče disponují výkonností $\dot{V} = 30 \div 520 \text{ m}^3/\text{h}$ a stupněm rozpojení 9 hodnoty $3 \div 7$. [23]

Přestože čelistové drtiče jsou schopny rozdrtit téměř vše, tak pro pneumatiky a rostlinnou biomasu není tento drtič zcela vhodný. Jedná se však o skvělou možnost předúpravy větších rozměrů plastových materiálů.

2.2.2 Válcové drtiče a mlýny

Válcových drtičů existuje poměrně velké množství, ale nejčastěji se používají varianty jednoválcové nebo dvouválcové. Drtiče jednoválcové používají k rozmělnění odpadu pevnou protidesku, zato drtiče dvouválcové využívají rozdílných a protiběžných otáček, díky kterým vzniká stříhová síla. Válcové drtiče pracují na stejném principu. Liší se pouze hladším povrchem a mezerou mezi válci. Příklad válcového drtiče je na obr. 8. [23, 24]

K drcení odpadního materiálu dochází průchodem mezi válci, kde je namáhán tlakem a stříhem. Povrch jednotlivých válců může být hladký, rýhovaný, či upravený například ozubením. Velikost výstupních částic suroviny lze nastavit velikostí štěrbin mezi válci a úhlovou rychlostí válců. [23]



Obr. 8. Schéma válcového drtiče [27]

Mnohdy se používá kombinace několik válců nad sebou, kdy první pár válců drtí materiál na hrubo a poté následují válce s menší štěrbinou, které rozmělní surovinu na částice jemné. Tímto postupem se může jednat i o mletí. Schéma takového drtiče je vyobrazeno na obr. 9. [28]



Obr. 9. Dvouválcový drtič [27]

Konstrukce válcových drtičů či mlýnů bývá jednoduchá a samotný provoz spolehlivý. Proti případnému zaseknutí příliš tvrdé částice a následnému poškození je možné je poměrně snadno chránit tím, že se válce vestaví odpruženě a posunovatelně uložení. Díky tomuto způsobu ochrany se válec při vniknutí nedrtitelného předmětu vychýlí, čímž se rozšíří mezera mezi válci a cizí předmět může propadnout. [28]

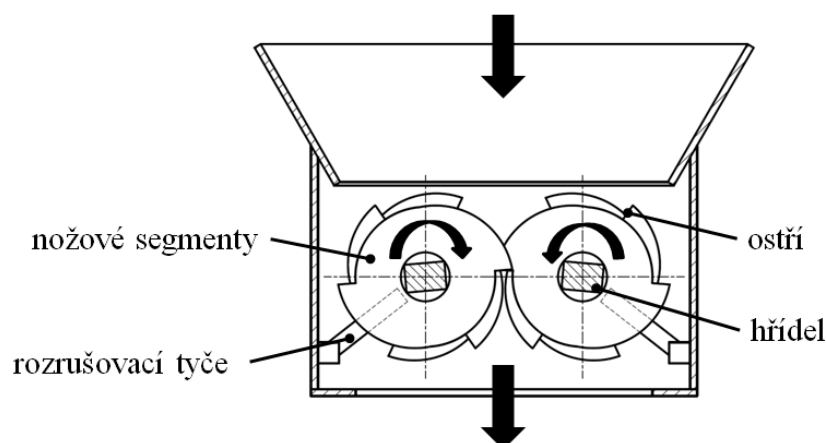
Válcové drtiče a mlýny jsou vhodné pro širokou škálu materiálu s nižší pevností, obzvláště pro pryže a pneumatiky. Nejsou vhodné pro suroviny, které by se mohly na válce namotávat a drtič ucpat a poškodit. Typickým nevhodným materiálem jsou například plastové fólie. [24]

Disponují poměrně malým stupněm rozpojení $\vartheta = 3 \div 5$. I z tohoto důvodu ve snaze stupeň rozpojení zvýšit, se v technologické lince řadí několik párů za sebou. Výkony strojů se pohybují v desítkách až stovkách tun za hodinu v závislosti na tvrdosti drcené suroviny. [23, 24]

2.2.3 Nožové drtiče

Koncepce nožových drtičů je na první pohled zaměnitelná s drtiči válcovými. Při bližším pohledu na stavbu rotorů je však jasné, že u nožových drtičů je používán jiný způsob rozpojování vstupního materiálu, kdy je uplatňován v dominantní míře princip stříhu. [29]

Jako u válcových drtičů a mlýnu je i zde materiál běžně dopravován pomocí pásového dopravníku do násypky, která navádí surovinu mezi dezintegrační jednotku. Drcení materiálu je docíleno díky upraveným rotorům, což jsou zde hřídele vybavené mezikroužky a nožovými segmenty se specifickým ostřím. Ty jsou mnohdy nahrazovány pouze nosiči nožů, na které se montují jednotlivé nože. Tato varianta konstrukčního řešení je velice výhodná při údržbě již obroušených nožů, protože výměna je poměrně jednoduchá a nevyžaduje větší demontáž. Nože jsou většinou jednoduchého hranolového tvaru z nástrojové oceli s dvěma použitelnými ostřími a bývají uchyceny lícovanými pevnostními šrouby. Složené rotory v drtičím prostoru zabíhají do sebe, čímž umožňují stříhání materiálu. Schéma nožového drtiče je zobrazeno na obr. 10. [29]



Obr. 10. Lundelleho nožový drtič [8]

Mezi největší výhody nožových drtičů patří vysoký výkon a nízké provozní náklady, kdy rotor zůstává původní a vyměňují se pouze nože. [29]

