

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**TECHNOLOGIE PYROLYTICKÉHO
ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

MATOUŠ ANDĚL

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

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za potřebné rady a připomínky, díky kterým mohla tato práce vzniknout.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Anděl** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **420499**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technologie pyrolytického zpracování odpadů

Název diplomové práce anglicky:

Waste treatment using pyrolysis

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši zaměřenou na projektování technologií pyrolýzy vybraného materiálu a na konstrukci klíčových strojů a zařízení.
- 2) Pro vybraný typ odpadu navrhnete základní PFD schéma technologie, provedte potřebné hmotové a energetické bilance včetně ekonomické analýzy procesu.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**

Platnost zadání diplomové 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

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

26-04-2018
Datum převzetí zadání

Matouš Anděl
Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora: Matouš

Příjmení autora: Anděl

Název práce česky: Technologie pyrolytického zpracování odpadů

Název práce anglicky: Waste treatment using pyrolysis

Rozsah práce: počet stran: 71

počet obrázků: 29

počet tabulek: 24

počet příloh: 2

Akademický rok: 2017/2018

Jazyk práce: Čeština

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Strojní inženýrství, obor Procesní technika

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

Oponent:

Konzultant práce:

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Anotace česky: Tato diplomová práce se v první části zabývá rešerší využití pyrolýzy ke zpracování odpadních pneumatik, a to jak v experimentálním, tak v průmyslovém měřítku. Shrnuje dosavadní zkušenosti a nabízí porovnání výtěžků jednotlivých produktů v experimentální i průmyslové oblasti. Dále ukazuje přehled základních uspořádání pyrolýzních reaktorů. V druhé části pak obsahuje materiální a ekonomickou bilanci pro vybraný druh technologie, jejímž výstupem je zhodnocení ekonomické návratnosti pyrolýzní jednotky. Posledním krokem je pak citlivostní analýza, která ukazuje vliv vybraných parametrů na výnosnost projektu.

Anotace anglicky: This diploma thesis deals in the first part with the research of the use of pyrolysis for the processing of waste tires, both on experimental and industrial scale. It summarizes experience and offers a comparison of the yields of individual products in the experimental and industrial fields. It also shows an overview of the basic arrangements of pyrolysis reactors. In the second part there is a material and economic balance for the chosen type of technology, which results in an evaluation of the economic return of the pyrolysis unit. The last step is the sensitivity analysis, which shows the influence of selected parameters on the profitability of the project.

Klíčová slova: pyrolýza, pneumatiky, nebezpečný odpad, technická a ekonomická analýza

Využití: Studijní materiál, který shrnuje současný stav pyrolytického zpracování odpadních pneumatik. Inspirace pro projektování pyrolýzní jednotky na zpracování odpadních pneumatik.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Pneumatiky.....	11
2.1 Struktura	12
3. Rešerše experimentálních zařízení.....	13
3.1 Pyrolýzní reaktory používané při zpracování odpadních pneumatik.....	13
3.1.1 Reaktor s pevným ložem.....	13
3.1.2 Šnekové reaktory a reaktory s rotační pecí	15
3.1.3 Reaktory s fluidním ložem	15
3.1.4 Další typy reaktorů.....	16
3.2 Vliv typu pneumatiky a jejího složení na složení produktů.....	16
3.3 Zhodnocení vlivu parametrů na složení produktů	17
3.4 Složení produktů.....	17
3.4.1 Složení pyrolýzního oleje.....	17
3.4.2 Vlastnosti paliva vzniklého pyrolýzou odpadních pneumatik.....	18
3.4.3 Spalování pyrolýzního oleje	20
3.4.4 Úpravy produktů.....	20
3.4.5 Složení a vlastnosti pevného zbytku (pyrolýzního uhlí).....	20
3.4.6 Využití pevného uhlíkatého zbytku jako sazí.....	21
3.4.7 Složení pyrolýzního plynu z pyrolýzy pneumatik.....	22
3.4.8 Shrnutí k pyrolýzním produktům	23
3.4.9 Porovnání výsledků, grafy.....	24
4. Rešerše průmyslových a komerčních zařízení	26
4.1 Konstrukce klíčových strojů a zařízení	26
4.1.1 Reaktor s pevným ložem.....	27
4.1.2 Šnekový reaktor	28
4.1.3 Reaktor s rotační pecí	31
4.2 Plastic Advanced Recycling Corporation (P.A.R.C)	32
4.3 Resem	33
4.4 Sunny group.....	34
4.5 FAB-INDIA Industries.....	35
4.6 HUAIN GROUP.....	35
4.7 Reklam	35
4.8 Mobius.....	36
4.9 Splainex Ecosystems	36
4.10 BESTON	36

4.11	Tyre pyrolysis plant.....	37
4.12	TK (Technokomplex).....	37
4.13	ERVO EnviTech.....	38
4.14	DGE.....	39
4.15	Porovnání výsledků.....	41
4.16	Komentář k rešerši komerčních a průmyslových pyrolytických zařízení.....	41
5.	Praktická část.....	43
5.1	Výběr technologie.....	43
5.2	Procesní technologie.....	43
5.2.1	Vstup.....	44
5.2.2	Výstup.....	44
5.3	Hmotová bilance celého systému.....	45
5.4	Určení zařízení.....	47
5.4.1	Vytrhávačka patních lan (F-111).....	47
5.4.2	Drtička (Z-113).....	47
5.4.3	Zásobník na pryž (K-114).....	47
5.4.4	Reaktor (C-110).....	47
5.4.5	Chlazení pyrolýzního uhlí (W-118).....	49
5.4.6	Cyklonový odlučovač.....	50
5.4.7	Kondenzátor (W-120).....	50
5.4.8	Separátor voda-plyn (F-124).....	50
5.4.9	Ventilátor (V-125).....	50
5.4.10	Čištění pyrolýzního plynu (F-126).....	50
5.4.11	Kompresor (V-128).....	50
5.4.12	Plynové hořáky (D-119).....	51
5.5	Ekonomika.....	51
5.5.1	Příklady nacenění některých zařízení.....	51
5.5.2	Fixní kapitálové investice-CAPEX.....	52
5.5.3	Provozní náklady.....	54
5.5.4	Ceny produktů.....	56
5.5.5	Kritéria ziskovosti.....	58
5.6	Citlivostní analýza.....	60
5.6.1	Výnosnost jako funkce výkupní ceny oleje.....	61
5.6.2	Výnosnost jako funkce výkupní ceny pyrolýzního uhlí.....	62
5.6.3	Výnosnost jako funkce fixní ceny za čištění odpadních plynů.....	62
5.6.4	Výnosnost jako funkce provozních nákladů na čistící zařízení.....	63
5.6.5	Výnosnost jako funkce denní kapacity zpracovávaných pneumatik.....	64

5.7	Popis souboru Microsoft Excel.....	65
6.	Závěr.....	67
7.	Zdroje.....	69

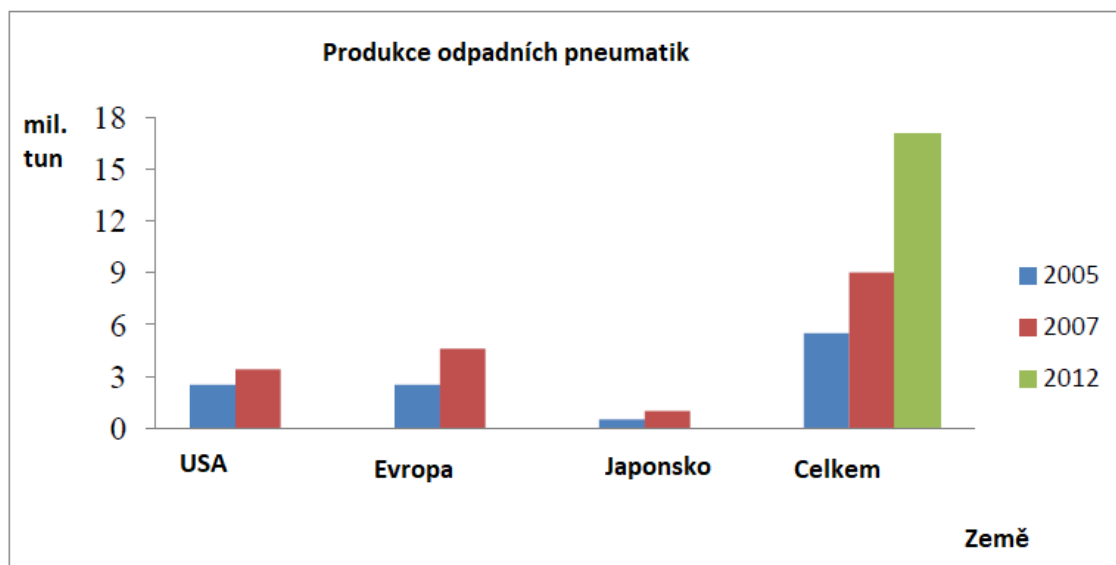
1. Úvod

Není žádnou novinkou, že v dnešní moderní době, která je založena na neustále se zvyšujícím uspokojování lidských potřeb, vzniká také stále větší množství odpadů. To je samozřejmě nežádoucí a v souvislosti s tím už před několika desetiletími začala snaha odpady eliminovat, recyklovat a využít všemi možnými způsoby. V dnešní době je tato snaha, pokud se bavíme o vyspělých státech, už relativně na vyhovující úrovni, nicméně spolu s neustálým vývojem technologií a společnosti, probíhá vývoj i v této oblasti. Hlavním zájmem je pak, jako u všeho, využít potenciál na maximum. Tato práce je zaměřena na zpracování jednoho specifického odpadu, a tím jsou použité pneumatiky osobních automobilů, případně i jiných vozů. U zpracování takového odpadu existuje několik možností, jak s ním naložit a některé jsou popsány v textu dále, nicméně tato práce se zaměřuje na zpracování odpadních pneumatik použitím tzv. pyrolýzy. Zjednodušeně se jedná o proces, při kterém se pomocí zvyšování teploty za nepřítomnosti kyslíku štěpí organické materiály na jednodušší složky jak pevné, tak kapalné a plynné. Podrobnější popis procesu pyrolýzy lze najít např. v [1]. Při zpracování pyrolýzou jde o to, pokusit se přeměnit odpadní pneumatiky v produkty, které budou dále využitelné, ale současně za přijatelných ekonomických podmínek.

Na obr.1 je vidět, jaká byla spotřeba pneumatik v posledních letech v různých částech světa. Na celém světě se vyprodukuje kolem 1,5 miliardy pneumatik za rok, což zhruba odpovídá 17 milionů tun použitých pneumatik [2], [3]. V roce 2013 bylo v Evropské unii spotřebováno 3,6 milionu tun a v USA v roce 2015 zhruba 4 miliony tun. Drtivou většinu (téměř 88 %) spotřebovaných pneumatik má na svědomí USA, Indie, Japonsko a Evropská Unie.

Obecně je dnes snaha použité pneumatiky, stejně jako jiné produkty, co nejvíce využít i poté, co by se jinak měly vyhodit. Pokud se pneumatiky skládkují, tak dochází k ohrožení životního prostředí a tím pádem i lidského zdraví. Problémem při skládkování je i to, že pneumatiky jsou primárně vyráběny, aby vydržely co nejdéle. Jejich vlastnosti, jako je odolnost proti mechanickému poškození, odolnost proti všem druhům počasí a také odolnost proti teplu, elektřině a mnoha chemikáliím i bakteriím způsobují, že na skládce vydrží i staletí. Tento způsob zacházení s pneumatikami je ve výsledku navíc i neekonomický, protože použité pneumatiky jsou potenciálním zdrojem jak materiálu, tak energie. Z těchto důvodů je proto v Evropské Unii od roku 2006 zakázáno pneumatiky skládkovat a další nařízení vyžaduje, že 80 % z celkové váhy

použitých pneumatik má být recyklováno [4]. Nicméně ve světě je celkově podle odhadů 64 % použitých pneumatik ilegálně odkládáno na skládky [6].



Obrázek 1: Produkce odpadních pneumatik [5]

Nakládání s pneumatikami v EU, Norsku, Švýcarsku a Turecku je podle [2] následující. Podle zprávy z roku 2015 vzniklo v roce 2013 zhruba 3,59 milionu tun použitých pneumatik. Z toho 1,325 milionu tun bylo využito materiálově. Materiálové využití znamená například přidávání starých zpracovaných gum do sportovních hřišť (tartanový povrch), střešních materiálů atd. To je z celkového množství materiálově zpracovaných použitých pneumatik asi 10 %. Významnější složkou je recyklace. Mezi recyklaci zahrnujeme zpracování použitých pneumatik na granulát (1,119 mil tun), využití v ocelárnách a slévárnách (7 000 tun), použití na blatníky, otryskání rohoží... (43 000 tun) a pyrolýzu pneumatik (23 000 tun). 1,417 milionu tun bylo využito energeticky. Sem patří převážně spalování v cementačních pecích nebo s ostatními odpady. To v součtu znamená, že zpracováno bylo 3,456 milionu tun použitých pneumatik, což odpovídá 96 % z celkového množství vzniklých pneumatik. Toto je oproti číslům z roku 1999, kdy se podle stejné asociace dosahovalo jenom 50 % výsledků, znatelné zlepšení.

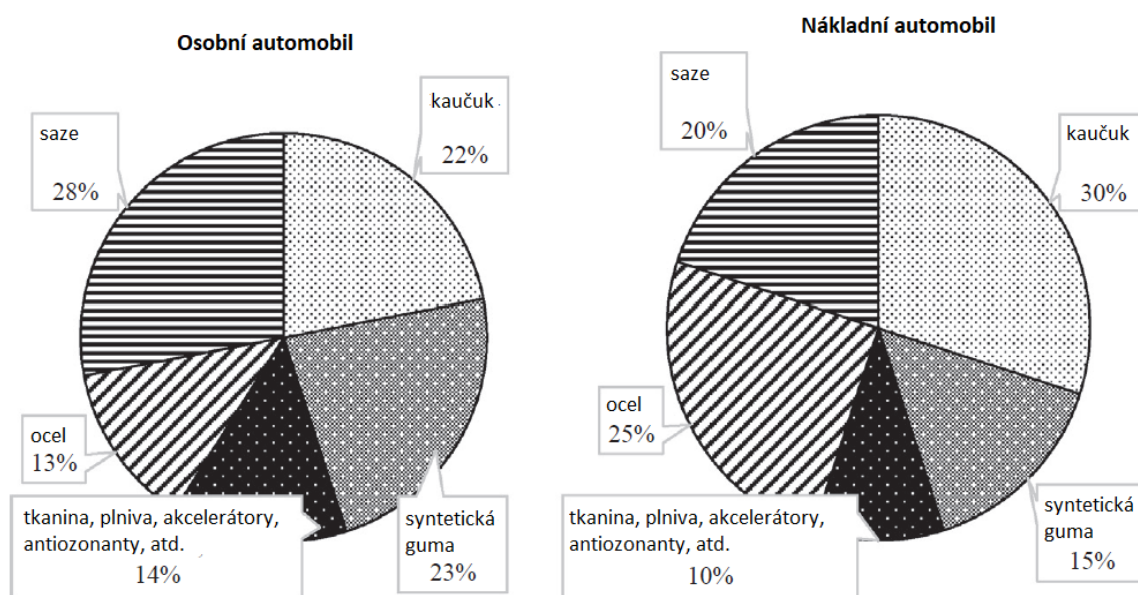
Na první pohled se zdá, že už vlastně není moc co zlepšovat. Z 96 % do sta už je jen neznatelný rozdíl. Nicméně teď přichází fáze, kdy je třeba zjistit, který z těchto způsobů zpracování použitých pneumatik je opravdu výhodný a jak případně přerozdělit zastoupení jednotlivých způsobů ve zpracování použitých pneumatik.

Jednou z možností je právě pyrolýza, kterou se podle uvedené zprávy v EU, Norsku, Švýcarsku a Turecku v roce 2013 zpracovalo zhruba 23 000 tun. To je vzhledem k celkovému počtu použitých

pneumatik celkem zanedbatelné číslo, cca 0,64 %. Vezmeme-li ale v potaz potenciál pyrolýzy, je otázkou, jestli by se nevyplatilo, kdyby bylo její zastoupení o něco větší. Mimo strojařského hlediska, které se na věc dívá z hlediska realizace a návratnosti a kterým se zabývá tato práce, je ovšem otázkou, jestli bude technologie šetrná k životnímu prostředí, jestli budou produkty skutečně alternativou k petrochemickým produktům atd.

2. Pneumatiky

Pneumatika se skládá ze tří hlavních materiálů: gumové směsi, kovu, a textilií. Správnou kombinací těchto složek dostaneme různé druhy pneumatik s potřebnými vlastnostmi. Jak je vidět



Obrázek 2: Materiálové složení pneumatik [3]

na obrázku č.2, gumová směs tvoří hlavní složku, skládá se z kaučuku a/nebo syntetické gummy, sazí, amorfního oxidu křemičitého, vulkanizačních činidel a spousty aditiv, kterých může být podle různého způsobu použití i více než 100 druhů. Přes pokrok ve vývoji syntetických gum, je stále nejdůležitějším prvkem právě kaučuk, pro své speciální vlastnosti. Mezi nejpoužívanější syntetické gummy patří butyl a styren-butadien. Dalšími důležitými prvky jsou oxid křemičitý a saze, které zajišťují odolnost proti opotřebení a trvanlivost. Pro zpevnění polymerního materiálu se používá jako aditivum síra nebo její sloučeniny. Toto aditivum změní strukturu polymerních materiálů tím, že vytvoří tzv. můstky mezi jednotlivými polymerními řetězci. Proto je další důležitou složkou síra a zároveň oxid zinečnatý, který se používá jako vulkanizační aktivátor [3].

Druhým typem materiálu je kov, což je většinou drát z oceli vysoké kvality. Povlakové materiály a aktivátory obsahují mosaz, cín a zinek.