Tyto drtiče jsou vhodné pro tvrdší a sušší suroviny s vlhkostí do 15 %_{hm.}. Rotační nožové drtiče jsou nejčastěji používané stroje pro zpracování odpadů biomasy a svůj velký potenciál plní i u odpadních pneumatik. Výkon stroje závisí na jeho velikosti a vstupní surovině. V případě pneumatik se výkon pohybuje okolo 5 až 15 t/hod. Příklad drtiče specializovaného na pneumatiky je k vidění na obr. 11. [8, 29]

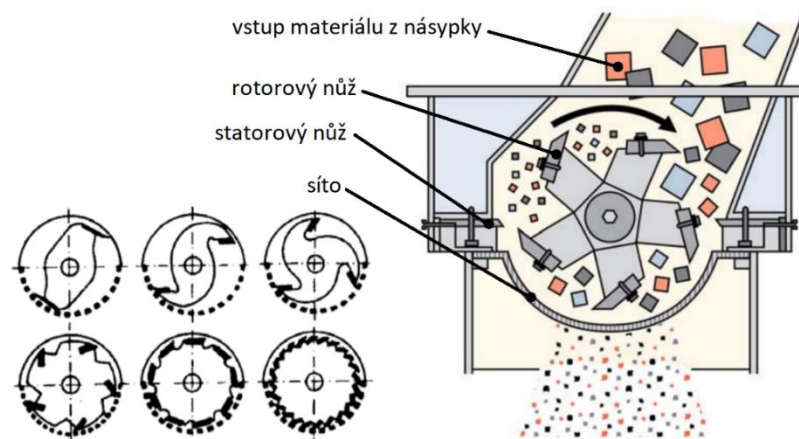


Obr. 11. Drtič na osobní pneumatiky SCE 700/950 30 kW od firmy Terier [29]

2.2.4 Nožové mlýny

Z osvědčených dezintegračních zařízení sloužící k jemnému rozmělnění materiálu se nožové mlýny, díky své efektivitě a rychlosti drcení, řadí mezi nejpoužívanější stroje své kategorie. [30]

Jak už napovídá název, nožové mlýny využívají k mletí odpadní suroviny nože, které mohou být různého tvaru a které jsou uloženy jednak přímo na rotoru a jednak kolem něj, tedy na statoru. Poté, co je materiál nasypán do násypky, ze které je naveden do kontaktu s rychle otáčejícím rotorem, dochází k jeho dezintegraci pomocí stříhu, vzniklým mezi noži na statoru a noži rotoru. Materiál je mlet do té doby, než pozbyde takové velikosti, aby mohl propadnout sítem, které se nachází v dolní části mlýnu. Jinak je vrácen do oběhu a celý cyklus se neustále opakuje až do dosažení požadovaného rozměru. Výsledná velikost částic je daná rozměry jednotlivých ok a dá se tedy regulovat typem síta. Při mletí se vlivem tření dosahuje mnohdy vysokých teplot, což může být problém u tavitelných materiálů jako je například plast. U takových odpadů je pak zapotřebí vhodná regulace otáček rotoru, nebo aplikace chladicí jednotky. Pro docílení rychlejšího a bezproblémového propadávání částic bývá síto často napojeno na vibrační mechanismus, který svojí činností výrazně napomáhá k hladkému chodu stroje. Schéma nožového mlýnu a typy nožových hlav jsou na obr. 12. [30]



Obr. 12. Typy nožových hlav (vlevo) a schéma nožového mlýnu (vpravo) [31]

Nožové mlýny se řadí mezi zařízení, u kterých je výhodné rozmělnovat materiály sušší s vlhkostí do 15 %_{hm.}, to však není podmínkou. Používají se často k rozemletí vláknitých materiálů, jako jsou například traviny a pícniny. Jsou vhodné pro plasty i pneumatiky. Příklad nožového mlýna zaměřeného na plasty je k vidění na obr. 13, který je schopen zpracovat až 3000 kg odpadu za hodinu. Jedním z velkých benefitů je i možnost mletí plastových fólií, které mají tendenci se u mnoha strojů naplétat na rotor. Nevýhodou těchto zařízení je možné zanesení síta a jejich složitější a zdlouhavější údržba a v neposlední řadě nutnost výměny opotřebovaných nožů. [8, 32]

Energetická náročnost rozpojování a výkon zařízení závisí na faktorech jako je rychlost plnění mlýna, velikost jednotlivých ok síta, frekvenci otáček rotoru či typu nožové hlavy. [8]

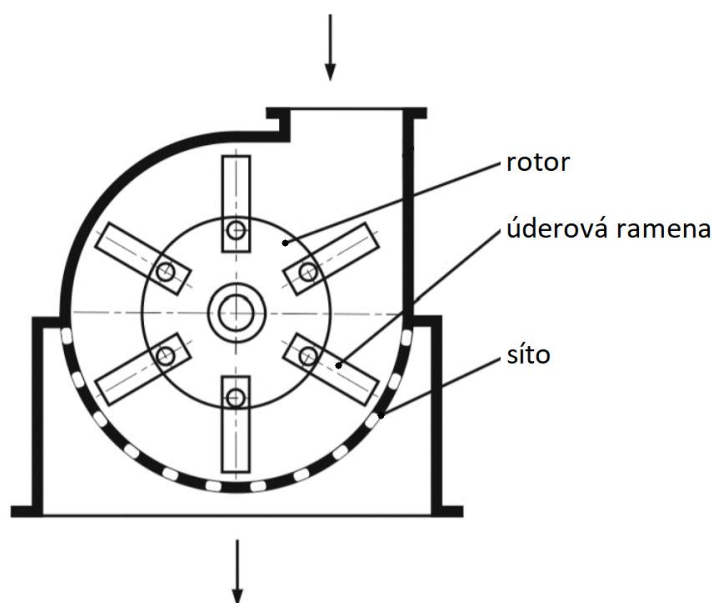


Obr. 13. Nožový mlýn určený k mletí plastů [33]