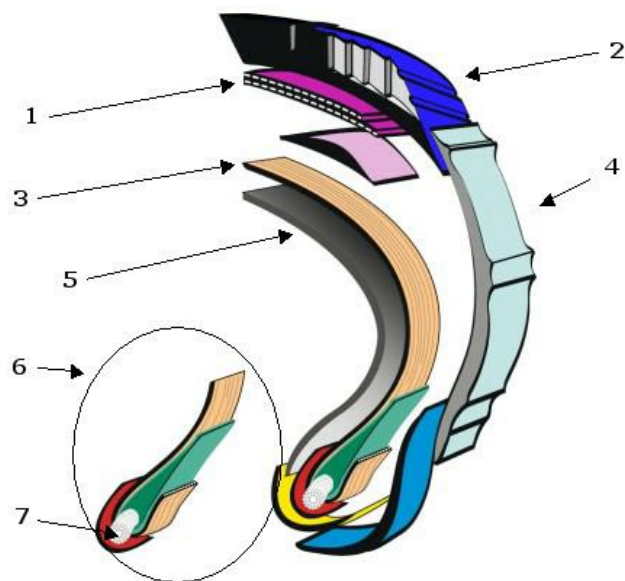
Posledním typem materiálu použitým v pneumatikách jsou textilie. Nejčastěji se používají polyester, rayon a nylon.

2.1 Struktura

Nejpoužívanější struktury používané na pneumatiky jsou diagonální (příčné), předpjaté a radiální. Nejčastěji se ale používá konstrukce radiální.

Typická pneumatika se skládá ze sedmi částí. Převzato z [7].

- 1) **Korunní kordová vrstva:** tvoří přechod mezi běhounem a kostrou pláště. Jeho úkolem je stabilizovat běhoun v obvodovém směru a zvyšovat odolnost pláště proti průrazu. U nákladních automobilů se používají v průměru tři až čtyři, u osobních pak většinou dvě nárazníkové vrstvy. Radiální pneumatiky mají dnes již téměř výhradně nárazník z ocelového kordu.
- 2) **Běhoun:** je velmi důležitá část pláště opatřená vzorkem. Běhoun zajišťuje styk kola s vozovkou a jeho tloušťka má vliv na zahřívání pneumatiky. Z důvodu energetických ztrát a opotřebení by měl být co nejtenčí. To však neplatí u pláštů pro nákladní vozidla, u nichž je většinou běhoun konstruován pro možnost dalšího prořezání dezénu.
- 3) **Radiální kordová vrstva:** je základní částí pláště, je tvořena kordovými vložkami. Skladba a složení těchto vložek určují základní vlastnosti pláště. V průběhu vývoje pláštů se měnil systém kladení vláken i materiál. Od křížové tkaniny v dávné historii k paralelnímu kladení netkaných kordových vláken v současnosti. Podle složení kordové vrstvy rozlišujeme pneumatiky radiální a diagonální.
- 4) **Bočnice:** zajišťuje ochranu kostry před vnějšími vlivy. Je vyrobena z přírodního kaučuku, aby vydržela mnohonásobný ohyb.
- 5) **Vnitřní gumová vrstva:** zabraňuje úniku vzduchu z vnitřku pláště. V bezdušových pneumatikách plní roli duše. Je vyrobena z butylového kaučuku.
- 6) **Patka:** je zesílená část pláště dosedající na ocelový ráfek. Jádro patky tvoří patní lano vyrobené z vysokopevnostního ocelového lana. Patka slouží k zakotvení kordových vložek a zajišťuje bezpečné usazení pláště na ráfku.
- 7) **Patní lanko:** zajišťuje správné dosednutí pneumatiky v ráfku. Také zajišťuje těsnost spojení s ráfkem a přenos podélných sil (díky tření mezi ráfkem a patkou pneumatiky)



Obrázek 3: Konstrukce pneumatiky [7]

3. Rešerše experimentálních zařízení

3.1 Pyrolýzní reaktory používané při zpracování odpadních pneumatik

Pro pyrolýzu pneumatik se využívají tyto druhy reaktorů: s pevným ložem, šnekový, s rotační pecí, vakuový a s fluidním ložem. V tabulce 6 jsou různé druhy pyrolýzních reaktorů použitých při laboratorních experimentech spolu s provozními podmínkami a typickými výtěžky jednotlivých produktů. V různých případech jsou uvedena i data o množství recyklovaného ocelového zbytku, které se obvykle pohybují v rozmezí od 10 do 15 hm.% z celkové hmotnosti použitých pneumatik. Pro laboratorní účely byly široce používány reaktory s pevným ložem. Takový reaktor je obvykle zahříván externě elektrickou pecí a jako inertní plyn se používá dusík. Tepelná degradace pneumatiky začíná při teplotě okolo 350 °C. Experimenty pak následně obvykle probíhají při teplotě v rozmezí 450–700 °C. Pro provozní podmínky je většinou snaha o kontinuální provoz a reaktor s pevným ložem se většinou nepoužívá. Namísto toho se využívají reaktory s rotační pecí, šnekové reaktory a s fluidním ložem [8].

V následujících odstavcích je stručný popis jednotlivých experimentů pro určitý druh reaktoru a informace jsou čerpány převážně z [8].

3.1.1 Reaktor s pevným ložem

Jedná se o nejzákladnější typ reaktoru, který se používá. Byly provedeny např. tyto experimenty. Aydın a İlkilic [9] zkoumali pyrolýzu použitých pneumatik zbavených oceli a textilie. V reaktoru o objemu 1,15l za použití dusíku při teplotách mezi 400–700 °C. Zjistili, že výtěžek oleje se zvýší z 31 hm.% při 400 °C na 40 hm.% při teplotě 500 °C. Při dalším zvýšení teploty se výtěžek liší už

jen nepatrně. Zkoumali také vliv průtoku dusíku na výtěžek produktů, ale zjistili, že je jím ovlivňován zanedbatelně. Williams a kolektiv [10] pro experiment použili malý reaktor se vsázkovým režimem. Zkoumali vliv teploty od 300 do 720 °C a rychlost ohřevu v rozmezí 5–80 °C/min na výtěžek produktů na množství 50 g pneumatik. Při 300 °C začala tepelná degradace pneumatik. Pro maximalizaci výtěžku oleje na 54 – 58,8 hm.% bylo potřeba nastavit teplotu na zhruba 600 až 720 °C.

Při použití většího reaktoru s pevným ložem, vsázkou 1,5 kg, teplotou 475 °C a rychlostí ohřevu 5 °C/min obdrželi 58,2hm. %, 37,3 hm.% uhlíku a 4,5 hm.% pyrolýzního plynu [10]. Islam a kol. [11] získali podobné výsledky při použití 750 g odpadních pneumatik v jedné dávce. Při teplotě 475 °C bylo složení 55 hm.% oleje, 36 hm.% uhlíku a 9 hm.% plynu. Při experimentu, který provedl Kar (2011), byly pyrolyzovány 10 g vsádky použitých pneumatik při rychlosti ohřevu 10 °C/min. Byl zkoumán vliv teploty v rozmezí 375 až 500 °C. Maximálního výtěžku 60 hm.% pyrolýzního oleje bylo dosaženo při teplotě 425 °C. Při 500 °C klesl výtěžek oleje na 54,12 hm.%. Výtěžek plynu stoupl z 2,99 hm.% na 20,22 hm.% a výtěžek uhlíku klesl z 50,67 hm.% na 26,41 hm.%.

Při podobných experimentálních podmínkách se nicméně jiné skupině [12], podařilo získat jen 38,8 hm.% oleje, 34 hm.% uhlíku a poměrně vysoký obsah pyrolýzního plynu 27,2 hm.% při rychlosti ohřevu 5 °C/min a teplotě 400 °C. Podobný výsledek měli i Laresgoiti a kolektiv [13] a de Marco a kol. [14]. Rada a kolegov0 [15] také získali výtěžek 40 hm.% oleje, 40 hm.% uhlíku a 20 hm.% plynu.

Významný vliv na složení produktů má rychlost ohřevu a čas zdržení. Vysoká teplota a delší čas zdržení plynu v horké zóně způsobuje štěpení oleje na plyn.

Podle Williamse. [16] zvýšení rychlosti ohřevu zvýší výtěžek plynného výtěžku. Při 5 °C/min byl výtěžek plynu 6,6 hm.% a při 80 °C/min činil 14,8 hm.%. Oba experimenty probíhaly při 720 °C. Jako další příklad můžeme vzít např. experimenty provedené Banar [12]. Při zvýšení rychlosti ohřevu z 5 na 35 °C/min, při pyrolýzní teplotě 400 °C, se složení plynu zvýšilo na 33,8 hm.% z 27,2 hm.% a výtěžek oleje se snížil na 35,1 hm.% z 38,8 hm.%. Vliv velmi rychlého ohřevu 1200 °C/min v teplotním rozmezí 500–1000 °C zkoumali Leunga [17]. Při takto rychlém ohřevu se výtěžek plynu zvýší z 5 hm.% při teplotě 500 °C na 23 hm.% při teplotě 900°C.

Pro laboratorní reaktory většího měřítka (okolo 1 tuny zpracovaného materiálu v jedné vsádce, jak celých pneumatik, tak drcených) platí menší výtěžky oleje. Např. 20,9 hm.% oleje, 23,9 hm.% plynu při teplotě 950 °C [10]. Při takto velkých reaktorech s pevným ložem je zásadní nevýhodou malá rychlost ohřevu vzhledem k velkému objemu. Díky tomu se pro provozní měřítka nevyužívá ve větší míře.

3.1.2 Šnekové reaktory a reaktory s rotační pecí

Pro provozní podmínky jsou výhodnější reaktory uzpůsobené na kontinuální provoz. Jedním z nich je např. šnekový reaktor [18], externě vyhřívaný elektrickým proudem. Byly zkoumány vlivy několika parametrů (teplota, hmotnostní průtok...) na složení produktů. Hmotnostní tok byl mezi 3,5 – 8 kg/h nadrcených odpadních pneumatik. Maximální výtěžek oleje byl 48,4 hm.% při teplotě 600 °C a průtoku 8 kg/h.

Galvagno [19] experimentoval s pilotní jednotkou reaktoru s rotační pecí, aby zjistili vliv teploty na výtěžek produktů. Reaktor měl průměr 0,4 m a otáčel se rychlostí 3 ot./min. Hmotnostní průtok byl 4,8 kg/h. Kondenzační systém umožnil zkondenzování frakcím lehkého a těžkého oleje a nezkondenzovatelné plyny byly vyčištěny od kyselých složek a poté spáleny ve fléře. Uhlík byl kontinuálně vypouštěn do vodou chlazené nádrže. Maximální výtěžek oleje byl 38,2 hm.% při 550 °C a maximální výtěžek plynu při 680 °C činil 10,75 hm.%. Dalším výzkumem reaktoru s rotační pecí se zabýval Li a kolektiv [20]. Opět šlo o zjišťování vlivu teploty na složení produktů. Rotační pec měla průměr 0,3 m a byla 3 m dlouhá. Rychlost otáčení se pohybovala mezi 0,45 – 0,9 ot./min. Největší výtěžek oleje byl 45,1 hm.% byl dosažen při 500 °C. Největšího výtěžku plynu se dosáhlo při 650 °C a to konkrétně 18,3 hm.% kvůli sekundárním štěpným reakcím olejových par při vyšších teplotách a kvůli delší době zdržení plynů v horké zóně reaktoru.

3.1.3 Reaktory s fluidním ložem

Výzkumem reaktorů s fluidním ložem se rozsáhle zabýval Kaminsky a jeho spolupracovníci [21, 22, 23, 24, 25]. Byly provedeny experimenty zařízení o rozdílných velikostech: v laboratorním měřítku s průtokem 1 kg/h odpadních pneumatik, technickém měřítku s průtokem 30 kg/h a s pilotním zařízením o průtoku 200 kg/h. Zařízení velkého měřítku jsou schopny zpracovávat celé pneumatiky. Fluidní lože je typicky zahříváno na teplotu 500 až 780 °C pomocí sálavých tepelných trubek v loži křemičitého písku, ve kterém je spalován vyprodukovaný pyrolýzní plyn kvůli zajištění tepla potřebného pro reakci. Fluidní plyn je také plynem produkovaným a je předeříván na 400 °C. Pokud se v loži zachytí nějaký prach, je odstraněn šnekovým extraktorem. Produkovaný plyn prochází cyklonem kvůli odstranění pevných částic. Bylo zjištěno, že při laboratorním měřítku pro průtok 1 kg/h při teplotě 740 °C byl výtěžek oleje 30,2 hm.% a pro pilotní měřítko s průtokem 200 kg/h a zpracování celých pneumatik při teplotě 700 °C byl výtěžek oleje 26,8 hm.%. Pokud byl ale vztažen na hmotu pneumatiky bez ocelových částí (jako v laboratorním měřítku), byl výtěžek podobný laboratornímu, a to 30,9 hm.%

Další experiment [26] se zabýval pyrolýzou nastrohaných pneumatik o velikosti 1,0 – 1,4 mm při teplotě 450–600 °C. Reaktor měl průměr 7,5 cm a byl 100 cm vysoký s ložem z křemenného písku. Hmotnostní průtok byl přibližně 220 g/h. Maximální výtěžek oleje byl při teplotě 450 °C a činil 55

hm.%. Při zvýšení teploty na 600 °C klesl na 43,5 hm% a zároveň výtěžek plynu stoupl z 2,5 na 14 hm.%

V jiném experimentu [27] byl zkoumán vliv velikosti částic (0,32 – 0,8 mm), teploty (360 až 810 °C) a čas zdržení plynu (1–5 s) na složení produktu. Reaktor měl 10 cm průměr a byl 290 cm vysoký. Maximální výtěžek oleje byl přibližně 52 hm.% při 450 °C a významně se snížil při teplotě 810 °C na 30 hm.%. Se změnou teploty se naopak zvedl výtěžek plynu z 15 hm.% na 40 hm.%. Vliv velikosti částic byl takový, že při menší velikosti částic byl větší výtěžek oleje než při větší velikosti při stejné teplotě. Konkrétně při velikosti částic cca 0,32 mm byl výtěžek 50 hm. % a při velikosti cca 0,8 mm byl výtěžek 41 hm.% při teplotě 500 °C. Delší čas zdržení se projevil na výsledku tak, že při teplotě 500 °C se snížil z 51 hm.% při době zdržení 1 s na 48 hm.% při době zdržení 5 s.

3.1.4 Další typy reaktorů

Mezi další typy reaktorů patří např. tzv. spouted bed reaktor, vakuové reaktory, drop tube reaktor, wire mesh reaktor atd. Ty mají ale jak v laboratorním, tak v průmyslovém měřítku poměrně zanedbatelný význam.

3.2 Vliv typu pneumatiky a jejího složení na složení produktů

Většina výzkumů na pyrolýzu pneumatik probíhala tak, že byly používány pneumatiky různých značek a druhů. Tyto pneumatiky můžou podle výzkumů [28] obsahovat až 30 různých druhů syntetických gum, 8 druhů přírodních gum a také různé druhy sazí a dalších 40 druhů aditiv. Bylo zkoumáno 7 různých druhů a značek [29]. Podle výsledků se téměř nezměnily výtěžky plynu, oleje a uhlíku co se týká procentuálního zastoupení. Co se ale změnilo, bylo složení oleje a plynu. Detailní analýza ukázala rozdíly ve složení konkrétních aromatických sloučenin.

Při jiném pokusu [30] byly také pyrolyzovány pneumatiky různých druhů, tentokrát ale ve dvoustupňovém reaktoru. V prvním stupni docházelo k samotné pyrolýze a v druhém pak k tzv. post-krakování, tedy k druhotnému štěpení plynů za vysokých teplot. Výsledky ve složení získaných produktů byly malé, ale významné, v závislosti na 6 různých druzích použitých pneumatik.

Přestože pneumatiky mohou být složeny z mnoha různých druhů syntetických i přírodních gum, nejčastěji se používají styren-butadiene, polyisopren a polybutadien. [31], [32]. Pomocí termogravimetrické analýzy byla zkoumána tepelná degradace tří vzorků pneumatik o známém složení a tří hlavních gumových komponentů pneumatik. Podle výsledků probíhalo tepelné rozložení přibližně ve dvou různých oblastech. Guma ze styren-butadienu se rozkládala při vyšších teplotách, zatímco přírodní guma při nižších teplotách. Polybutadienová guma se

rozkládala zejména při vyšších teplotách, ale počáteční dekompozice proběhla už při teplotách nižších. Při dalším experimentu [32] byl potvrzen vztah mezi složením gumy a teplotou tepelné degradace. Navíc bylo zjištěno, že hlavním produktem pyrolýzy přírodní gumy je xylene a isopren dimer a pyrolýzy styren-butadienové gumy je zejména etylbenzen, styren a kumen.

3.3 Zhodnocení vlivu parametrů na složení produktů

Ze zmiňovaných parametrů můžeme říci, že při vyhodnocení vlivu různých faktorů na složení produktů pyrolýzy, mají daleko větší význam faktory jako jsou teplota reakce, rychlost ohřevu a použitý typ reaktoru než rozdíly ve složení jednotlivých pneumatik.

3.4 Složení produktů

Prvním z produktů pyrolýzy je pyrolýzní olej. Jedná se asi o nejperspektivnější produkt, protože je celkem velká snaha ho využívat např. jako palivo do spalovacích motorů, případně ho v určitém poměru přimíchávat do klasických paliv. Nevýhodou, stejně jako u dalších produktů, je fakt, že pro tyto účely je nutné ho upravit, protože nemá zcela vyhovující vlastnosti. Jedná se zejména o procesy čištění.

3.4.1 Složení pyrolýzního oleje

Pyrolýzní olej je tmavě hnědá kapalina střední viskozity s aromaticky sírovým zápachem. Chemicky je velmi komplexní a obsahuje více jak 100 různých složek [8].

Jednotlivé složky můžou být rozděleny do několika hlavních frakcí. Těmi jsou alifatické, aromatické, heterocyklické a polární.

Aromatické a alifatické složky

Hlavními aromatickými složkami jsou benzen, toluen, xylene (dimethylbenzeny), styren, limonen a inden. Olej také obsahuje polycyklické aromatické uhlovodíky od dvou-cyklického naftalenu po pěti-cyklické benzopyreny. Hlavními alifatickými složkami jsou alkany, s rovnými uhlovodíkovými řetězci od C_6 – C_{37} .