2.2.5 Úderové drtiče a mlýny

Nejrozšířenějším typem dezintegračních zařízení v dřevařském průmyslu jsou úderové drtiče a mlýny, které jsou nazývány též termínem nárazové či kladivové drtiče a mlýny. [32]

Princip úderových drtičů a mlýnů je obdobný jako u nožových mlýnů, ale liší se v provedení rotoru a samotném principu dezintegrace vstupní suroviny. Rotor má po svém obvodu umístěné místo nožů několik volně uchycených ramen (kladiv), které pro rozpojování částic používají především princip rázového namáhání. To je vyvoláno několika typy nárazů, vzájemným kontaktem ramen a drceného materiálu, nárazy materiálu do pláště drtiče a vzájemnými údery částic samotných. Volnější uložení úderových ramen je chrání vůči poškození, které by mohly utrpět při nárazu na tvrdší části materiálu. V dolní části ústrojí se opět nachází síto, kterým propadáva již rozmělněný materiál. Výstupní velikost částic udává rozměr jednotlivých ok síta a otáčky rotoru, které se běžně pohybují rychlostí až 1000 ot/min. Nutností je i přítomnost setrvačnicku, který zachovává plynulý chod stroje. Schéma nožového mlýnu je znázorněno na obr. 14. [23, 31]



Obr. 14. Schéma úderového mlýnu [32]

Nožové drtiče a mlýny jsou díky vysoké odolnosti komponentů schopny rozmělnovat i tvrdý houževnatý materiál, většinou jsou však používány pro jemné drcení nepříliš tvrdých surovin. Nejvíce jsou používány pro drcení biomasy. [23, 32]

Výkon strojů se značně liší dle jeho velikosti a jeho produktivnost se pohybuje v rozmezí 7 až 50 m³·h⁻¹. Stupeň rozmělnění úderových drtičů se pohybuje v rozmezí $\vartheta = 20 \div 80$, kdy záleží na typu drtiče. [23, 31]

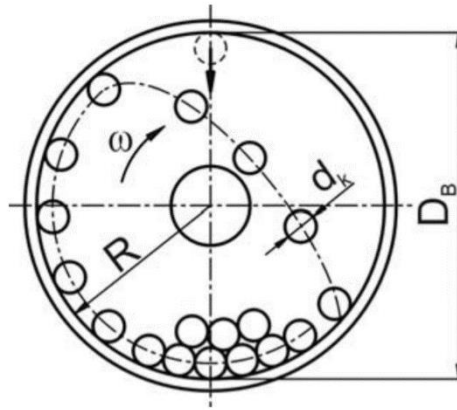


Obr. 15. Úderový drtič [34]

2.2.6 Kulové mlýny

Mlýny kulové se řadí mezi zařízení, které k dezintegraci vstupního materiálu využívají volně uložená mlecí tělesa. [23]

Existuje celá řada konstrukčních variant, které jsou uzpůsobené přímo na míru vstupní suroviny. Základní konstrukci však zpravidla tvoří pomalu otáčející se válec s vnějším planetovým ozubením, který válec uvádí do pohybu. Ve válcovém bubnu se pak nachází mlecí tělesa, což jsou většinou koule z nerezové oceli či keramiky. Pokud jsou koule nahrazeny tyčemi, jedná se pak o mlýn tyčový, jehož princip je podobný. K mletí materiálu dochází pomocí odstředivých a gravitačních sil koulí, které vznikají při otáčení válcem. Materiál je rozpojován pádem mlecích těles, ale i vzájemným třením koulí mezi sebou. Aby mlýn správně fungoval a maximálně využíval získanou energii, je důležité stanovit otáčky bubnu tak, aby koule vlivem odstředivé síly setrvaly na vnitřním povrchu bubnu. Tím je dráha pádu mlecích těles nejdelsí a dopadová energie největší. Schéma kulového mlýnu je znázorněno na obr. 16. Kulový mlýn může obsahovat i více komor než jednu. Ty jsou odděleny sítím a v každé se nachází koule menšího průměru oproti komoře předchozí. Tím je docíleno postupné dezintegraci materiálů, čímž je opět zefektivněna činnost kulových mlecích zařízení. Samotné rozmělnování může probíhat buď v suchém či mokřém režimu, což kulové mlýny dělá nezávislými na vlhkosti odpadní suroviny. [23, 24]



Obr. 16. Schéma kulového mlýnu [23]

Kulový mlýn je primárně určen pro jemné mletí surovin se vstupní velikostí zrna až 25 mm. Velikost výstupních částic se může pohybovat až do setin milimetru. Jeho hlavní výhodou je schopnost mletí i vlhčích materiálů nad 15 %_{hm.}, což z něj dělá zařízením hojně využívaným na odpady rostlinné biomasy. Mezi další hlavní výhody se řadí vysoký kapacitní výkon, který za suchého režimu může činit až 260 t/h a jednoduchá obsluha a provoz. [8, 24]

Vzhledem k mnohdy obrovskému rozměru bubnu, který může být velký až 4000x8500 mm, může výkon elektromotoru tohoto zařízení činit až 1800 kW. Účinnost rozmělnění biomasy kulovými mlýny je značně různorodá a je závislá především na typu vstupní biomasy. Nejmenší účinnost je však uváděna u rozmělnění tvrdých odpadů jako je například dřevní štěpka. [8, 24]



Obr. 17. Kulový mlýn [35]

2.3 Zhodnocení

V předchozí kapitole jsou uvedeny nepoužívanější drtiče a mlýny na rozmělnění plastů, pneumatik a rostlinné biomasy. Každá drtící jednotka má své typické konstrukční uspořádání a vlastní princip dezintegrace. Je tedy zapotřebí si uvědomit jednotlivé výhody a nevýhody stroje a pro daný materiál použít drtič co nejvhodnější.