Polycyklické aromatické uhlovodíky

Obsah polycyklických aromatických uhlovodíků je velmi rozsáhlý, ale hlavními jsou alkalytické naftaleny, fluoreny a fenanthreny. Na jejich větší koncentraci má vliv zejména vyšší teplota a delší čas zdržení.

Tabulka 1: Složení oleje vzniklého pyrolýzou odpadních pneumatik [8]

Alifatické sloučeniny	Aromatické sloučeniny s jedním cyklem	Polyaromatické uhlovodíky	Ostatní
<i>Alkany</i> <i>C₁₀-C₃₅</i> <i>Alkeny</i> Hexen Hepten Okten Nonen	Toluen Ethylbenzen Styren Xylen (1,2-idmethylbenzen) Xylen (1,3-idmethylbenzen) Xylen (1,2-idmethylbenzen) Ethyltoluen Ethylbenzen Methylstyren Inden Butylbenzen Dimethylpropylbenzen Dimethylbenzen Methylinden Terfenyl	Naftalen Methylnaftalen Bifenyl Ethylnaftalen Dimethylbifenyl Dimethylnaftalen Fluoren Fenanthren Anthracen Dimethylfluoren Methylfenantrhen Fluoranthren Pyren Benzo[a]pyren Benzo[e]pyren Benz[a]anthracen	<i>Uhlovodíky</i> Limonen Pinen Cyklopenten Cykloxexen Fenol Methylfenol Dimethylfenol Isopropylfenol Methylbenzaldehyd <i>Sloučeniny síry</i> Thiofen Benzothiofen Methylbenzothiofen Dimethylbenzothiofen Dibenzothiofen Naftothiofen <i>Sloučeniny dusíku</i> Nilin Benzothiazol Benzonitril Difenylamin Chinolin Heptadekannitril <i>PCDD/PCDF</i> Hexachlordibenzofuran Heptachlordibenzofuran Oktachlordibenzodioxin

3.4.2 Vlastnosti paliva vzniklého pyrolýzou odpadních pneumatik

Následující tabulky ukazují vlastnosti paliva z odpadních pneumatik z několika pokusů a pro srovnání vlastnosti klasického paliva z ropy.

Tabulka 2: Palivové vlastnosti pyrolýzního oleje z pyrolýzy pneumatik [8]

Vlastnost				
Bod vzplanutí (°C)	20	17,0	65	43
Residua uhlíku (hm.%)	2,2	1,78	-	-
Hustota (kg/l)	0,91	0,962	0,833	0,924
Viskozita cSt (40 °C)	6,30	-	-	3,77
Viskozita cSt (50 °C)	-	2,44	1,01	0,924
Viskozita cSt (60 °C)	2,38	-	-	-
<i>Obsah látek v hm.%</i>				
Uhlík	88,0	84,26	79,61	-
Vodík	9,4	10,39	10,04	-

Dusík	0,45	0,42	0,94	-
Síra	1,5	1,54	0,11	0,72
Kyslík	0,5	3,39	9,3	-
Počáteční bod varu (°C)	100	-	38,5	70
10 % bod varu (°C)	140	-	58,2	114,5
50 % bod varu (°C)	264	-	174,8	296,1
90 % bod varu (°C)	355	-	-	386,4
Výhřevnost (MJ/kg)	42,0	41,7	-	38
Obsah popela (hm. %)	0,002	Tr	42,66	0,31
Obsah vlhkosti (obj. %)	4,6	0,88	-	-

Tabulka 3: Palivové vlastnosti paliv vyrobených z ropy [8]

Vlastnost	Kerosin	Gas oil	Lehký topný olej
bod vzplanutí (°C)	40	75	79
Hustota (kg/m ³)	0,84	0,78	0,89
Viskozita (cSt při 40 °C)	1,2	3,3	21
Uhlík	-	87,1	85,5
Vodík	13,6	12,8	12,4
Dusík	-	0,05	0,15
Síra	0,1	0,9	1,4
Počáteční bod varu (°C)	140	180	200
50 % bod varu (°C)	200	300	347
90 % bod varu (°C)	315	-	-
Výhřevnost (MJ/kg)	46,6	46	44,8
Obsah popela (hm.%)	-	0,01	0,02
Vlhkost (obj. %)	-	0,05	0,1

Jedním z problémů je zejména zvýšený obsah síry a jejích sloučenin, což je zapříčiněno složením samotných pneumatik. Vliv na složení síry má například teplota, při které reakce probíhá. Bylo zjištěno [9], že při zvýšení teploty se sníží obsah síry v produktu.

Vlastnosti paliva určují, jak se bude chovat při potenciálním spalování v motoru, skladování, přepravě, ale také jaké bude mít emise atd. Teplota vzplanutí značí teplotu, kdy se produkují hořlavé plyny, které vzplanou a od ní se pak odvíjí nebezpečí spojená se skladováním, převozem a použitím obecně. Je vidět, že teplota vzplanutí je u paliv vyrobených pyrolýzou pneumatik nižší než u klasických paliv vyrobených z ropy, což je způsobeno tím, že tento olej není rafinovaný a je složen z různých složek s odlišnými teplotami vzplanutí. Test na zbytkový uhlík se dělá z důvodu, abychom věděli, jestli se při špatných podmínkách hoření bude tvořit uhlík, který by potom mohl zanášet motor. To je dalším problémem, protože obsah zbytkového uhlíku je u paliv vyrobených pyrolýzou pneumatik celkem vysoký. Viskozita potom ovlivní průtok paliva trubkami, válci, čerpadly a také jeho schopnost atomizace v rozprašovačích.

Dalším parametrem popisujícím vlastnosti pyrolýzního oleje je koeficient rychlosti hoření. Při spalování paliva v motorech, pecích atd. většinou dochází vstřikováním velmi úzkými otvory pod velkým tlakem za vzniku velmi malých kapiček. Tento parametr se zjišťuje spalováním jediné kapky paliva rozdílných průměrů. Tento koeficient je podle různých zdrojů podobný konvenčním palivům [10].

3.4.3 Spalování pyrolýzního oleje

Byly provedeny pokusy na spalování pyrolýzního oleje smíchaného s dieselovým palivem. Spalování samotného pyrolýzního oleje bohužel není možné, protože motor není schopen spolehlivě pracovat.

Podle [33], [34], [35], [36], kteří zkoumali směsi pyrolýzního oleje s naftou, se celková účinnost motoru mění jen marginálně, pro hodnoty 10 %, 30 %, 50 % pyrolýzního oleje ve směsi. Nedocházelo prý ani k ucpávání trysek. Docházelo však ke zvyšování emisí, a to celkem znatelně. Pro směsi s obsahem 30 % a 50 % pyrolýzního oleje došlo ke zvýšení o 15 %, respektive 21 % uhlovodíkových emisí a také ke zvýšení o 4,5 % a 10 % u emisí NO_x. Pro vyšší poměry pyrolýzního oleje ve směsi byl již použit vyčištěný pyrolýzní olej. Po úpravě pyrolýzního oleje mohl motor fungovat až do 90 % obsahu pyrolýzního oleje ve směsi.

3.4.4 Úpravy produktů

Hlavní cílem při čištění pyrolýzního oleje je desulfurizace paliva, protože její hmotnostní podíl může dosahovat až 1,5 %. Jednou z možností je tzv. hydrodesulfurizace katalyzovaná pomocí molybdenových, nikl-molybdenových nebo kobalt-molybdenových katalyzátorů. Tato problematika se řeší např. v [37]. Maximální účinnost odloučení síry byla dosažena 87,8 % při 250 °C po dobu 30 min za použití 2 hm.% NiMo/γ-Al₂O₃ katalyzátoru (vztaženo k pyrolýznímu oleji) při iniciačním tlaku 20 bar.

3.4.5 Složení a vlastnosti pevného zbytku (pyrolýzního uhlí)

Hmotnostní zlomek uhlí se pohybuje většinou v rozmezí od 22 do 49 hm.% s typickými hodnotami 38–40 hm.%. Co se týká složení, hlavní zastoupení má uhlík, až 90 hm.%, a poměrně velkých hodnot dosahuje i síra, 1,9–2,7 hm.%. Další významnou složkou pevného zbytku je také popel, 8,27–15,33 hm.%, který má složení odpovídající kovovým aditivům v pneumatikách, jako např. zinek nebo nečistoty, které se dostaly do odpadních pneumatik. Dále bylo zjištěno, že plocha pevného zbytku se pohybuje mezi 64,5 – 83,8 m²/g, v závislosti na značce pneumatiky a materiálu, ze kterého je pneumatika vyrobená [8].

Tabulka 4: Vlastnosti pyrolýzního uhlí [8], (Tr = stopové množství)

Vlastnost					
Reaktor	Pevné lože	Drop tube	S rotační pecí	S rotační pecí	Kuželovité lože
Pyrolýzní teplota (°C)	500	450	500	550	500
Pneumatika	3 kg dávka	30 g/h	12-15 kg/h	4,8 kg/h	-
<i>Přibližná analýza (hm. %)</i>					
Vlhkost	0,4	0,37	2,35	3,57	-
Těkavé látky	2,8	7,78	16,14	12,78	-
Popel	11,3	8,27	12,32	15,33	-
<i>Konečná analýza (hm.% suché bez popela)</i>					
Uhlík	90,6	88,19	82,17	85,31	80,3
Vodík	0,9	0,6	2,28	1,77	1,3
Dusík	0,7	0,1	0,61	0,34	0,3
Síra	2,3	1,9	2,32	2,13	2,7
Chlorin	0,08	-	-	-	-
Výhřevnost (MJ/kg)	30,5	30,8	31,5	30,7	29,3
Povrch (m ² /g)	64	93	-	-	83
<i>Kovy (hm. %)</i>					
Zn	4,1	6,68	-	4,06	3,8
Ca	1,2	0,13	-	-	-
Fe	0,2	0,04	-	0,54	-
Al	0,15	-	-	1,09	-
Si	0,42	1,69	-	-	-
Pb	-	0,01	-	Tr	-

Vliv jednotlivých procesních parametrů na složení pevného zbytku je následující. Se zvyšující se teplotou reakce se snižuje obsah těkavých látek a obsah vodíku v pyrolýzním pevném zbytku, zároveň se ale trochu zvyšuje velikost povrchu a objem pórů. To je zapříčiněno úbytkem těžkých pevných uhlovodíků se zvyšující se teplotou, jehož výsledkem je rozšíření pórů a následně zvětšení plochy povrchu. Na složení zbytkových kovů a síry má zvyšování teploty jen nepatrný vliv [8].

3.4.6 Využití pevného uhlíkatého zbytku jako sazí

Jedno z hlavních využití pyrolýzního pevného zbytku je možnost využití jako saze nebo jako aktivní uhlí. Jedna ze surovin používaných k výrobě pneumatik jsou saze, které jsou ve výsledku hlavním zdrojem sazí i v pyrolýzním pevném zbytku. Kvalita takovýchto produktů musí být ale opět dosažena čištěním. Oproti komerčním produktům obsahuje pyrolýzní pevný zbytek více popela a dosahuje menších hodnot velikosti povrchu.

3.4.7 Složení pyrolýzního plynu z pyrolýzy pneumatik

Hlavními prvky zastoupenými v pyrolýzním plynu jsou vodík, metan, etan, ethen, propan, propen, butan, buten, butadien, oxid uhličitý, oxid uhelnatý a sulfan. Složení plynu je závislé na složení jednotlivých gum, ze kterých jsou pneumatiky složeny. Proces termální degradace způsobuje vznik vysoce reaktivních volných radikálů, které jsou odvozeny z materiálu pneumatik [8].

Tabulka 5: Složení plynu z pyrolýzy odpadních pneumatik [8], (Tr = stopové množství)

Reaktor	(°C)	Složení v hm.% vztažené k váze celé pneumatiky											
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₄ H ₆	CO ₂	CO	H ₂ S
Fluidní lože	450	0,06	0,29	0,17	0,24	0,16	0,04	Tr	0,08	1,26	Tr	Tr	-
Fluidní lože	600	0,24	2,39	0,74	3,84	0,40	1,92	Tr	0,26	2,60	Tr	Tr	-
Fluidní lože	598	0,59	2,9	1,2	1,6	0,76	2,2	0,41	5,75	0,74	1,8	1,6	0,38
Fluidní lože	650	0,72	4,0	1,4	2,5	0,69	3,0	0,37	5,87	1,11	2,1	1,4	0,5
Fluidní lože	700	1,1	6,9	1,8	4,0	0,63	4,4	0,31	6,76	1,7	2,5	2,1	0,6
Pevné lože	500	0,2	0,8	0,3	1,2	0,3	0,5	0,2	0,3	1,9	0,3	0,1	-
Drop tube reaktor	450	0,05	0,65	0,24	0,59	0,09	0,22	0,01	0,02	0,01	3,37	-	-
Drop tube Reaktor	750	0,35	4,62	1,11	2,42	0,14	1,11	0,03	0,01	0,18	4,11	0,60	-
Drop tube Reaktor	1000	1,00	7,89	0,10	0,71	Tr	0,03	-	-	0,01	1,81	1,32	-
Rotační pec	600	1,4	1,11	0,67	0,067	-	-	-	-	-	0,70	0,31	0,21
Šnekový reaktor	600	0,7	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4
Šnekový reaktor	800	1,8	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8

Při samotném procesu pyrolýzy nejprve vznikají ve velké koncentraci alkeny a dieny, zejména butadiene. Tyto složky pak dále reagují v sekundárních reakcích v tzv. horké zóně reaktoru, což vede ke vzniku lehkých uhlovodíků z olejových par. Takto vzniklý plyn má poměrně vysokou

výhřevnost, mezi 20 a 65 MJ/m³. To je důvod, proč je dost vhodný k tomu, aby se využíval jako palivo k výrobě tepla potřebného k reakci samotné pyrolýzy. Jako se všemi produkty je opět problém s čištěním plynu. Jednak proto, aby bylo možné ho bezproblémově spalovat a jednak proto, aby při jeho spalování vznikalo co nejméně škodlivých emisí. Nicméně hlavní myšlenka je ta, že spalování těchto nízkomolekulárních plynů vzniklých pyrolýzou je čistší než spalování pyrolýzou zpracovávaných materiálů.

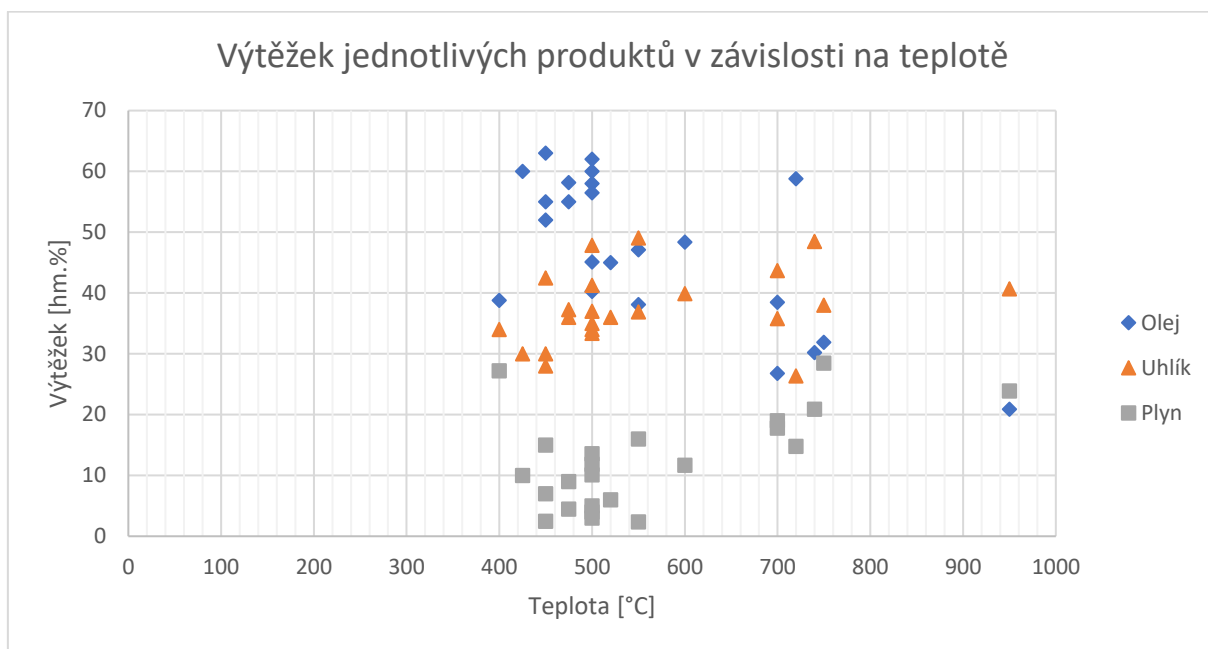
Vliv teploty je obecně takový, že při zvyšování teploty se zvyšuje výtěžek pyrolýzního plynu z důvodu tepelného štěpení molekul olejových par.

3.4.8 Shrnutí k pyrolýzním produktům

Získání dříve zmiňovaných produktů je ovšem pouze prvním krokem. Ve většině případů, a v provozních měřítcích zejména, je nutné tyto produkty ještě následně upravit. Mezi tyto další procesy patří např. selektivizace pyrolýzní teploty, selektivní po-pyrolýzní kondenzace, destilace pyrolýzního oleje, použití katalyzátorů pro získání žádaných vlastností produktů nebo úprava pevného zbytku, aby se dal použít jako saze nebo aktivní uhlí.

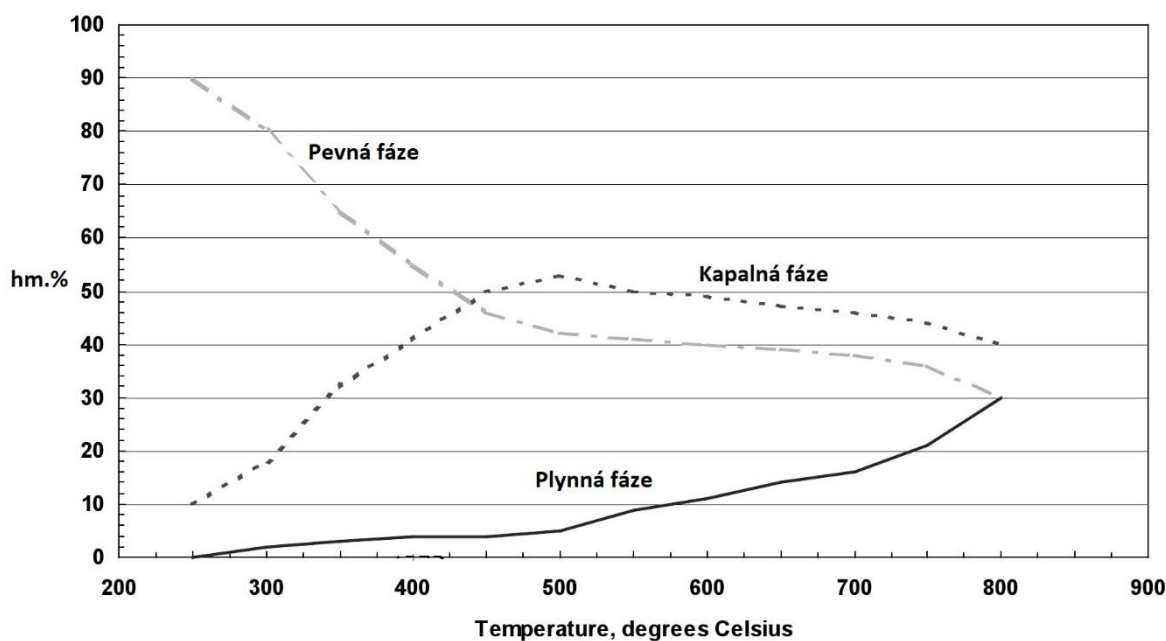
Nabízejí se nicméně ještě další možnosti, jak se dají využít pyrolýzní produkty. Pokud se zaměříme například na pyrolýzní olej, tak bylo ukázáno, že obsahuje poměrně velké množství chemikálií. Mezi ty s významnější koncentrací, které se používají v chemickém průmyslu, můžeme zařadit benzen, toluen, xyleny, styren a limonen. V závislosti na procesních podmínkách je pak dosaženo různých koncentrací. Potom už jen záleží na nastavení procesních parametrů a způsobu zpracování produktu.

3.4.9 Porovnání výsledků, grafy



Obrázek 4: Porovnání výtěžnosti produktů laboratorních experimentů

Na obrázku 4 je vidět porovnání výtěžnosti jednotlivých produktů pyrolýzy v závislosti na teplotě. Data vycházejí z tabulky 6, která ukazuje výsledky různých laboratorních experimentů. Je vidět, že nejvyšší jsou výtěžky pyrolýzního oleje, které se pohybují mezi 20 % až téměř 65 %. Pyrolýzní



Obrázek 5: Výtěžnost produktů v závislosti na teplotě

uhlík je většinou v rozmezí mezi 25 % a 50 %. Nejméně je pak v průměru pyrolýzního plynu, který dosahuje hodnot 3 % až téměř 30 %.

Je také vidět částečně závislost množství produktů na teplotě. Na obr.5 je pak znázorněna právě tato závislost.

Tabulka 6: Přehled laboratorních pokusů [8]

Reaktor	Experimentální podmínky	Maximální výtěžek oleje			
		Teplota	Olej	Uhlík	Plyn
S pevným ložem	400–700 °C	500	40,26	47,88	11,86
S pevným ložem	500-1000 °C; rychlost ohřevu 1200 °C min ⁻¹	500	58,0	37,0	5,0
S pevným ložem	350–450 °C; rychlost ohřevu 30 °C min ⁻¹ ; 20 g pneumatik	450	63	30	7
S pevným ložem	300–720 °C; rychlost ohřevu 5–80 °C min ⁻¹ ; 50 g pneumatik	720	58,8	26,4	14,8
S pevným ložem	450–600 °C; rychlost ohřevu 5 °C min ⁻¹ ; 3 kg pneumatik	475	58,2	37,3	4,5
S pevným ložem	950 °C; rychlost ohřevu 2 °C min ⁻¹ ; 1 t pneumatik	950	20,9	40,7	23,9
S pevným ložem	350-600 °C; rychlost ohřevu 2 °C min ⁻¹ a 35 °C min ⁻¹	400	38,8	34,0	27,2
S pevným ložem	300–700 °C; rychlost ohřevu 15 °C min ⁻¹ ; 175 g pneumatik	700	38,5	43,7	17,8
S pevným ložem	375–500 °C; rychlost ohřevu 10 °C min ⁻¹ ; 10 g pneumatik	425	60	30	10
S pevným ložem, vnitřní ohřev	375–575 °C; 750 g pneumatik	475	55	36	9
Šnekový reaktor	600–800 °C; hmotnostní průtok vsádky 3,5 – 8 kg/h	600	48,4	39,9	11,7
Rotační pec	550–680 °C; hmotnostní průtok vsádky 3,5 – 8 kg/h	550	38,12	49,09	2,39
Vakuové kónické lože	425 °C a 500 °C Teplota; 25 a 50 kPa vakuum	500	60	34	4
Rotační pec	450–650 °C; hmotnostní průtok vsádky 12–15 kg/h	500	45,1	41,3	13,6
Fluidní lože	740 °C; hmotnostní průtok vsádky 1 kg/h; prášek z pneumatik	740	30,2	48,5	20,9
Fluidní lože	750–780 °C; hmotnostní průtok vsádky 30 kg/h; kousky pneumatik	750	31,9	38,0	28,5
Fluidní lože	700 °C; hmotnostní průtok vsádky 200 kg/h; celé pneumatiky	700	26,8	35,8	19

Fluidní lože	450–600 °C; hmotnostní průtok vsádky 220 g/h; granule z pneumatik	450	55,0	42,5	2,5
Cirkulační fluidní lože	360–810 °C; hmotnostní průtok vsádky 5 kg/h	450	52	28	15
Kónické lože	425 a 500 °C	500	62	35	3
Vakuová pyrolýza	485–550 °C; dávka (80–180 kg) a kontinuální provoz	520	45	36	6
Vakuová pyrolýza	500 °C; pilotní zařízení; kontinuální provoz	500	56,5	33,4	10,1
Vakuová pyrolýza	450–600 °C; dávka 100 g	550	47,1	36,9	16

4. Rešerše průmyslových a komerčních zařízení

Při rešerši pyrolytických jednotek a experimentů v laboratorním měřítku se může zdát, že ke komerčnímu a plně provoznímu měřítku je ještě velký kus cesty, zejména z důvodu, že pyrolýzní produkty nedosahují takových kvalit, aby se daly rovnou použít. Vyžadují další zpracování, čímž se zdražuje jejich výroba a klesá konkurenceschopnost na trhu. Nicméně všude po světě je množství firem, které se pyrolytickým zpracováním nejen pneumatik zabývají a nabízejí své produkty. Hlavní reklamou těchto firem je většinou to, že procesy jsou velmi ekologické a mají v podstatě nulové emise, protože nedochází ke spalování odpadů, ale až vyprodukovaných např. plynů. Tato tvrzení jsou minimálně vhodná k debatě, protože na to existují i dost odlišné názory, viz [39]. Následuje přehled konstrukcí reaktorů a poté přehled průmyslových a komerčních procesů.

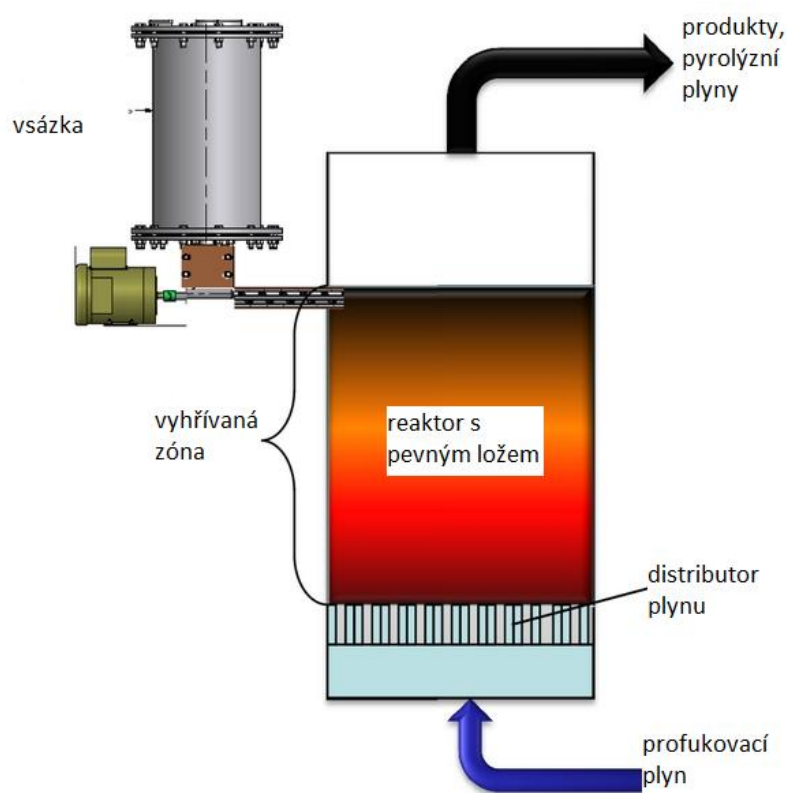
4.1 Konstrukce klíčových strojů a zařízení

Jedním z cílů zadání diplomové práce bylo provedení rešerše konstrukce klíčových strojů a zařízení. V celém procesu pyrolýzy je klíčovým zařízením pyrolýzní reaktor. Ostatní zařízení jako jsou výměník, drtička, cyklón, plynový hořák atp. jsou konvenční zařízení, které se přizpůsobí dané technologii.

Co se týká pyrolýzních reaktorů používaných při zpracování pneumatik, používají se tyto základní typy: s pevným ložem, šnekový, s rotační pecí, vakuový a s fluidním ložem. Nejvíce se nicméně využívají následující tři, vakuový reaktor je pak např. šnekový reaktor, ve kterém je snížený tlak pro dosažení odlišných procesních podmínek.

4.1.1 Reaktor s pevným ložem

Princip a tím pádem konstrukce tohoto reaktoru je nejjednodušší. Pro tento reaktor je charakteristická nižší rychlost ohřevu než u ostatních typů, a proto pokud je vzorek vkládaného materiálu větší, nedochází k rovnoměrnému ohřevu a vkládaná surovina se rozkládá za různých teplot současně. Proces funguje většinou v dávkovacím režimu, nicméně může fungovat i v kontinuálním režimu. Jedná se většinou o reaktor válcového tvaru, do kterého se vsadí dané množství, které se po danou dobu pyrolyzuje. Po skončení procesu je z reaktoru odstraněn pevný zbytek a začíná se na novo. Ohřev může probíhat profukováním horkého inertního plynu, nebo např. elektricky nebo spaliny. Ukázka je na následujícím obrázku.



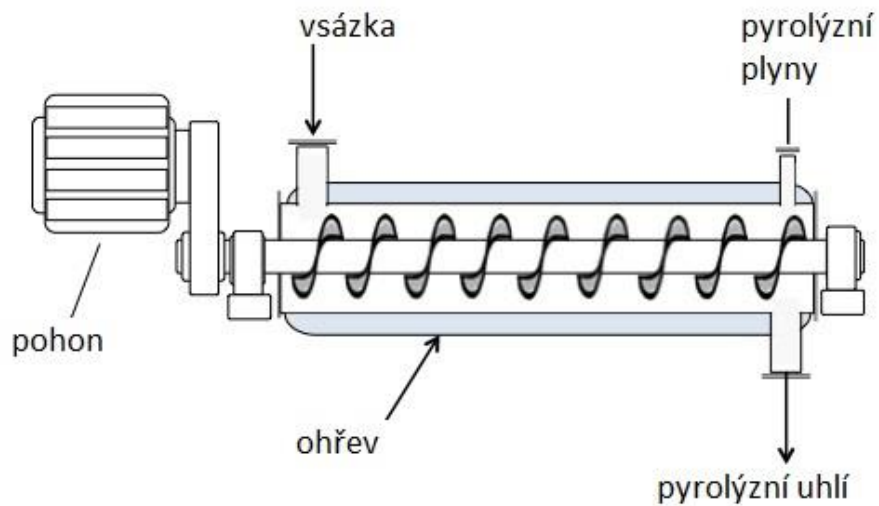
Obrázek 6: Schéma reaktoru s pevným ložem [40]



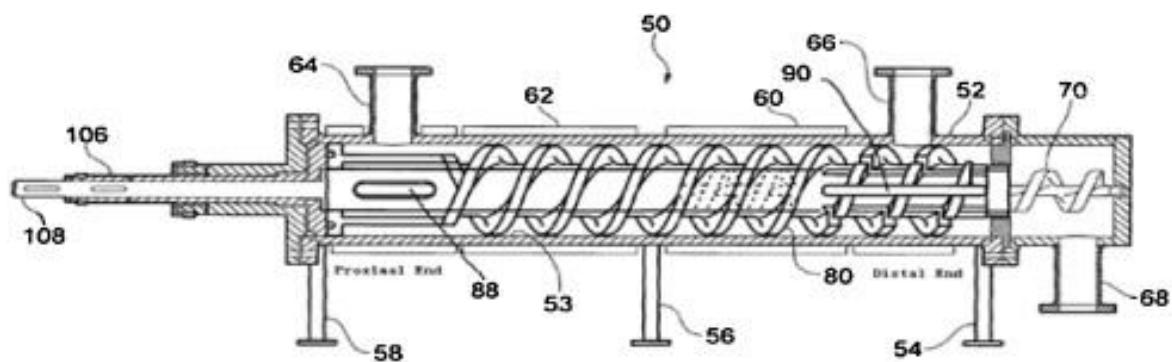
Obrázek 7: Příklad reaktoru s pevným ložem v průmyslu [53]

4.1.2 Šnekový reaktor

Základní výhodou tohoto typu reaktoru je, že je zařízený na kontinuální proces. Skládá se z jednoho nebo více šnekových šroubů. Délka zdržení materiálu v reaktoru je závislá na délce šneku a rychlosti otáčení, a díky tomu je i jednoduše regulovatelná. Velikost šnekového reaktoru ale nemůže být libovolná, protože se zvyšující se velikostí reaktoru se výrazně snižuje poměr plochy povrchu šroubu k objemu vsázky. Může být využit jak v horizontální, tak ve svislé poloze. Do reaktoru na jedné straně vchází vsázka většinou pomocí dávkovače, během průchodu reaktorem je vsázka ohřívána a na konci dole odchází pyrolýzní uhlí a nahoře pyrolýzní plyny. Ohřev může být opět např. elektricky, ale spíše se používá dvouplášťové konstrukce a ohřevu přímo plamenem nebo spalinami.



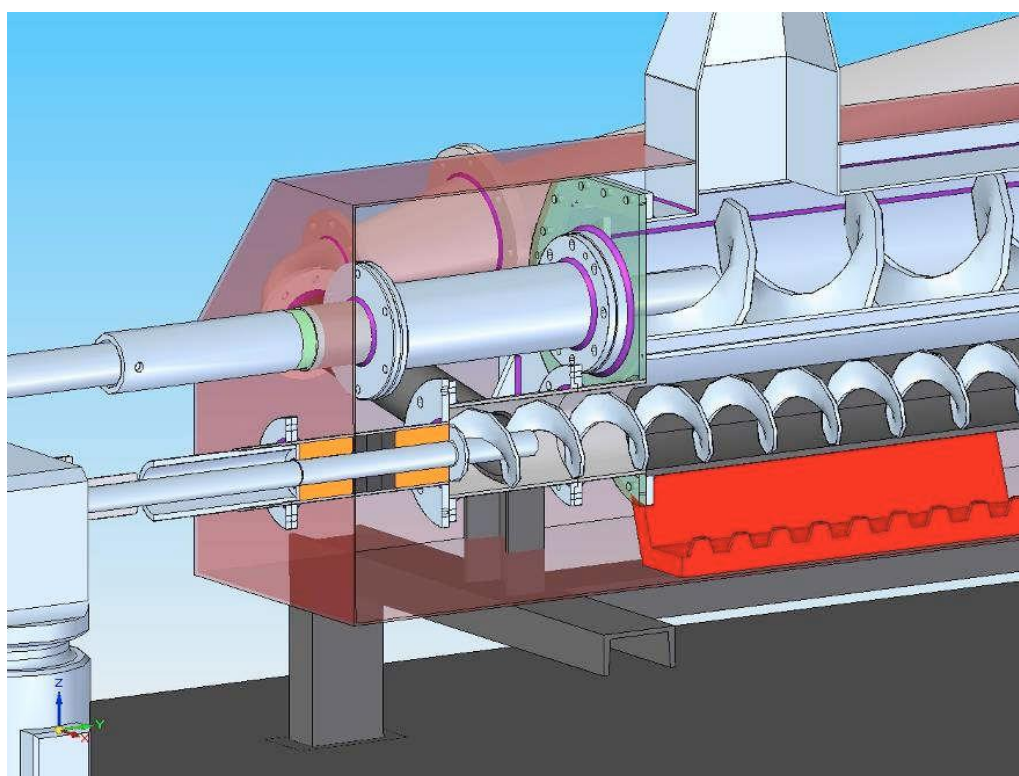
Obrázek 8: Schéma šnekového reaktoru [41]



Obrázek 9 [59]: Příklad šnekového reaktoru: 106 vnější šneková hřídel, 108 vnitřní šneková hřídel, 64 Vstup vsázky, 62,60,52,50 elektrické topné pásy, 58,56,54, podpěry, 88, 90 vnější šnek, 70 vnitřní šnek, 68 výstup pevné fáze, 66 výstup plynné fáze



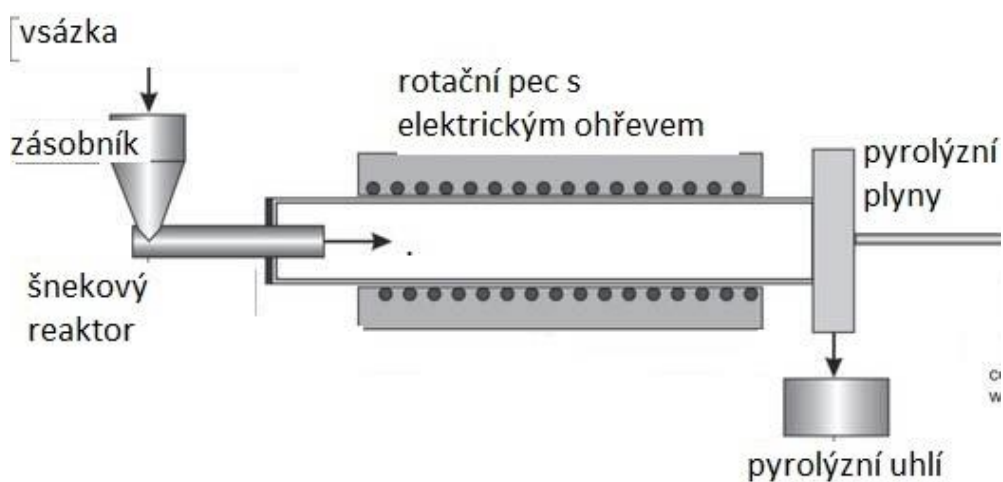
Obrázek 10: Ukázka šnekového reaktoru [60]



Obrázek 11: Řez šnekovým reaktorem s více šneky [60]

4.1.3 Reaktor s rotační pecí

Jedná se o reaktor, který se v průmyslovém měřítku používá poměrně ve velkém množství. Většinou se jedná o velký válec o průměru i několik metrů, do kterého se vsadí celé nezpracované pneumatiky. Dosahuje hodnot rychlosti ohřevu okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ a čas zdržení v peci je okolo jedné hodiny. Válec rotační pece se pak uzavře, vzduch se vyžene inertním plynem, aby nedocházelo ke spalování a začne se vyhřívat. K ohřevu může opět docházet několika způsoby (elektricky, ohřevem plamenem, spalinami...). Dalším způsobem je pak kontinuální způsob, kdy je do pece vsázka posunována např. šnekovým dopravníkem. Dosažení kontinuálního procesu lze i použitím více rotačních pecí, kdy vždy alespoň v jedné probíhá pyrolýza a v dalších probíhá proces čištění nebo vkládání vsázky.