V tab. 6 jsou shrnuty důležité parametry, tedy stupeň rozpojení a energetická náročnost. Po zvážení jednotlivých benefitů každého stroje je zde ke každému z nich uveden i vstupní materiál, který je vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem pro danou dezintegrační jednotku nejvhodnější.

Tab. 6. Shrnutí parametrů drtičů a mlýnů [8, 23, 25, 38, 39]

Typ jednotky	Stupeň rozpojení	Energetická náročnost	Vhodný materiál
Čelist'ové drtiče	3 ÷ 7	3	Větší kusy tvrdého plastu
Válcové drtiče a mlýny	3 ÷ 5	3	Pneumatiky
Nožové drtiče	4 ÷ 25	1	Pneumatiky, plasty, biomasa
Nožové mlýny	5 ÷ 40	1	Pneumatiky, plasty, biomasa
Úderové drtiče a mlýny	20 ÷ 80	2	Tvrdé plasty, biomasa
Kulové mlýny	5 ÷ 8	4	Biomasa

Stupeň rozpojení vyjadřuje míru schopnosti dezintegračního stroje rozpojit materiál. Jeho výpočet je dán vzájemným poměrem vstupní a výstupní velikosti drceného materiálu, tedy vztahem $s = D/d$ (D – vstupní velikost suroviny, d – výstupní velikost suroviny). Lze tedy konstatovat, že udává hodnotu, kolikrát se vstupní hodnota rozmělnováním zmenší. [25]

Energetická náročnost je známkovaná číslicemi od 1 až do 5, přičemž číselné hodnocení je následující: 1 - nejnižší, 2 - nízká, 3 - průměrná, 4 - vyšší, 5 - nejvyšší.

Z uvedené tabulky vyplývá, že nejlepším dezintegračním zařízením se ukazují nožové drtiče a mlýny, které dokážou zpracovat širokou škálu materiálů, mají dobrý stupeň rozpojení a jejich samotný provoz z pohledu energetického hlediska není oproti svým konkurentům příliš náročný.

2.4 Energetická náročnost

Ač je mechanická dezintegrace pro efektivitu termochemického zpracování, na základě poznatků uvedených v předchozích kapitolách, nezpochybnitelně potřebná, jedná se o velmi energeticky náročný proces. Pro finanční výnosnost celého výrobního postupu je tedy zcela nezbytné najít taková drtící a mlecí zařízení, aby byl proces co možná energeticky nejefektivnější a zároveň nejlevnější. [8]

Samotná energetická náročnost je ovlivněna mnoha faktory. Naprosto jednoznačný vliv nese použitý typ dezintegrační jednotky a její konfigurace. Dále závisí na poměru počáteční a výstupní velikosti částic a v neposlední řadě na charakteristice vstupní suroviny, tedy jejím složením, vlhkostí, zpracovávaném množství apod. [8]

V tab. 7 je znázorněna energetická náročnost drcení či mletí pneumatik, plastů a typických odpadů biomasy, tj. pšeničné slámy a tvrdého dřeva. Z tabulky vyplývá, že velice rozhodujícím faktorem ohledně energetické náročnosti je výstupní velikost částic, s jejímž snižováním dochází k prudkému stoupaní potřebné energie k rozmělnění vstupního materiálu.

Tab. 7. Energetická náročnost drcení/mletí pšeničné slámy, tvrdého dřeva, pneumatik a plastů

Odpad	Počáteční/konečná velikost (mm)	Vlhkost	Typ drtiče/mlýnu	Energetická náročnost (kWh/t)	zdroj
Pšeničná sláma	22,40/1,60	4-7	Nožový mlýn	7,50	[36]
	22,40/2,50			6,40	
	22,40/1,60		Úderový mlýn	42,0	
	22,40/2,50			29,0	
Tvrdé dřevo	22,40/1,60	4-7	Nožový mlýn	130,0	[36]
	22,40/6,30			25,0	
	22,40/1,60		Úderový mlýn	130,0	
	22,40/6,30			95,0	
Pneumatiky	Celé osobní pneumatiky/1-3	0,75	Válcový + diskový mlýn	400-600	[37]
	Celé osobní pneumatiky/50-300	0,75	Nožový drtič	16	[38]
	50-300/12-50	0,75	Nožový drtič	36	[38]
Plast – PET	80/5	0,1	Nožový mlýn	24	[39]

Energetickou náročnost rozpojení lze vyjádřit vzorcem. „Určení energie potřebné pro rozpojování vychází z předpokladu, že změna měrné energie potřebná pro rozpojení je nepřímo úměrná D^r , takže lze psát“ [23, str. 113]

$$-\frac{de}{dD} = CD^{-r} \quad (1)$$

Hodnota exponentu r se liší dle autora

- a) Rittinger uvádí $r = 2$, doporučováno pro průměr částice $D < 0,5$ mm,
- b) Bond uvádí $r = 1,5$, doporučováno pro rozmezí $0,5 < D < 50$ mm,
- c) Kick $r = 1$, doporučováno přibližně pro $D > 50$ mm