Obrázek 12: Reaktor s rotační pecí [42]



Obrázek 13: Ukázka průmyslového reaktoru s rotační pecí [61]

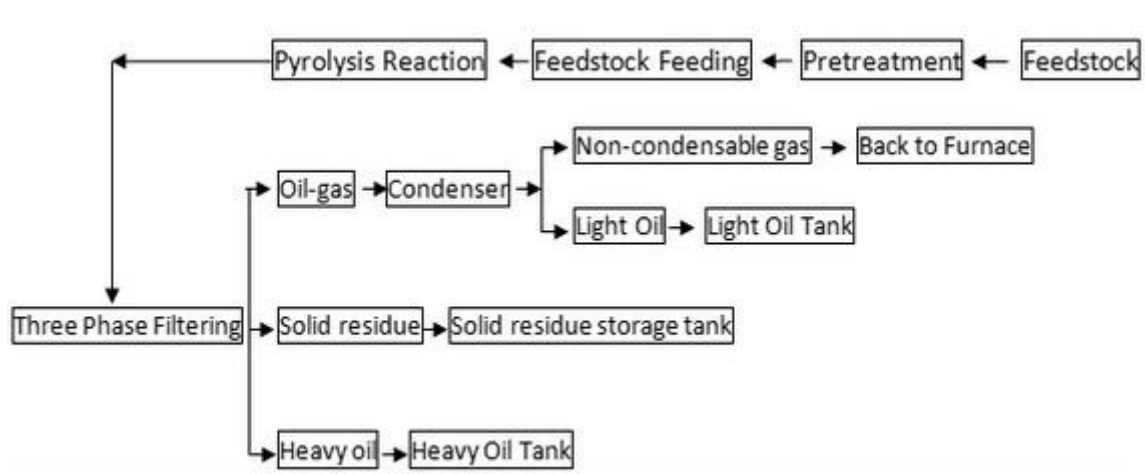
Tabulka 7: Porovnání jednotlivých typů reaktorů

Typ reaktoru	Způsob ohřevu	Výhody	Nevýhody
Reaktor s pevným ložem	ohřátou stěnou	jednoduché zařízení	špatný přestup tepla nízká rychlost ohřevu dávkový proces
Šnekový reaktor	ohřátou stěnou případně i šnekem	kompaktní kontinuální proces nižší teplota procesu (cca 500 °C)	pohyblivé části v horké zóně možnost problému s přenosem ve velkém měřítku
Reaktor s rotační pecí	ohřátou stěnou	zpracování i celých pneumatik dobré promíchávání materiálu a lepší přestup tepla	větší doba zdržení většinou dávkový proces

4.2 Plastic Advanced Recycling Corporation (P.A.R.C)

Společnost z USA, Illinois, založena roku 1996 [43]. Postupně vyvinuli z dávkového systému plně automatizovanou kontinuální jednotku na zpracování odpadních plastů i pneumatik. V roce 2013 měli dvě funkční zařízení v Číně. Jedna jednotka zpracuje 50 tun odpadních pneumatik za den, 18 000 tun ročně. 35–40 hm.% je olej s přibližnou hodnotou 9500-10500 kcal/kg. 35-40 hm.% je pevný zbytek. 10-15 hm.% je recyklovaný ocelový drát. 6-7 hm.% je plyn a 1-2 hm.% je zbytková voda. Životnost je okolo 10 let.

Proces funguje následujícím způsobem. Pneumatiky projdou předúpravou. Jsou zbaveny oceli a jsou nadrceny. Poté jsou dopravníkem přemístěny do plničky. Pomocí dávkovacího systému jsou dávkovány spolu s katalyzátorem. V rotačním reaktoru dojde k rozdělení na plyny a pevný zbytek. Plyn se zkondenzuje a nezkondenzovatelné plyny se využijí při spalování na výrobu potřebného tepla. Z oleje se oddělí voda a je pomocí katalyzátoru upravena jeho stabilita. Může být i dále rafinován.



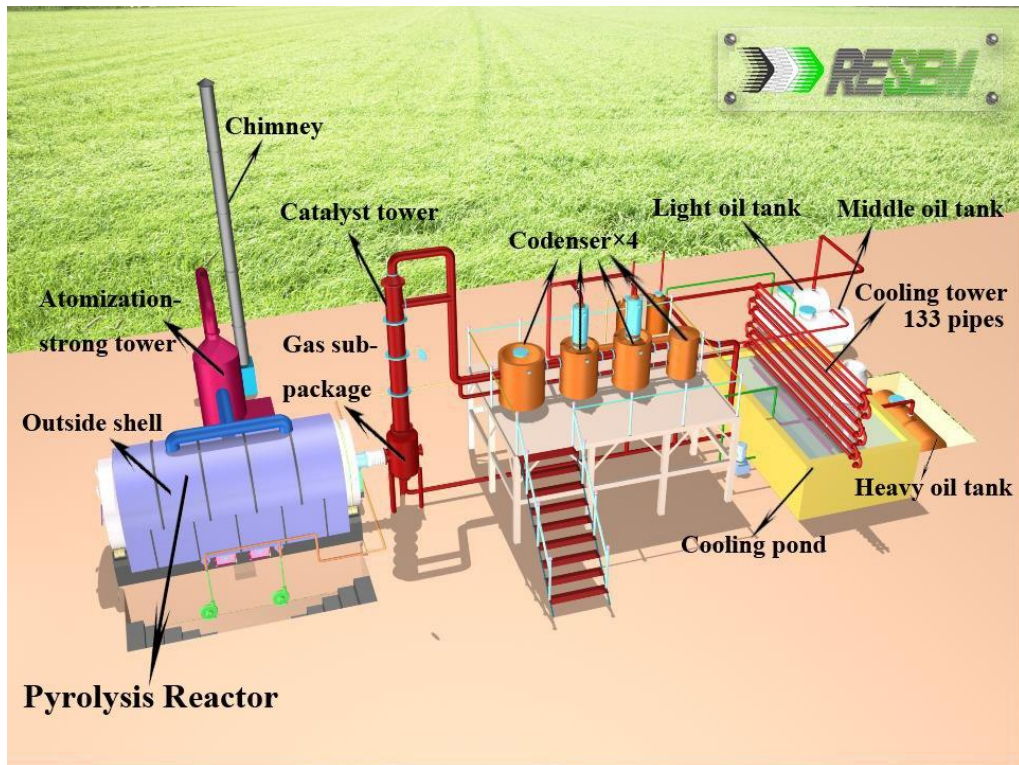
Obrázek 14: Procesní diagram [43]

4.3 Rezem

(Sino-American) Shangqiu Ruixin Environmental Specialty Equipment Manufacturing Co., Ltd. Společnost zabývající se pyrolýzou plastů a pneumatik. V Číně mají tři výrobní továrny. Nabízejí pyrolýzní jednotky s procesní kapacitou od 0,5 tuny do 20 tun zpracovaných pneumatik za den.

Proces

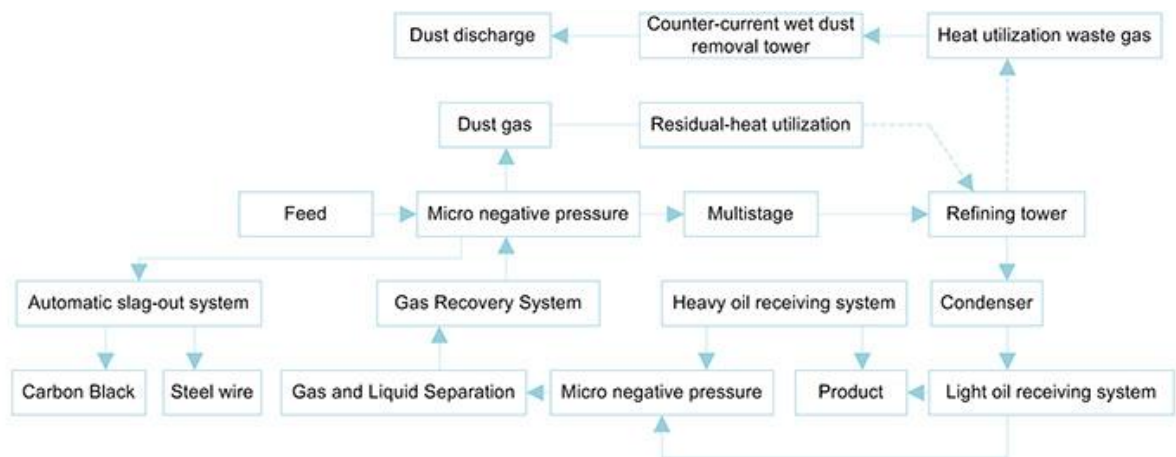
Pro příklad je uvedena jednotka se zpracováním 10 tun pneumatik za den. Pneumatiky jsou zpracovávány celé v horizontálním rotačním reaktoru. Olej se odebírá a nezkondenzovatelné plyny se používají jako palivo. Po zpracování jedné dávky se reaktor ochladí a zpracuje se pevný zbytek spolu s ocelovými kusy. Poté je reaktor vyčištěn a proces začíná znovu. Na svých stránkách má firma poměrně detailně popsány i vlastnosti jednotlivých produktů i ekonomické údaje [44].



Obrázek 15: Schéma procesu RESEM [44]

4.4 Sunny group

Další čínská firma zabývající se pyrolýzou v rotačním reaktoru. Výtěžkem je 45 hm.% oleje, 12–15 hm.% ocelového zbytku a 5–8 hm.% plynu [45].



Obrázek 16: Schéma procesu Sunny Group [45]

Tabulka 8: Nabízené produkty [45]

Model	Rozměr reaktoru	Struktura	Kapacita	Rychlost otáčení	Výkon
TF - 5	1,5 x 6,6 m	Horizontální	5 tun/den	0,4 ot./min	16 kW
TF - 8	2,0 x 6,6 m	Horizontální	8 tun/den	0,4 ot./min	18 kW
TF - 10	2,5 x 6,6 m	Horizontální	10 tun/den	0,4 ot./min	20 kW

4.5 FAB-INDIA Industries

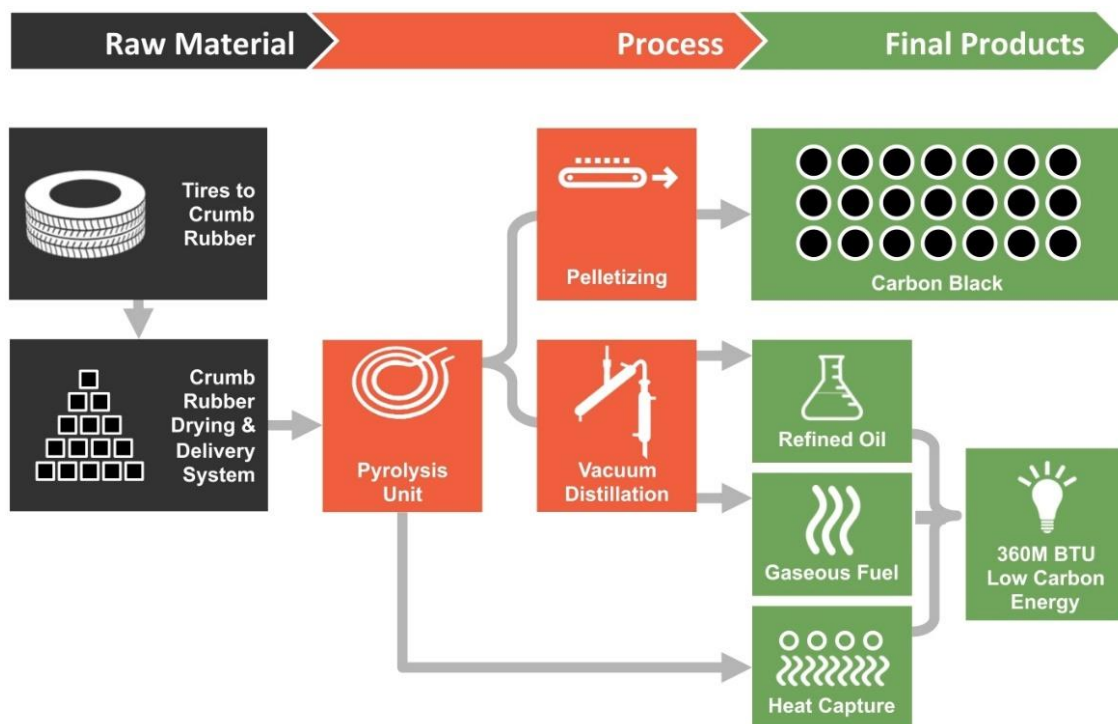
Indická společnost založená v roce 1991. Zabývá se mimo jiné pyrolýzou odpadních pneumatik. Její jednotka na pyrolýzní zpracování plastů používá reaktor s rotační pecí s kapacitou 10,5 tuny za den a rotační rychlostí 0,3 ot./min. Výtěžkem je 40–45 hm.% oleje, 30–35 hm.% pevného zbytku a 1– 20 hm.% ocelových zbytků. Velikost reaktoru je 2,8 x 6,6 m a příkon zařízení činí 3 kW. Zajímavý je i údaj o hlučnosti, která prý nepřesahuje 85 dBA [46].

4.6 HUAIN GROUP

Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd je čínská společnost, která se specializuje na zpracování odpadních plastů a pneumatik na palivo a případnou destilaci již od roku 1993. Za dobu svojí existence prodali zařízení do 34 zemí světa. Pyrolýza zde probíhá také v reaktoru s rotační pecí a produkty jsou ze 45 hm.% olej, 30 hm.% je pevný zbytek, 15 hm.% je ocelový zbytek a 10 hm.% zbývá na plyn. Firma vyrábí reaktory o různých průměrech s kapacitou od 6 do 12 t/d [47].

4.7 Reklaim

Reklaim je americká společnost ze Seattlu, specializující se na pyrolýzu odpadních pneumatik. Provozuje jedno zařízení v komerčním měřítku ve státě Oregon. Tato jednotka byla uvedena do provozu v roce 2008 a slouží i jako výzkumné zařízení. Kontinuální provoz začal v roce 2014. Zařízení je schopné zpracovat okolo 2 milionů odpadních pneumatik za rok. Pneumatiky jsou nejdříve zbaveny oceli a poté nadrceny. Před vstupem do reaktoru jsou sušeny ve fluidní sušárně. Samotná pyrolýzní reakce probíhá ve speciálním reaktoru složeného z několika pater, kterými postupně částičky pneumatik procházejí až na posledním patře vyjdou jako uhlíkový zbytek. Údaje o výtěžku produktů bohužel chybí [48].



Obrázek 17: Schéma procesu Reclaim [48]

4.8 Mobius

Mobius je Ukrajinská společnost zabývající se recyklací gumových a plastových odpadů a jejich přeměnou v cenné produkty. Zařízení této společnosti produkuje 40 hm.% pevného zbytku a 40 hm.% oleje. Plynu i ocelových zbytků pak po 10 hm.%. Pneumatiky zpracovávají do konkrétních produktů, jejichž specifikace je možné nalézt na jejich internetových stránkách. Jsou jimi uhlíkový adsorbent, syntetický olej, aditivum do dieselu a „balený šrot“, což jsou briketky ocelového odpadu [49].

4.9 Splainex Ecosystems

Splainex Ecosystems Ltd. pochází ze společnosti Splainex, což byla nizozemská firma založená roku 1994 poblíž Amsterdamu. Jejich hlavním zaměřením je pyrolýzní technologie. Pyrolýzní jednotky od této společnosti jsou mimo jiné v Německu, Spojených státech, Číně, Japonsku aj. Používaná technologie využívá reaktor s rotační pecí [50].

4.10 BESTON

Beston (Henan) Machinery Co., Ltd. Je čínská společnost a zabývá se výrobou pyrolýzních systémů od roku 1998. Jejich produkty můžeme nalézt v zemích jako např. Indie, Malajsie, Filipíny, Indonésie, Thajsko, Polsko, Kanada, Rusko...

Firma nabízí tři druhy jednotek: dávkový, semi-kontinuální a kontinuální. Dávkování nepotřebuje předúpravu. Semi-kontinuální může pracovat 3-4 směny za den a poté se musí reaktor asi 1 hodinu chladit. Kontinuální jednotka může pracovat 24 hodin bez zastávky. Nicméně kontinuální typ potřebuje předúpravu pneumatik. V následující tabulce je detailnější popis jednotlivých zařízení [51].

Tabulka 9: Nabízené produkty [51]

Typ	BLJ-6	BLJ-10	BLL-16	BLL-30,BLL-40,BLL-50
Denní kapacita	6 t	10 t	20 t	30 t,40 t,50 t
Vsádka	Použité pneumatiky, guma, plasty, použitý olej, medicínský odpad			
Druh zpracování	dávkový		Semi-kontinuální	Kontinuální
Pracovní tlak	Konstantní tlak			
Rychlost otáček reaktoru	0.4 ot./min			Není rotačního typu
Celkový výkon	24 kW/h	30 kW/h	54 kW/h	53.6,62,84(kW/h)
Rozměr reaktoru(m)	D2.2xL5.1	D2.8xL6.2	D2.8xL7.1	L12.5xW2.2xH2.5
Objem (LxWxH)	20x10x10 m	25x15x10 m	25x15x10 m	20x15x10m,33x15x10m

4.11 Tyre pyrolysis plant

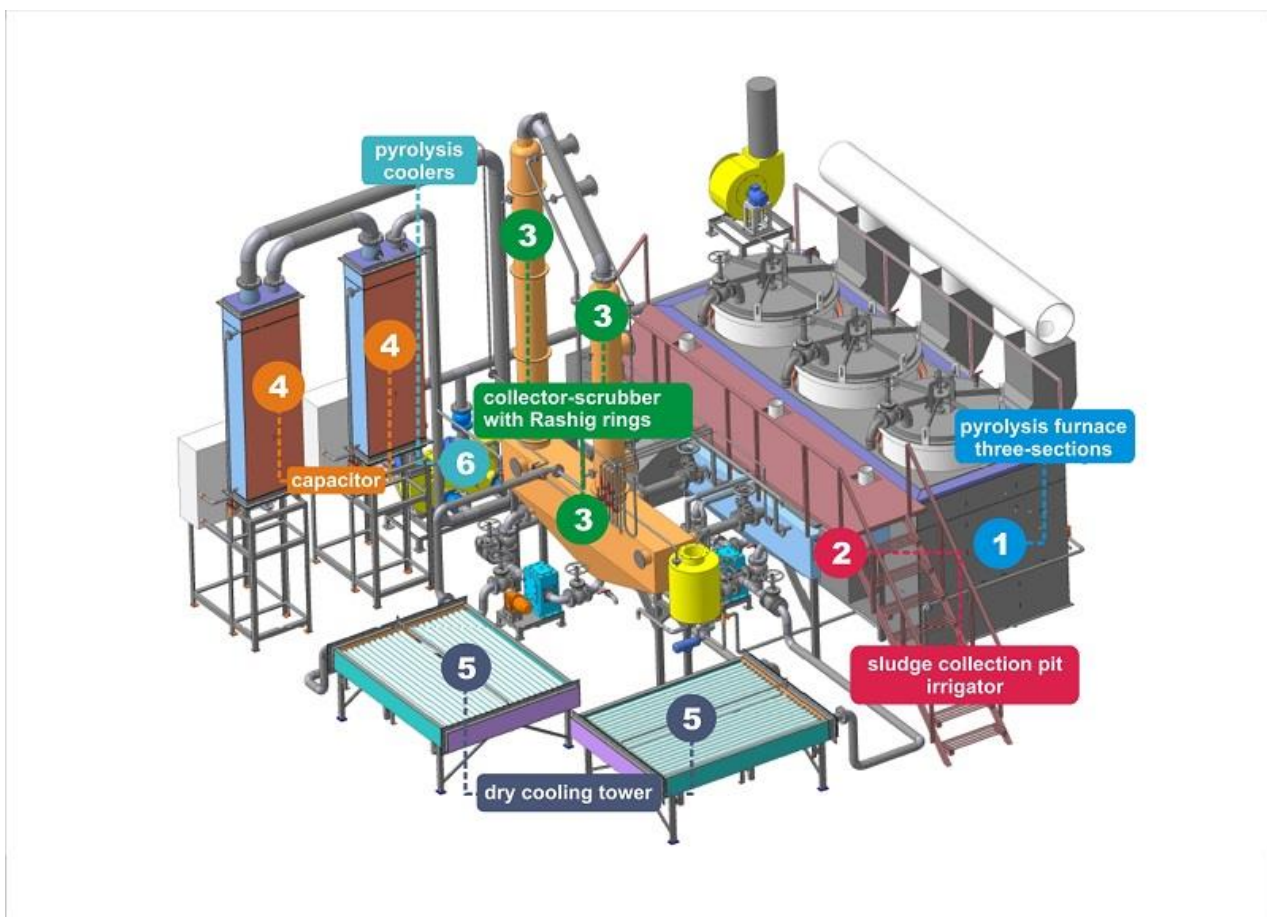
První komerční jednotka byla spuštěna již v roce 1981 a to na zpracování 250 tun za den pro společnost Mitsubishi Materials. Tato technologie umožňuje zpracovávat celé pneumatiky. Výtěžek oleje je mezi 43 a 48 hm.%, pevného zbytku 30–35 hm.%, ocele 10–15 hm.% a plynu okolo 8–13 hm.% [52].

4.12 TK (Technokomplex)

Technokomplex je ruský výrobce a dodavatel pyrolýzních jednotek malého měřítka. Tyto jednotky nazývá Pirotext. Jednotka může pracovat samostatně nebo může být součástí linky na zpracování odpadů. Na stránkách výrobce je celkem detailní popis celého procesu [53].

Plyn vzniklý zahřátím pneumatik na 260–560 °C jde potrubím do pračky, kde vlivem chladícího činidla částečně zkondenzuje a zchladí se. Potom prochází venturiho trubicí, se kterou je spojen protiproudým náplňovým adsorbérem. Olejové složky se úplně zchladí a zkondenzují na syntetické palivo. Dále je použit odstředivý separátor k dehydrataci plynu. Plyn se pak využije k zajištění výroby tepla pro celý proces. Pyrolýzní plyny jsou odsávány z reakční zóny pomocí ventilátoru. Pokud jsou odebírány dostatečně rychle, je dosaženo maximálního výtěžku kapalné složky, protože nedojde k sekundárnímu štěpení na nezkondenzovatelné složky. Může to být až 60 obj.% [53].

Jednotka pracuje v dávkovém režimu a zpracování jedné dávky zabere zhruba 5–6 hodin. V této dávce se zpracuje 0,3–1,5 tuny materiálu. Technologie využívá v reakci katalyzátor a k zefektivnění procesu se také využívá přehřev pneumatik.



Obrázek 18: Schéma procesu TK [53]

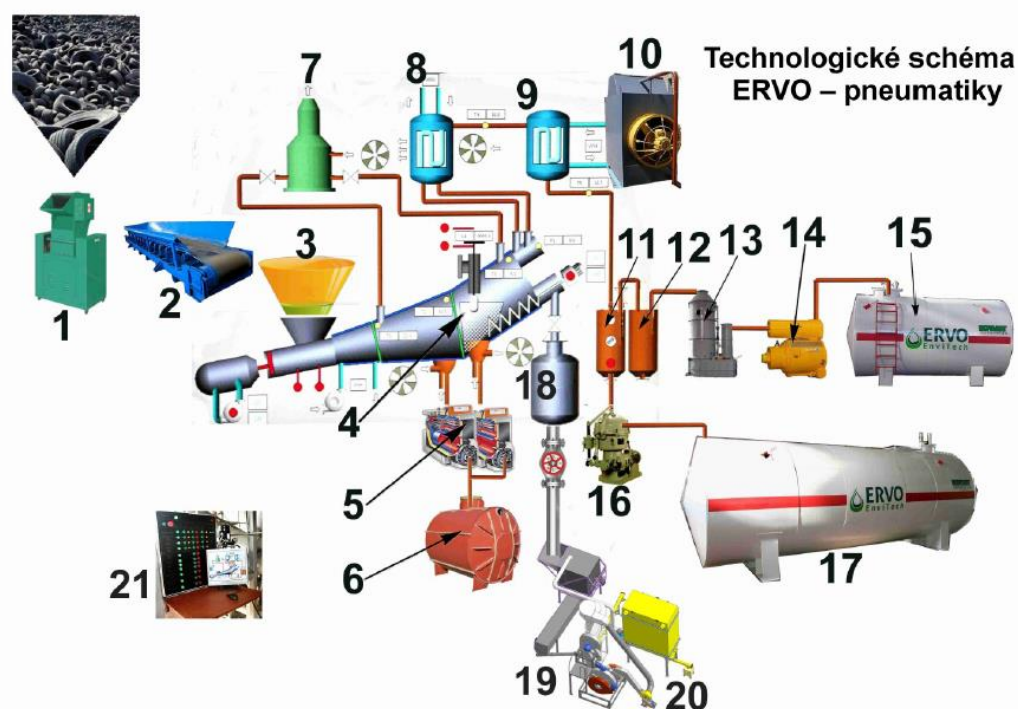
4.13 ERVO EnviTech

Projekt z ČR. Vznikl jako odpověď na snahu Evropské Unie více prosadit tzv. Circular Economy (oběhovou ekonomiku). V roce 2015 vznikl nový balíček návrhů ke strategické koncepci tohoto programu. Odpadová politika EU se v souladu s přijatým návrhem akčního plánu orientuje proti ukládání odpadů a podporuje zabránění vzniku nových odpadů, jejich minimalizaci a recyklaci formou tzv. technologických úprav nebo také materiálové transformace [54].

Od roku 2017 provozují jednotku na pyrolytické zpracování plastů ve vývojovém a testovacím provozu. V případě splnění všech zákonem daných potřebných norem na ochranu životního prostředí a vyhovujícím technickým parametrům mají v plánu spustit v roce 2018 nepřetržitý provoz.

Výroba jedné jednotky činí 5 tun zpracovaných surovin za den. Potřebné teplo pro reakci zajišťuje spalování certifikovaného paliva. Jednotky jsou řešeny modulárním způsobem, což umožňuje jejich sestavení do skupin o různých výkonech odpovídajícím násobku výkonu jednoho modulu.

Tato technologie je schopná zpracovávat jak plasty, tak odpadní pneumatiky. Pracuje v kontinuálním režimu a je vybavena tzv. multicirkulačním systémem, který zabezpečuje řízení žádané hloubky termického rozkladu vysokomolekulárních struktur s výsledným ziskem tekutého produktu se zadanými vlastnostmi. Proces probíhá při teplotě 500–800°C.

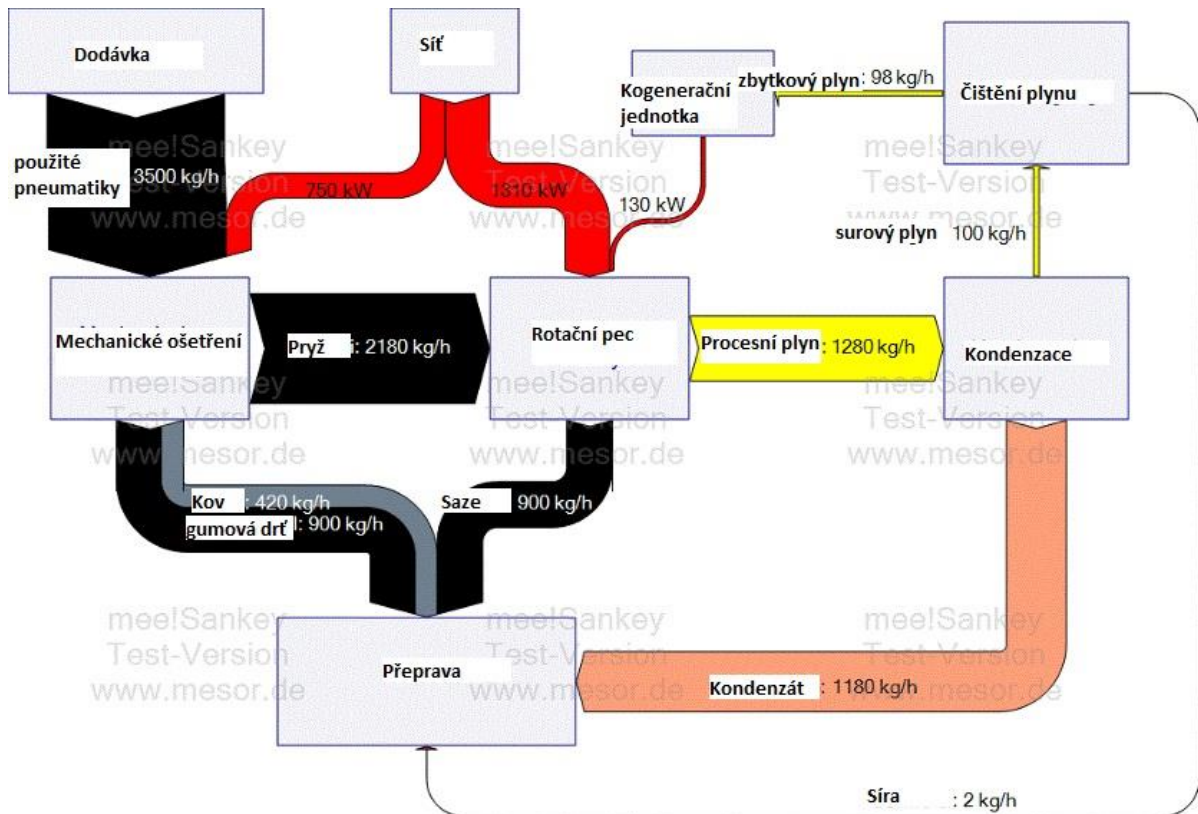


Obrázek 19: Schéma procesu ERVO EnviTech [54], 1. Drtič pneumatik, 2. Nakládka drcených pneumatik do zásobníku, 3. Zásobník, 4. Reaktor, 5. Hořáky, 6. Nádrž s topným olejem pro hořáky, 7. Komín, 8. Rozdělovač depolymerizační paroplynové směsi, 9. Chlazení paroplynové směsi, 10. Chladič věž, 11. Prvotní akumulační nádrž pro plyn a kapalné frakce, 12. Nádrž pro depolymerizační (pyrolytický) plyn, 13. Separátní filtr pro čištění a sušení plynu, 14. Kompresor, 15. Nádrž pro stlačený plyn – přechodné skladování, 16. Separátní filtr pro čištění a sušení kapalného paliva, 17. Cisterna pro přechodné skladování kapalného alternativního paliva, 18. Kontejner pro pevný zbytek depolymerizačního procesu, 19. Separátor uhlíkového zbytku a kovu, 20. Mlýn na uhlíkový zbytek. Na schématu nejsou znázorněny přechodné nádrže pro uhlíkový zbytek a kov, 21. Řídicí systém

4.14 DGE

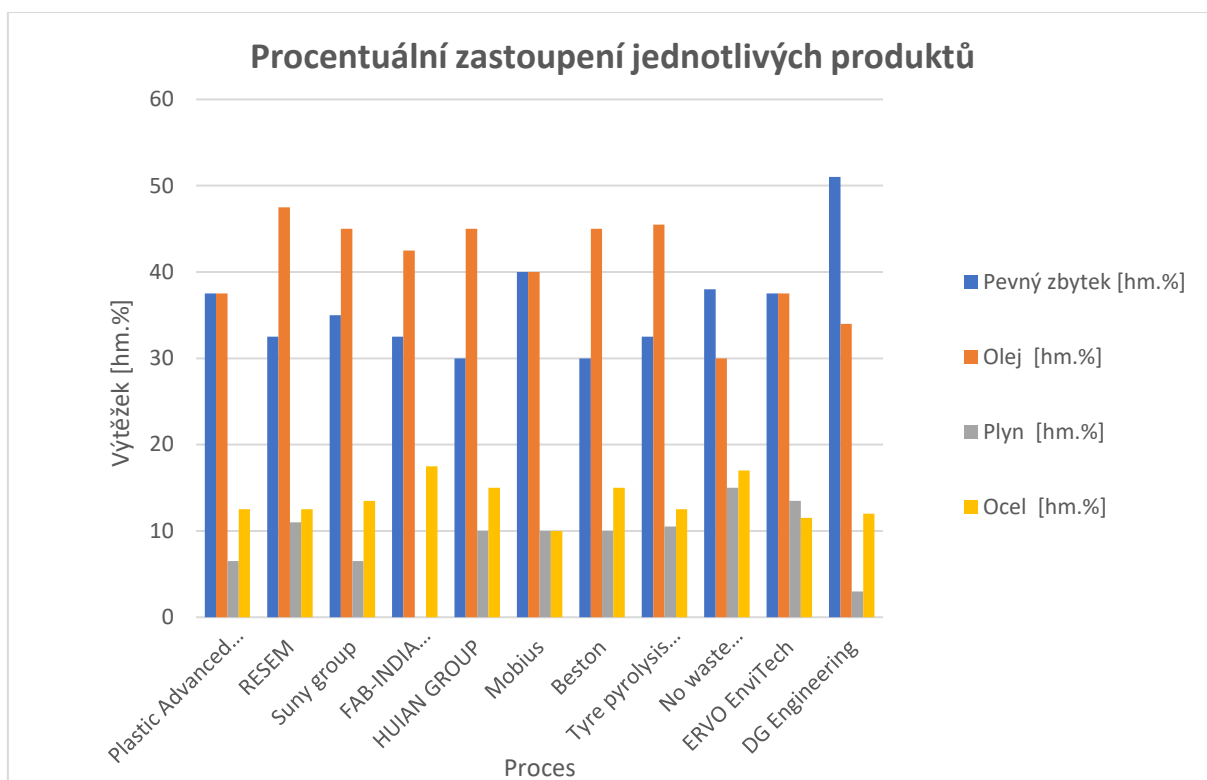
Dirk Gerlach Engineer je německá společnost, která se mimo jiné zabývá i technologií pyrolýzy. Pyrolýzní reakce probíhá v reaktoru s rotační pecí, kam je vsazen gumový granulát. Na následujícím obrázku je vidět procesní diagram spolu s materiálovou bilancí celého procesu.