Po integraci se dle autor dostanou vztahy následující

$$a) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_R D^{-2} dD = C_R \left[\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right] \quad (2)$$

$$b) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_B D^{-1,5} dD = 2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right] \quad (3)$$

$$c) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_K D^{-1} dD = C_K \frac{D_1}{D_2} \quad (4)$$

Konstanty C jsou experimentálně zjištěné hodnoty počítaného materiálu. Jsou uváděny v jednotkách $kWh \cdot \mu m^{0,5} \cdot t^{-1}$ nebo $Ws \cdot m^{0,5} \cdot kg^{-1}$. Tyto hodnoty však ve většině případů existují pouze pro křehké materiály jako jsou například horniny a sklo. Pro houževnatější materiály typu plast a pneumatiky se tyto konstanty získávají experimentálně, nebo jsou odhadovány na základě provozních zkušeností. [23]

3 Návrh dezintegrační jednotky

Na základě rešerše o efektivních dezintegračních jednotkách pro rozmělnění odpadů biomasy, pneumatik a plastů v technologiích pyrolýzy a zplyňování bude závěr bakalářské práce obsahovat praktickou část. V té bude navržena pro vybraný typ odpadu vhodná dezintegrační jednotka, její základní konstrukční uspořádání a stanoven její potřebný výkon elektromotoru.

Zvoleným typem drceného odpadu jsou ojeté pneumatiky, jejichž zpracování a následné využití má vysoký potenciál, ať už v technologiích thermochemického zpracování či oblasti jiné. Jako nejvhodnější dezintegrační jednotka pro pneumatiky se po kapitole 3 jeví nožové drtiče a mlýny, které rozmělnují odpad s vysokou efektivitou a poměrně malou energetickou náročností. Z tohoto důvodu je zde jako vhodné drtící zařízení zvolen dvouválcový nožový drtič.

Drtící jednotka je navržena pro materiál maximální vstupní velikosti 50 mm, přičemž výstupní rozměr je 12 mm. Výkonnost zařízení bude 5 tun za hodinu.

Základní počáteční informace k návrhu drtící jednotky jsou zobrazeny v tab. 8.

Tab. 8. Shrnutí počátečních informací

Proces	Drcení
Drtící jednotka	Dvouválcový nožový drtič
Druh vstupního materiálu	Pneumatiky
Výkonnost zařízení \dot{m}	5 t/hod
Vstupní velikost částic D_1	50 mm
Výstupní velikost částic D_2	12 mm

Před samotným drcením je zapotřebí dalších operací. Nezbytným krokem je zbavení pneumatiky patních lanek pomocí trhačky, čímž se ulehčí následující proces drcení. Poté následuje už proces rozmělnění, který by bylo vhodné uskutečnit na vícero nožových drtičích. První by například zpracoval celé osobní pneumatiky až na velikost 50 mm a až poté přišel na řadu autorem navržený nožový drtič. Schéma takového postupu je znázorněn na obr. 18.



Obr. 18. Blokové schéma drcení pneumatik [40]

3.1 Výpočet energetické náročnosti

Jelikož je průměr částic D v rozmezí 0,5 až 50 mm, bude využita interpretace dle Bonda, kde hodnota exponentu $r = 1,5$.

Problém nastává u konstanty C_B , jejíž hodnota je určena u většiny křehkých materiálů, ale u materiálů houževnatých je tato hodnota známa jen zřídka. Z tohoto důvodu bude pouze odhadnuta, a to na základě hustoty kaučuku (cca 1150 kg/m^3 , [41]) tvořící pneumatiku s materiály podobnými, kde je již tato konstanta známá. Konečná hodnota konstanty C_B byla určena na $400 \text{ Ws} \cdot \text{m}^{0,5} \cdot \text{kg}^{-1}$. Jelikož se jedná pouze o hrubý odhad, vzniká nutnost experimentálního ověření, které však již není součástí této bakalářské práce a otevírá prostor pro navazující práci diplomovou.

Výpočet energie vychází ze vztahu

$$e = -2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right] \quad (5)$$

Dosazením do rovnice získáme

$$e = 2 \cdot 400 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{50 \cdot 10^{-2}}} - \frac{1}{\sqrt{12 \cdot 10^{-2}}} \right] \doteq 1178 \text{ J} \quad (6)$$

Výpočet příkonu vychází ze vztahu

$$P = e \cdot \dot{m} \quad (7)$$

Dosazením do rovnice získáme

$$P = 1031 \cdot \frac{5 \cdot 10^3}{3600} \doteq 1636 \text{ W} \quad (8)$$

3.2 Výpočet otáček

Otáčky lze vypočítat z následujícího vztahu

$$n = \frac{v}{\pi \cdot D} \quad (9)$$

Symbol v značí ve vzorci obvodovou rychlost, jejíž hodnota byla na základě podobných drtících zařízení zvolena na 0,5 m/s. Písmeno D značí poloměr rotorů, jehož hodnota byla určena na 600 mm.

Dosazením do vzorce získáme

$$n = \frac{0,5 \cdot 60}{\pi \cdot 0,6} \cong 16 \text{ ot/min} \quad (10)$$

3.3 Zhodnocení výsledků

Dle vztahů použitých ze skript Hydromechanické procesy II vyšla energie potřebná pro mletí $e = 1178$ J a následný příkon $P = 1636$ W. Tento příkon ovšem zahrnuje pouze samotnou energii potřebnou pro dezintegraci materiálu. Je zapotřebí si uvědomit, že ve skutečnosti je zapotřebí zahrnout všechny ztráty, které při procesu vznikají. Největší ztráty připadají na teplo, které se přeměňuje z energie mechanické. Z těchto důvodů je zapotřebí použít výsledný příkon mnohem větší. Po této úvaze byl zvolen příkon o velikosti 30 kW pro každý rotor, tedy 2x30 kW. Takový příkon nožového drtiče by měl zaručit bezproblémový chod stroje.