Procesem projde zhruba 3500 kg použitých pneumatik za hodinu. Na zpracování v reaktoru jde po odstranění kovových částí a gumové drtě zhruba 2180 kg/h. Zpracovaného kondenzátu je 59 hm.%, vztaženo k materiálu zpracovávaného v rotační peci, plynu, který se po vyčištění použije v kogenerační jednotce na výhřev rotační pece, je 4,5 hm.% a produkce pevného zbytku odpovídá 41 hm.%. Množství ocelového zbytku je pak 12 hm.%, v tomto případně ale vztaženo k celkové váze zpracovávaných pneumatik [38].



Obrázek 20: Schéma procesu DG [38]

4.15 Porovnání výsledků



Obrázek 21: Porovnání výtěžnosti produktů jednotlivých procesů nalezených při rešerši

4.16 Komentář k rešerši komerčních a průmyslových pyrolytických zařízení

Firmy zabývající se pyrolýzou odpadních pneumatik se opravdu nacházejí po celém světě. V této rešerši jsou firmy z USA, Číny, Indie, Německa i České republiky. Je vidět, že zájem je opravdu po celém světě.

Zásadním problémem při hledání informací o komerčních zařízeních pyrolytického zpracování odpadních pneumatik je, že tyto informace jsou, až na výjimky, poměrně omezené, protože firmy si je velmi pečlivě střeží. Většinou je známé složení výsledných produktů a kapacita, ale například pro zhodnocení vlivu procesních parametrů, jako je teplota, velikost vstupních částic, rychlost ohřevu, délka zdržení atd. jsou informace uváděné na internetových stránkách nedostatečné. Na grafu na obr.16 je vidět porovnání výtěžků jednotlivých komerčních zařízení. Je vidět, že výtěžek pevného zbytku se pohybuje nejčastěji mezi 30 a 40 hm.%. Největší výtěžek je pak ve většině případů pyrolýzní olej a dosahuje hodnot mezi 30 až 50 hm.%. Výtěžky plynu a ocele jsou pak velmi podobné a pohybují se okolo 10 hm.%.

Většina komerčních zařízení používá reaktory s rotační pecí, a to zejména z důvodu, že jsou většinou schopny zpracovávat i celé pneumatiky. Na druhou stranu to ale znamená, že k ohřevu dochází velmi pomalu, v porovnání s pyrolýzou nadrcených pneumatik. Většina zařízení dále využívá po inicializaci procesu k ohřevu pyrolýzní plyn, jehož spalování by mělo stačit na udržení provozu procesu.

5. Praktická část

Druhou částí zadání diplomové práce bylo pro daný typ odpadu navrhnout základní PFD (viz příloha 1) schéma technologie, provést potřebné hmotové a energetické bilance a také ekonomickou analýzu procesu.

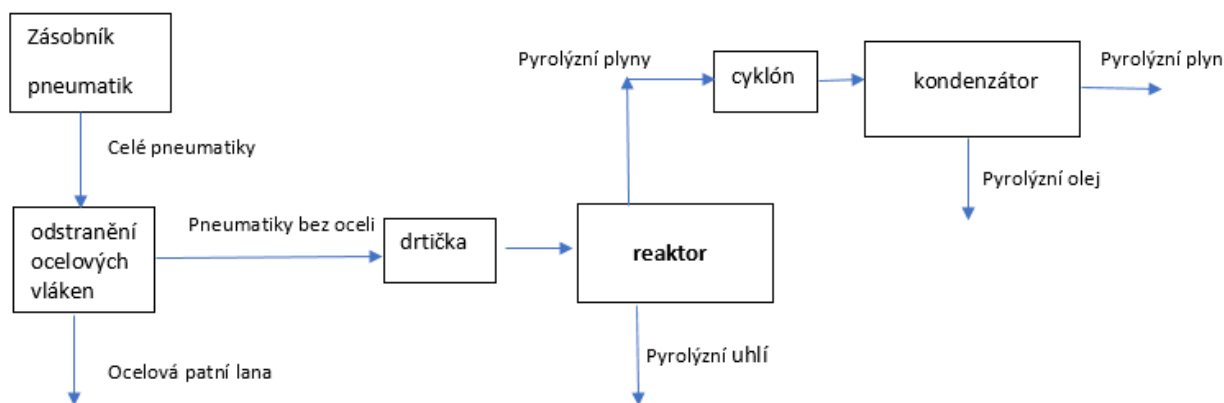
5.1 Výběr technologie

V části rešerše jsem se věnoval jak experimentálním, tak průmyslovým pyrolýzním jednotkám. Nejvíce průmyslových jednotek je vybaveno reaktory s rotační pecí. Ty mají několik výhod, ale zároveň i nevýhod. Mezi výhody patří skutečnost, že se většinou dají použít pro celé pneumatiky, a tudíž odpadá potřeba předúpravy. Díky rotující peci také dochází k poměrně dobré homogenizaci. Základní nevýhodou je ale to, že se většinou jedná o diskontinuální proces. Retorta se naplní pneumatikami a poté je dávka zpracována. Částečné kontinuity lze dosáhnout tak, že se používají např. tři retorty, přičemž jedna je v provozu, druhá se např. čistí a třetí je připravena k provozu. Dalším používaným typem je reaktor s pevným ložem. To je nejjednodušší typ, ale co se týká kontinuity provozu, má stejné nevýhody jako reaktor s rotační pecí. Podle mého názoru nesplňuje požadavky moderního technologického zařízení.

Jako vhodnou technologii jsem se rozhodl vybrat technologii šnekového reaktoru. Ta má zásadní výhodu a tou je právě možnost plně kontinuálního provozu. Navíc je možné korigovat průtok odpadních pneumatik otáčkami šneku.

5.2 Procesní technologie

Na základě inspirace průmyslovou rešerší byl zvolen postup a schéma technologie viz obr.22. Celková procesní technologie je pak vidět v příloze 1. Byla zvolena technologie s předúpravou pneumatik. To znamená, že pneumatiky budou před zpracováním v reaktoru nejdříve zbaveny ocelových lan. To usnadní následující fázi drčení a také zmenší potřebné množství tepla dodávané do reaktoru. Mezi drtičkou a dopravou do reaktoru je zásobník na denní kapacitu pro zajištění kontinuálního provozu. Pneumatiky jsou pomocí dopravníku a dávkovače dopravovány do reaktoru. Reaktor je dvouplášťový. Ve vnitřním válci je šnek, který posouvá vsazené nadrcené pneumatiky. Ve vnějším válci jsou spalovány pyrolýzní plyny, případně LPG při nastartování procesu nebo při nedostatku pyrolýzního plynu. Z reaktoru odchází produkty pyrolýzní reakce a spaliny. Teplota v reaktoru se pohybuje okolo 550 °C. Pyrolýzní plyny by se měli odvádět v řádu sekund, aby nedocházelo k sekundárním reakcím a vzniku nežádoucích sloučenin. Tyto plyny odcházejí z reaktoru přes cyklonový odlučovač, kde se odloučí většina prachového úletu. Pro ještě lepší vyčištění může být za cyklonovým odlučovačem ještě filtr. Poté jsou pyrolýzní plyny zchlazeny v kondenzátoru, odkud odcházejí do flash-separátoru, kde dojde k oddělení



Obrázek 22: Blokové schéma technologie-vstupy a výstupy

zkondenzovaných plynů od těch nezkondenzovatelných. Následuje ventilátor, který zajišťuje potřebný podtlak v systému. Nezkondenzovatelné plyny jsou čištěny a poté kompresorem stlačeny a připraveny k použití jako zdroj paliva. Z reaktoru ještě odchází pevný uhlíkatý zbytek. Ten je zchlazován, aby nedošlo ke vznícení v kontejneru.

5.2.1 Vstup

Jedná se o jednotku na zpracování odpadních pneumatik. Na vstupu budou odpadní pneumatiky z osobních automobilů s průměrnou hmotností **9 kg/ks**. Složení pneumatik odpovídá obr. 2. Uvádím ho v následující tabulce.

Tabulka 10: Složení pneumatik na vstupu

Část	[hm.%]
saze	28
ocel	13
kaučuk	22
syntetická guma	23
tkanina, plniva, akcelerátory, antiozonanty atd.	14

5.2.2 Výstup

Množství jednotlivých produktů vychází z průměrných hodnot průmyslových zařízení z rešerše. Tyto hodnoty jsou v následující tabulce.

Tabulka 11: Produkty

Produkt	Označení	[hm.%]
pyrolýzní uhlí	<i>pz</i>	36
pyrolýzní olej	<i>po</i>	41
pyrolýzní plyn	<i>pp</i>	9,5
ocel	<i>oc</i>	13,5

5.3 Hmotová bilance celého systému

U určení hmotové bilance vycházím z toho, že je známo množství zastoupení jednotlivých produktů pyrolýzy. Dále je známa průměrná váha jedné pneumatiky a její složení. Jediným parametrem, který je volitelný, je množství odpadních pneumatik, které se budou zpracovávat.

Veškeré výpočty byly provedeny pomocí programu Microsoft Excel a jsou v příloze 2.

Je 7 základních hmotových proudů, které slouží pro hmotové bilance. Jejich přehled je v následující tabulce.

Tabulka 12: Označení hlavních hmotových proudů

Proud	Složka	Hmotově odpovídá součtu produktů
1	celé pneumatiky	$pz+po+pp+oc$
2	ocelová vlákna	oc
3	pryž	$pz+po+pp$
4	směs pyrolýzních plynů	$po+pp$
5	pyrolýzní koks	pz
6	nezkondenzovatelné plyny	pp
7	pyrolýzní olej	po

Na základě této tabulky a znalosti procentuálního zastoupení jednotlivých složek, lze pro libovolné množství zpracovávaných pneumatik určit hmotnostní průtok v jednotlivých proudech. Např. pro proud 4, který se skládá z nezkondenzovatelných i z kondenzovatelných plynů z reaktoru, se určí hmotnostní průtok podle rovnice:

$$m_7 = m_{po} + m_{pp} = \rho_{po} \cdot m_{pneu} + \rho_{pp} \cdot m_{pneu} \quad (5.1)$$

kde ρ s příslušným indexem odpovídá hmotové koncentraci složky a m_{pneu} je hmotnost celé pneumatiky.

Pro ukázky hodnot a dalších výpočtů je uvažována denní kapacita **20 tun/den** odpadních pneumatik. Takové kapacitě pyrolýzní jednotky odpovídají následující hodnoty.

Tabulka 13: Parametry na vstupu pro kapacitu 20 t/d

Vstup pneumatiky o stálém složení

Hmotnostní tok	20 000 kg/den
hmotnost jedné pneumatiky cca	9 kg
počet pneumatik cca	2 222 ks/d

složení pneumatik

saze	28 hm.%	5 600 kg/den
ocel	13 hm.%	2 600 kg/den
kaučuk	22 hm.%	4 400 kg/den
syntetická guma	23 hm.%	4 600 kg/den
tkanina, plniva, akcelerátory atd.	14 hm.%	2 800 kg/den
suma	100 hm.%	20 000 kg/den

A na výstupu odpovídající hodnoty.

Tabulka 14: Výstupní parametry pro kapacitu 20 t/d

Výstup pevný zbytek	36 hm.%	7 200 kg/d
olej	41 hm.%	8 200 kg/d
plyn	9,5 hm.%	1 900 kg/d
ocel	13,5 hm.%	2 700 kg/d
suma	100 hm.%	20 000 kg/d

Průtoky v jednotlivých prouděch jsou pak rovny:

Tabulka 15: Průtoky v jednotlivých prouděch pro kapacitu 20 t/d

Průtok v jednotlivých prouděch

1	20 000 kg/d
2	2 700 kg/d
3	17 300 kg/d
4	10 100 kg/d
5	7 200 kg/d
6	1 900 kg/d
7	8 200 kg/d

Na základě znalosti těchto průtoků lze dimenzovat zařízení a určit ekonomiku celé pyrolýzní jednotky.

5.4 Určení zařízení

5.4.1 Vytrhávačka patních lan (F-111)

Pneumatiky jsou uskladněné ve skladu, ve kterém by měla být zásoba alespoň na 5 dní. Na prvním zařízení se zbaví ocelových patních lan. Ty se skladují v zásobníku K-112 a jsou prodávány a recyklovány. Do zásobníku vstupuje proud č. 1 a vystupují proudy 2 a 3. Potřebná kapacita pro danou kapacitu 20 t/d je 2 222 ks/d. To odpovídá 93 ks/h. Příkon takového stroje je zhruba 20 kW.

5.4.2 Drtička (Z-113)

Do drtičky vstupuje už jen pryž bez ocelových vláken. To je proud 3. Drtička musí být schopná zajistit kapacitu stejnou jako vytrhávačka.

5.4.3 Zásobník na pryž (K-114)

Je určený pro zásobu nadrcené pryže pro zajištění kontinuálního provozu reaktoru. Požadovaná kapacita je 1 den.

5.4.4 Reaktor (C-110)

Jedná se o hlavní část celé technologie. Do reaktoru vstupuje proud 3, který se zde dělí na proudy 4 a 5. Pro danou kapacitu 20 t/d to bude:

Tabulka 16: Vstup a výstup pro reaktor C-110

Vstup:	proud	3	<u>17300</u> kg/d	0,200 kg/s
Výstup:	proud	4	<u>10100</u> kg/d	0,117 kg/s
		5	<u>7200</u> kg/d	0,083 kg/s

Do reaktoru je potřeba dodávat teplo pomocí plynových hořáků. Podle řešerše se většina zdrojů shoduje, že teplo potřebné k udržení reakce je schopné dodávat vzniklý pyrolýzní plyn. V tomto případě jsem vycházel z [4]. Tato práce se zabývá právě reakční entalpií. Jako výsledek uvádí hodnotu $907,1 \pm 40,0$ kJ/kg pneumatik. Tato hodnota byla použita pro kontrolu, zda pro reakci stačí produkované množství pyrolýzního plynu.

Teplo dodané pyrolýzním plynem se určí z rovnice

$$Q_{dod} = H \cdot \dot{V} \quad (5.2)$$

Kde Q_{dod} je teplo dodané pyrolýzním plynem, H je výhřevnost pyrolýzního plynu a \dot{V} je objemový průtok plynu. Výhřevnost pyrolýzního plynu se pohybuje okolo 39 MJ/Nm³ [8] a počítám tedy s touto hodnotou. Průtok plynu je 0,0301 Nm³/s. Pak dodané teplo vychází

$$Q_{dod} = 39\,000\,000 \cdot 0,0301 = 1\,174\,848 \text{ W} \quad (5.3)$$

Pokud vztáhneme tuto hodnotu k množství zpracovávaných pneumatik, dostaneme hodnotu

$$q_{pp} = \frac{Q_{dod}}{m_{pp}} = \frac{1\,174\,848}{0,02199} = 53\,425 \frac{\text{kJ}}{\text{kg_plynu}} \quad (5.4)$$

Kde q_{pp} je měrné teplo vztažené na 1 kg pyrolýzního plynu a m_{pp} je hmotnostní průtok pyrolýzního plynu v kg/s. Nicméně pro porovnání s potřebnou reakční entalpií potřebujeme množství tepla vztáhnout k hmotnostnímu průtoku pneumatik.

$$q_{pneu} = \frac{Q_{dod}}{m_{pneu}} = \frac{1\,174\,848}{0,20} = 5\,867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg_pneumatik}} \quad (5.5)$$

q_{pneu} je měrné teplo vztažené na 1 kg pneumatik a m_{pneu} je hmotnostní průtok pneumatik. Pokud toto teplo porovnáme s potřebnou reakční entalpií z [4], dostaneme tuto hodnotu.

$$\frac{h_r}{q_{pneu}} = \frac{907}{5\,867} = 0,155 \quad (5.6)$$

To lze jinými slovy chápat tak, že proces si vystačí jenom s pyrolýzním plynem jako zdrojem energie, pokud se alespoň 15,5 % tepla vzniklého spálením tohoto plynu využije k reakci. Proces by tedy měl být bez problému autonomní.

Toto teplo se do reaktoru dostane ze spalin vzniklých při spalování pyrolýzního plynu. Tyto spaliny budou mít teplotu zhruba 900 °C. Velikost teplosměnné plochy pro přenos bude záviset zejména na velikosti součinitele prostupu tepla, který je ale v této fázi jen přibližný. Pokud bude alespoň 25 W/m²/K, vychází teplosměnná plocha přijatelně velká, okolo 9 m², viz příloha 2.