Pro rotor o průměru $D = 600$ mm a obvodové rychlosti $v = 0,5$ m/s byly pro navržený dvouválcový drtič spočítány otáčky $n = 16$ ot/min.

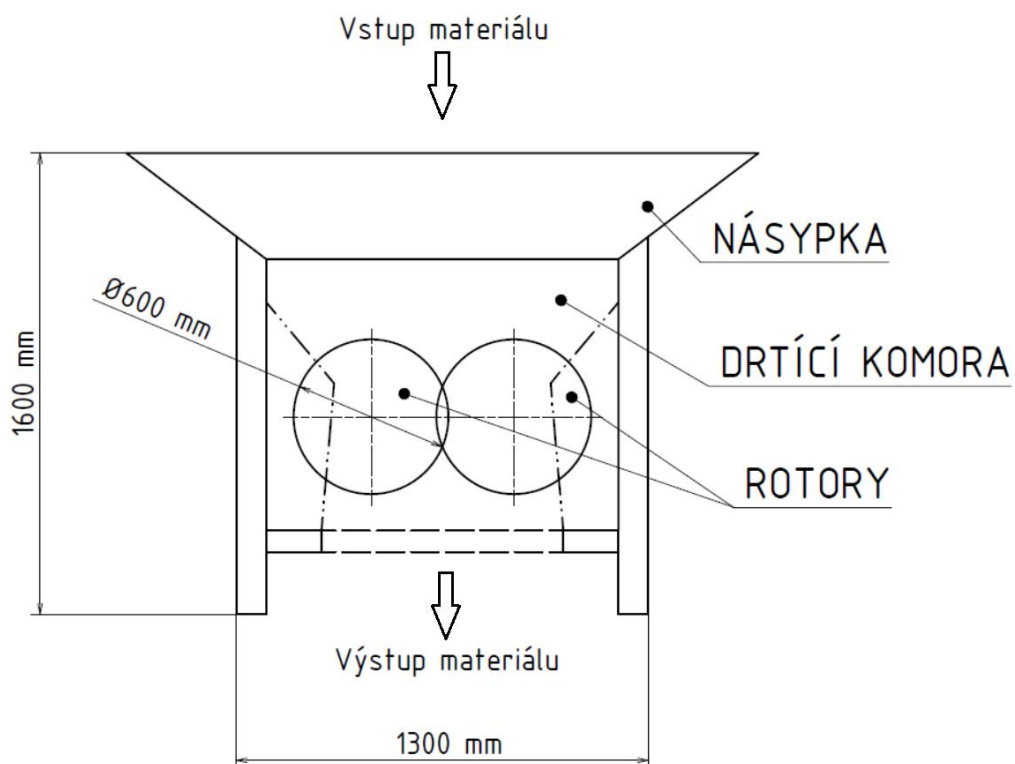
Celkové shrnutí parametrů je zobrazeno v tab. 9.

Tab. 9. Shrnutí výsledků

Proces	Drcení
Drťící jednotka	Dvouválcový nožový drtič
Druh vstupního materiálu	Pneumatiky
Výkonnost zařízení \dot{m}	5 t/hod
Vstupní velikost částic D_1	50 mm
Výstupní velikost částic D_2	12 mm
Hustota	Min. 1150 kg/m ³
Konstanta C_B	400 Ws · m ^{0,5} · kg ⁻¹
Vypočtená energie pro drcení	1178 J
Vypočtený příkon na drcení	1636 W
Průměr rotoru D	600 mm
Obvodová rychlost v	0,5 m/s
Vypočtené otáčky rotoru n	16 ot/min

3.4 Konstrukční návrh

Na základě zvolených parametrů bylo vytvořeno základní konstrukční uspořádání, které je zobrazeno na obr. 19. Jedná se dvouválcový nožový drtič s průměrem rotorů 600 mm, které jsou poháněny dvěma elektromotory o výkonu 30 kW. Tato drtící jednotka by měla být schopna pojmout 5 tun pneumatik za hodinu, přičemž její stupeň rozpojení je $4 \div 5$. Z výpočtů vyplývá, že energetická náročnost této dezintegrační jednotky je 12 kWh/t.



Obr. 19. Základní konstrukční uspořádání

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s termochemickým zpracováním, tedy pyrolýzou a zplyňováním, a následné hledání efektivní předúpravy vstupních surovin. Z důvodu širokého spektra možných materiálů, které lze pro tyto procesy použít, byla práce zaměřena na nejtypičtější vstupní suroviny, a to biomasu, pneumatiky a plast.

V práci byly sepsány poznatky o vlivu velikosti částic na pyrolýzu, které ukazují důležitost mechanické dezintegrace, díky které dochází k většímu zisku výstupních produktů a zároveň menšímu množství dehtu a koksu. Jako klíčový faktor v otázce, jaká velikost částic vstupní suroviny je pro termochemický proces nejefektivnější, se ukázalo množství popela v surovině. Z tohoto důvodu zpracování odpadů jako je například biomasa, která má ve svém složení popelu mnohem více oproti pneumatikám či plastům, je daleko citlivější na velikost vstupního materiálu.

Další kapitola byla zaměřena na drcení a mletí, ve které byl vysvětlen samotný princip a dále v ní byla zpracována rešerše na nejvyužívanější dezintegrační jednotky vhodné k rozmělnění biomasy, pneumatik a plastů. Nejefektivnějšími zařízeními byly vyhodnoceny nožové mlýny a drtiče, a to díky své efektivitě, široké materiální zaměřenosti, dobrému stupni rozpojení a nižší energetické náročnosti oproti jiným rozmělnovacím jednotkám.

V praktické části bakalářské práce byla navržena dezintegrační jednotka pro vybraný typ odpadu. Na základě rešerše o dezintegračních zařízeních byl vybrán dvouválcový nožový drtič, který byl navržen pro opotřebované pneumatiky. Stroj byl určen pro drcení částic o velikosti 50 mm na rozměr 12 mm, přičemž jeho výkonost je 5 tun za hodinu. Dle výpočtů vyšel potřebný příkon pro drcení 1636 W, příkon drtiče byl zvolen na základě tohoto údaje na 2x30 kW.

Seznam použité literatury:

- [1] *Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů* [online]. 2010 [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.opzp2007-2013.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolyticky-rozklad-odpadu-i/>
- [2] TRÁVNÍČEK, Petr, VITÁZEK, Ivan, VÍTĚZ, Tomáš, Luboš KOTEK a Petr JUNGA. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 9788075092069.
- [3] BRIDGWATER, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2012, **38**, 68-94 [cit. 2018-03-15]. ISSN 09619534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- [4] MOTLÍK, Jan a Jaroslav VÁŇA. *Biomasa pro energii (2)* [online]. CZ Biom – České sdružení pro biomasu, © 2001-2018. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-2-technologie>.
- [5] Pyrolýza. *Envirack.cz* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.envirack.cz/pyrolyza.html>
- [6] Autor neznámý. Pyrolýza odpadů - moderní způsob jejich zneškodnění. *Enviweb.cz* [online]. Enviweb s.r.o., © 1999-2018 [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/94618>
- [7] POHOŘELÝ, Michael, Michal JEREMIÁŠ, Petra KAMENÍKOVÁ a et al. *Zplyňování biomasy* [online]. 2012, 264-274 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_04_264-274.pdf
- [8] KRÁTKÝ, Lukáš, 2015. *Technologie a zařízení pro intenzifikaci termo- a biochemické konverze odpadů na ušlechtilé chemické látky a biopaliva*. Praha. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [9] ASADULLAH, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201-215. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.074
- [10] Archiv. *Technický portál* [online]. 2014 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/nove-technologie-pro-materialove-energeticke-vyuziti-biomasy-a-odpadu-pyrolyzou-i-zplynovanim_25207.html
- [11] SIKARWAR, Vineet Singh, Ming ZHAO, Paul S. FENNELL, Nilay SHAH and Edward J. ANTHONY. Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2017, **61**, 189-248 [cit. 2018-03-14]. ISSN 03601285. DOI: 10.1016/j.peccs.2017.04.001.
- [12] ZÁMOSTNÝ, Petr a Ladislav KURC. Vliv podmínek a složení suroviny na pyrolýzu dřevní hmoty. *Chemické Listy* [online]. 2011, roč. 105, s. 458–466 [cit. 2018-03-23]. ISSN 0009-2770.
- [13] SAIDL, Jan. Konstrukce pneumatiky. *Autolexikon.net* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
- [14] Autor neznámý. Pneumatiky. *Třídění odpadu* [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/pneumatiky>

- [15] Produkce, využití a odstranění odpadu a produkce druhotných surovin - v roce 2016. *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/cris/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-a-produkce-druhotnych-surovin-v-roce-2016>
- [16] DUNDÁLKOVÁ, Petra. Využití plastů, recyklace plastů [online]. Brno. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/2062/Knihovna%20k%20projektu/Vyu%BFit%DD%20a%20recyklace%20plast%plast%A8.pdf>
- [17] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Code Creator, 2015. [cit. 2018-07-11]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/08.html>
- [18] LUO, Siyi, Bo XIAO, Zhiqian HU and Shiming LIU. Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, **35**(1), 93-97. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.048.
- [19] HRABÁNEK, Radek, 2010. *Metody sušení biomasy*. Brno. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [20] TAHERZADEH, M.J. and K. KARIMI. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008, roč. 9, č. 9, s. 1621–1651. DOI: 10.3390/ijms9091621.
- [21] WU, S.P., S. TAO and W.X. LIU. Particle size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural and urban atmosphere of Tianjin, China. *Chemosphere* [online]. 2006, 62(3), 357-367 [cit. 2018-07-16]. ISSN 00456535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.101.
- [22] STUPAVSKÝ, Vladimír a Tomáš HOLÝ. Dřevní štěrka - zelená, hnědá, bílá. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2018-07-16]. Dostupné z <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>
- [23] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.
- [24] Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Rozpojování URL: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/5%20Rozpojovani.pdf
- [25] JEŠUTA, Jiří, 2016. *Kyvadlo čelistového drtiče 1 600 X 1 250*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] Jaw crusher, *mclanahan.com* [online]. [cit. 2018-07-27]. Dostupné z: <https://www.mclanahan.com/products/jaw-crushers/>
- [27] Válcový drtič. In: *tstw.cz* [online]. [cit. 2018-07-27]. Dostupné z: http://tstw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-4#v%C3%A1lcov%C3%A9-drti%C4%8De
- [28] DINTER, Oskar. *Drcení a mletí nerostných surovin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984
- [29] Nožové drtiče. *Terier s.r.o.* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.terier.cz/cz/328/29/drtice-na-pneumatiky/stroje-na-drceni-a-recyklaci-pneumatik/katalogove-listy.htm>
- [30] Drcení a mletí. *ksp.tul.cz* [online]. [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm

- [31] *Energie z biomasy XVI: sborník příspěvků z konference*. Editor Michaela HRNČÍŘOVÁ, editor Martin LISÝ. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. ISBN 978-80-214-5286-2.
- [32] MACKO, Marek. 2012. *Size Reduction by Grinding as an Important Stage in Recycling, Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production*, Prof. Enri Damanhuri (Ed.), ISBN: 978-953-51-0632-6.
- [33] Nožový mlýn DREHER Heinrich GmbH & Co. KG. *Direct industry* [online]. 2018 [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/dreher-heinrich-gmbh-co-kg/product-50082-537732.html>
- [34] Hammer crusher. *hfjd.com* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: http://www.hfjd.com/en/products/Crushing-Machine/hammer_crusher.html
- [35] Ball mill. *bailing machinery.com* [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.bailingmachinery.com/products/ballmill/22.html>
- [36] CADOUCHE, L. and G.D. LÓPEZ. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. *Biological Wastes*. 1989, roč. 30/2, s.153–157. DOI: 10.1016/0269-7483(89)90069-4.
- [37] TYMANOK, A., B. TAMM and D. GOLJANDIN. Recycling of Outworn Tyres by Grinding at Normal Temperature. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 1998, **31**(7), 123-128 [cit. 2018-08-08]. ISSN 14746670. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)40268-0.
- [38] *Tyre recycling systém solutions* [online]. [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://eldan-recycling.com/en/tyre-recycling-system-solutions>
- [39] PEKAŘ, Martin, 2017. *Zařízení v technologii výroby a recyklace plastů*. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Fakulta strojní.
- [40] Waste Tire Recycling Tire Wire Extractor / Tyre Wire Bead Removal Machine. *jsxindagroup.en.made-in-china.com* [online]. [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://jsxindagroup.en.made-in-china.com/product/KvXQlzcJbkhg/China-Waste-Tire-Recycling-Tire-Wire-Extractor-Tyre-Wire-Bead-Removal-Machine.html>
- [41] KHALOO, Ali R., M. DEHESTANI and P. RAHMATABADI. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste Management* [online]. 2008, **28**(12), 2472-2482 [cit. 2018-08-13]. ISSN 0956053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.01.015.

Seznam obrázků

Obr. 1. Schéma jednotky Pyromatic [9].....	9
Obr. 2. Technologie zplyňování [8].....	10
Obr. 3. trhačka ocelových lanek z pneumatik [40]	14
Obr. 4. Přehled nejčastěji používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkost suroviny [8]	19
Obr. 5. Způsoby rozpojování pevných částic [23].....	20
Obr. 6. Čelistový drtič a jeho kinematické schéma [23]	22
Obr. 7. Čelistový drtič [26]	22
Obr. 8. Schéma válcového drtiče [27]	23
Obr. 9. Dvouválcový drtič [27].....	24
Obr. 10. Lundelleho nožový drtič [8]	25
Obr. 11. Drtič na osobní pneumatiky SCE 700/950 30 kW od firmy Terier [29]	26
Obr. 12. Typy nožových hlav (vlevo) a schéma nožového mlýnu (vpravo) [31].....	27
Obr. 13. Nožový mlýn určený k mletí plastů [33]	27
Obr. 14. Schéma úderového mlýnu [32].....	28
Obr. 15. Úderový drtič [34]	29
Obr. 16. Schéma kulového mlýnu [23].....	30
Obr. 17. Kulový mlýn [35]	30
Obr. 18. Blokové schéma drcení pneumatik [40]	34
Obr. 19. Základní konstrukční uspořádání.....	37

Seznam tabulek

Tab. 1. Požadavky na kvalitu paliva pro jednotlivé typy generátorů [7]	11
Tab. 2. Druhy rostlinné biomasy a jejich průměrná vlhkost a výhřevnost [12].....	12
Tab. 3. Zastoupení jednotlivých druhů plastů v komunálním odpadu [16, 39]	14
Tab. 4. Složení testovaných druhů odpadů [18].....	15
Tab. 5. Stupně výsledného rozmělnění [24].....	21
Tab. 6. Shrnutí parametrů drtičů a mlýnů [8, 23, 25, 38, 39].....	31
Tab. 7. Energetická náročnost drcení/mletí pšeničné slámy, tvrdého dřeva, pneumatik a plastů	32
Tab. 8. Shrnutí počátečních informací	34
Tab. 9. Shrnutí výsledků	36

Seznam grafů

Graf 1. Závislost výtěžku plynu na velikost částic [18].....	16
Graf 2. Závislost na obsahu koksu a dehtu na velikosti částic [18].....	16

Vzorce

- (1) Vzorec pro určení energie potřebné pro rozpojení materiálu
- (2) Integrační vztah pro výpočet energie rozpojení dle Rittingera
- (3) Integrační vztah pro výpočet energie rozpojení dle Bonda
- (4) Integrační vztah pro výpočet energie rozpojení dle Kicka
- (5) Výpočet energie potřebné pro rozpojení materiálu dle Kicka
- (6) Dosazení do výpočtu energie potřebné pro rozpojení materiálu dle Kicka
- (7) Vztah pro výpočet příkonu
- (8) Dosazení do vztahu pro výpočet příkonu
- (9) Vztah pro výpočet otáček
- (10) Dosazení do vztahu pro výpočet otáček