Tabulka 17: Základní technické parametry reaktoru

Průměr	0,85 m
Délka	3,6 m
Spotřeba tepla	cca 1000 kJ/kg pneumatik

5.4.5 Chlazení pyrolýzního uhlí (W-118)

Jedná se o uzavřený šnekový dopravník s duplikátorem a dutým šnekem. Uvnitř duplikátoru a šneku proudí chladící voda. Pro určení teplosměnné plochy je potřeba znát množství tepla odebraného z pyrolýzního uhlí. To se určí ze vztahu

$$Q_{dod} = m_{pz}c_{pz}(T_1' - T_1'') = 0,083 \cdot 1300 \cdot 500 = 53\,625\,W \quad (5.7)$$

kde m_{pz} je hmotnostní průtok pyrolýzního uhlí, $c_{p,pz}$ je měrná tepelná kapacita pyrolýzního uhlí a $(T_1' - T_1'')$ je rozdíl teplot na začátku a na konci. Chladivem bude voda o teplotě $T_2' = 20^\circ\text{C}$ a hmotnostním průtokem $m_v = 1,5\, \text{kg/s}$. Potřebnou teplosměnnou plochu vyjádříme ze vztahu

$$Q_{dod} = kS\Delta T_{ln} \quad (5.8)$$

Kde k je součinitel prostupu tepla, S je potřebná teplosměnná plocha a ΔT_{ln} je střední logaritmická teplota. Pro ΔT_{ln} se musí ještě spočítat teplota vody na výstupu T_2'' ze vztahu

$$m_{pz}c_{pz}(T_1' - T_1'') = m_v c_{p,v}(T_2' - T_2'') \quad (5.9)$$

Potom

$$T_2'' = T_2' + \frac{m_{pz}c_{pz}}{m_v c_{p,v}}(T_1' - T_1'') = 20 + \frac{0,083 \cdot 1300}{1,5 \cdot 4180}(550 - 50) = 28,6^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

a ΔT_{ln} vychází podle vztahu

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1' - T_1'') - (T_2' - T_2'')}{\ln \frac{(T_1' - T_1'')}{(T_2' - T_2'')}} = \frac{(550 - 50) - (28,6 - 20)}{\ln \frac{(550 - 50)}{(28,6 - 20)}} = 117,9^\circ\text{C} \quad (5.11)$$

Pro určení plochy S z rovnice 5.8 pak ještě potřebujeme součinitel prostupu tepla k . To je v této fázi předběžného návrhu parametr, který je zatížen poměrně velikou chybou. Můžeme ale říct, že pokud by byla hodnota alespoň $30\, \text{W/m}^2/\text{K}$, teplosměnná plocha vychází přijatelně veliká. Pro tuto hodnotu vychází podle následující rovnice velikost teplosměnné plochy S .

$$S = \frac{Q_{dod}}{k\Delta T_{ln}} = \frac{53\,625}{30 \cdot 117,9} = 14,9\, \text{m}^2 \quad (5.12)$$

Pokud by se součinitel prostupu tepla snížil, došlo by k narůstání potřebné plochy.

5.4.6 Cyklonový odlučovač

Pro cyklonový odlučovač je potřeba hlavně objemový průtok plynu. Ten byl určen ze známého hmotnostního průtoku a přibližné hustoty. Objemový průtok vychází cca 1600 m³/h.

5.4.7 Kondenzátor (W-120)

Do kondenzátoru vstupuje proud 4 a vystupují zkondenzované a nezkondenzované plyny. Pro určení velikosti teplosměnné plochy kondenzátoru je potřeba znát množství tepla, které se musí odebrat. Spaliny se budou chladit z teploty zhruba 550 °C na teplotu cca 50 °C. Výpočet je prakticky totožný s výpočtem chlazení pyrolýzního uhlí. Pro zjednodušení beru potřebné množství tepla k odebrání stejné jako potřebná reakční entalpie. Pro tyto parametry vychází velikost zhruba 3 m². Použije se výměník s plovoucí hlavou.

5.4.8 Separátor voda-plyn (F-124)

Za kondenzátorem následuje separátor, který oddělí zkondenzované plyny od těch nezkondenzovaných. V horní části odlučovače je ještě pro lepší účinnost odlučovač kapek. Vstupuje do něj tedy proud 4 a vystupuje proud 6 a 7, tedy vlastně produkty pyrolýzní plyn a pyrolýzní uhlí. Pro daný průtok a rychlost plynu 0,5 m/s je potřeba vnitřní průměr nejméně 30 cm.

5.4.9 Ventilátor (V-125)

Pro překonání tlakových ztrát a zajištění odtahu pyrolýzních plynů slouží ventilátor umístěný za separátorem oleje, navržený podle objemového průtoku.

5.4.10 Čištění pyrolýzního plynu (F-126)

Toto zařízení není v této práci detailně řešeno, protože by bylo lepší vycházet ze skutečně naměřených koncentrací. Dále je nicméně řešeno, jaký vliv má zvyšování jak fixních nákladů na pořízení jednotky, tak provozních nákladů na výnosnost projektu. Do výpočtů pro dané parametry uvažuji s orientační cenou 1 mil. Kč.

5.4.11 Kompresor (V-128)

Nezkondenzované pyrolýzní plyny z plynojemu se stlačují na tlak přibližně 200 bar z tlaku atmosférického. Pro tyto parametry a za uvažování ideálního plynu a adiabatického děje se určí potřebný výkon podle následující rovnice.

$$\begin{aligned}
W &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{m_{pp}}{M_{CH_4}} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \\
&= \frac{1,31}{1,31 - 1} \cdot \frac{0,022}{16,042} \cdot 8,314 \cdot 323,15 \left[1 - \left(\frac{20\,000}{101} \right)^{\frac{1,31-1}{1,31}} \right] \\
&= -38,84 \text{ kW}
\end{aligned} \tag{5.13}$$

V této rovnici κ odpovídá pro zjednodušení Poissonově konstantě pro metan, m_{pp} je zpracovávané množství pyrolýzního plynu, M_{pp} je molární hmotnost methanu, R je univerzální plynová konstanta, T_1 je teplota plynu na vstupu a p_1 a p_2 jsou tlaky na vstupu, respektive na výstupu. Potřebný výkon kompresoru je tedy asi 40 kW, dále zvětšený o účinnost kompresoru. Záporná hodnota značí, že práci je potřeba vykonat.

5.4.12 Plynové hořáky (D-119)

Pro lepší rozvod tepla v reaktoru je požadovaný tepelný výkon rozdělený do 3 hořáků. Při uvažování hodnot z kapitoly 5.6.4 na jeden hořák připadá zhruba 500 W.

5.5 Ekonomika

Zásadní otázkou je, jestli se tuto technologii vůbec vyplatí realizovat. Další částí této práce je provedení ekonomické bilance. Bylo provedeno nacenění potřebných zařízení, surovin a produktů. Počítám s životností jednotky 10 let a kapacitou 20 tun odpadních pneumatik za den. Většina zařízení byla naceněna podle [55], případně dle [56] na základě odvozených vztahů. Dalším způsobem pak byl odhad ceny na základě zařízení nabízených na internetu. Pro zhodnocení projektu slouží tzv. kritéria ziskovosti.

5.5.1 Příklady nacenění některých zařízení

Pro nacenění většiny zařízení byly použity aproximační vztahy získaných v [55]. Odhad ceny se určí na základě následujícího vzorce.

$$C_e = a + bS^n \tag{5.14}$$

V této rovnici C_e značí odhadovanou cenu v USD, a , b jsou konstanty a n je exponent pro daný typ zařízení. S je specifická vlastnost daného zařízení (např. velikost v m² nebo m³, výkon v kW atp.) v určitém daném rozsahu.

Jako příklad využití tohoto vztahu použijí např. kondenzátor W-120. Charakteristickou veličinou je velikost teplosměnné plochy, která byla určena jako zhruba $S = 3 \text{ m}^2$. K výpočtu použijeme hodnoty pro výměník s plovoucí hlavou.

Tabulka 18: Hodnoty pro určení ceny výměníku tepla [55]

Typ zařízení	Jednotky	a	b	n
Výměník s plovoucí hlavou	[m ²]	11 000	115	1

Pro hodnoty podle tabulky 17 vychází.

$$C_e = a + bS^n = 11000 + 115 \cdot 3,034^1 = 11\,348,87 \text{ USD} \sim 250\,810 \text{ Kč} \quad (5.15)$$

Pro převod z USD na Kč používám kurz 22,1.

Dalším způsobem je pak možnost odhadnout cenu podle váhy. K tomu slouží tzv. kilogramové ceny. Hodnoty pro tyto výpočty jsou k dispozici v [56]. Takto byly určeny ceny skladovacích nádob na jednotlivé produkty. Jako příklad poslouží zásobník na pryž K-114.

Za předpokladu dané produkce a požadavku 1denní kapacity zásobníku byl vypočten potřebný objem. Pro hustotu přibližně 1200 kg/m^3 je potřebný objem nádrže alespoň $14,5 \text{ m}^3$. Zásobník bude mít tvar kvádru. Určím pevnou výšku zásobníku na 1,5 m a zbylé dva rozměry potom na základě objemu. Následně vypočtu obsah plechu a poté jeho objem. Tloušťku plechu uvažuji 10 mm. Hmotnost použitá pro výpočet je potom $2\,303,23 \text{ kg}$. Podle [56] je kilogramová cena pro zařízení vyrobené v ČR z uhlíkové oceli 90-160 Kč/kg. Při použití nejvyšší ceny pak vychází cena zařízení zhruba $370\,000 \text{ Kč}$. Podobně byly naceněny i další zásobníky.

5.5.2 Fixní kapitálové investice-CAPEX

Přímé výdaje

Tabulka 18 ukazuje ceny za jednotlivé zařízení.

Tabulka 19: Fixní náklady na technologickou část

Technologická část			
	Stroje	Označení ve výkrese	Cena v Kč
1	Vytrhávačka	X-111	600 000
2	Drtička	Z-113	1 105 000
3	Zásobník na pryž	K-114	369 000
4	Dopravník	H-114	539 000
5	Reaktor	X-115	1 675 000
6	Chlazení pyrolýzního uhlí	W-118	600 000
7	Kontejner na ocel	K-112	191 000
8	Kontejner na pyrolýzní uhlí	K-116	788 000
9	Nádrž na olej	K-122	428 000
10	Nádoba na plyn	K-126	442 000
11	Kompresor	V-127	675 000
12	Plynový hořák	D-118	300 000
13	Cyklón	C-110	43 000
14	Kodenzátor	W-120	251 000
15	Flash-separator	F-124	35 000
16	Čistící jednotka	F-126	1 000 000
17	Ventilátor	V-125	122 000
celkem			9 163 000

Součástí přímých výdajů je i cena potřebných staveb, projektové dokumentace a inženýrské činnosti a řízení stavby. Všechny tyto náklady celkem ukazuje tabulka 19. Výpočet jednotlivých částí je v příloze (1). Podklady pro výpočty byly vzaty z [56], kde lze nalézt měrné ceny budov podle typu budovy, měrné ceny inženýrských sítí a komunikací atd. Ceny za projekční a inženýrskou činnost byly stanoveny na základě procentuálního podílu z celkových stavebních nákladů. Ten odpovídá 17 %.

Tabulka 20: Přehled přímých výdajů projektu

Skupina nákladů		Dílicí části	Odhad nákladů [Kč]
[1]	Pozemky	359 m2	538 000
[2]	Technologická část	Nakoupená zařízení dodaná na staveniště Instalace + potrubí Elektro - dodávka a montáž Měření a regulace - dodávka a montáž Procurement + řízení stavby Zisk dodavatele Celkem	9 163 000 8 613 000 1 374 000 3 079 000 852 000 1 787 000 24 868 000
[3]	Stavební část	Instalace - základy pro zařízení Výrobní hala Skladová hala Vnější stavební úpravy - komunikace... Staveniště, právní náklady, odměna dodavatele Celkem	1 081 000 4 350 000 6 446 000 299 000 797 000 12 973 000
[4]	Projektová dokumentace		1 538 000
[5]	Inženýrská činnost a řízení stavby		912 000
	Náklady celkem		40 829 000

5.5.3 Provozní náklady

Provozní náklady jsou náklady vynakládané opakovaně v průběhu životnosti projektu a je nutné je určit pro výpočet toků hotovosti projektu.

5.5.3.1 Přímé provozní náklady

Toto jsou náklady přímo úměrné množství vyrobené produkce. Jedná se o suroviny, pomocná média a energie, obsluhu, údržbu, dozor, laboratoř, spotřební materiál, zneškodňování odpadů a rezervu.

Suroviny

V tomto případě se uvažuje cena surovin nulová. Např. v České Republice platí pro všechny ze zákona „povinné osoby“ (výrobce, prodejce) povinnost zajistit i bezplatný odběr použitých pneumatik zdarma. Je zde pak ještě samozřejmě problém, co s takto vybranými pneumatikami dělat. Za tímto účelem vznikla nezisková společnost ELT Management Company Czech Republic [57], která provozuje kolektivní systém zpětného odběru pneumatik. V praxi to znamená, že

organizuje svoz a likvidaci pneumatik od jednotlivých účastníků. Financování je zajištěno účastnickým poplatkem.

Náklady za energie

Byla stanovena spotřeba elektrické energie pro zařízení s největší spotřebou, což jsou drtička, vytrhávačka patních lan, kompresor, reaktor a dopravník, a potřebný chladicí výkon na odebrání tepla v kondenzátoru a při chlazení pyrolýzního uhlí. Při znalosti za jednotku energií [58] pak byly určeny roční náklady za energie. Výpočet je v příloze 2 a hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 21: Provozní náklady za energie

elektrická energie		
spotřeba elektřiny celkem	1 540 331	kWh/rok
cena za jednu kWh	0,84	Kč/kWh
cena celkem za rok	1 293 878	Kč/rok

chladicí výkon		
chladicí výkon celkem	1 694 236	kWh/rok
cena za jednu kWh	1,2	Kč/kWh
cena celkem za rok	2 033 083	Kč/rok

Ocenění zaměstnanců je podle průměrné mzdy zaměstnanců v daném odvětví. Počet zaměstnanců bude 3.

Hrubá mzda je stanovena na.....25 800 Kč/měsíc

Náklady na dozor, údržbu, spotřební materiál a rezervu jsou stanoveny jako procentuální podíl z jiných částek.

Náklady na dozor..... 15 % z nákladů na obsluhu

Náklady na spotřební materiál..... 1 % z kapitálových investic

Náklady na údržbu..... 5 % z kapitálových investic

Rezerva..... 3 % z přímých provozních nákladů

5.5.3.2 Nepřímé provozní náklady

Tyto náklady jsou nepřímo úměrné množství vyrobené produkce. Patří sem odpisy, daně, pojištění, úroky a podíl režie firmy.

Odpisy byly stanoveny takto:

Tabulka 22: Odpisy

Doba odepisování majetku	let	6
Odpisy na 1. rok	%	8,5
Odpisy na další roky	%	18,3

Pojištění je stanoveno jako..... 1 % z kapitálových výdajů

Podíl režie společnosti..... 60 % z nákladů na obsluhu a dozor + 50 % z nákladů na údržbu

5.5.3.3 Distribuční náklady

Distribuční náklady jsou opět přímo úměrné produkci a také geografickému rozmístění odběratelů produktů.

Dopravné..... 2 % z prodeje

5.5.4 Ceny produktů

Produkty budou ocel, pyrolýzní olej a pyrolýzní uhlí. S pyrolýzním plynem se pro začátek počítá tak, že by se všechen využil v procesu pro zajištění tepla. Pokud by se v průběhu činnosti projektu ukázalo, že není potřeba všechen vyprodukovaný plyn, mohl by se také začít skladovat a prodávat.

Ceny produktů

Ocel..... cca 5,5 Kč/kg

Pyrolýzní olej..... 3 Kč/l

Pyrolýzní uhlí..... 4 Kč/kg

Na ceně produktů závisí úspěch projektu. Cena za ocel je nejvíce stabilní. Co se týká ceny za pyrolýzní olej, tak v této chvíli (jaro 2018) je např. výkupní cena vyjetého oleje, ze které by se dalo vycházet, nulová kvůli poměrně nízkým cenám ropy. To se však může nečekaně změnit. V tomto projektu uvažují cenu pyrolýzního oleje 3 Kč/l. Cena pyrolýzního uhlí je odhadnuta na základě ceny hnědého uhlí.

Pokud známe všechny příjmy a výdaje, můžou se určit toky hotovosti projektu neboli cashflow, ze kterých potom vycházejí kritéria ziskovosti, viz příloha 2.

Tabulka 23: Provozní výnosy, náklady, zisk a daně z příjmu

Údaj	Jednotka	
Výnosy za prodej produktů	Kč/rok	25 908 917
Provozní náklady bez odpisů a úroků	Kč/rok	14 724 009
Přímé provozní náklady	Kč/rok	10 716 575
Suroviny	Kč/rok	0
Osobní náklady pracovníků obsluhy	Kč/rok	3 755 079
Dozor	Kč/rok	563 262
Náklady na údržbu	Kč/rok	2 041 480
Spotřební materiál	Kč/rok	408 296
Čištění plynů	Kč/rok	300 000
Energie	Kč/rok	3 326 961
Rezerva	Kč/rok	321 497
Nepřímé provozní náklady	Kč/rok	3 489 256
Pojištění	Kč/rok	285 807
Režie firmy	Kč/rok	3 203 448
Distribuční náklady	Kč/rok	518 178
Dopravné	Kč/rok	518 178
Zdanitelné výnosy	Kč/rok	11 184 908
Odpisy		
Odpisy 1. rok	Kč/rok	3 470 515
Odpisy 2.-6. rok	Kč/rok	7 471 815
Roční zisk před zdaněním		
1. rok	Kč/rok	7 714 392
2.-6. rok	Kč/rok	3 713 092
7. rok a další	Kč/rok	11 184 908
Daň z příjmu		
1. rok	Kč/rok	1 465 735
2.-6. rok	Kč/rok	705 488
7. rok a další	Kč/rok	2 125 132

5.5.5 Kritéria ziskovosti

Hlavním cílem této práce je určit, jestli se do takovéto pyrolýzní jednotky vůbec vyplatí investovat. To ukazují tzv. kritéria ziskovosti. Mezi ně patří např. Doba návratnosti, Návratnost investice (ROI-Return On Investment) nebo Diskontovaná míra návratnosti toku hotovosti (DCFRR-Discounted Cash-Flow Rate of Return) [56].

Doba návratnosti, v tomto případě prostá doba návratnosti, se dá zhruba určit z grafu ukazující závislost kumulovaného cashflow na době životnosti projektu nebo pomocí následujícího vzorce.

$$DN = \frac{INV}{CF} \quad (5.16)$$

DN vyjadřuje prostou dobu návratnosti, INV je investovaný kapitál a CF jsou toky hotovosti projektu. Pro zadanou kapacitu vychází zhruba 4 roky.

Návratnost investice ROI odpovídá podílu průměrného příjmu převyšující původní kapitálové investice a původní kapitálové investici. Tomu odpovídá rovnice podle [56]

$$ROI = \frac{[\text{příjem projektu} - (\text{fixní} + \text{oběžný kapitál})]/\text{počet let}}{\text{fixní kapitál} + \text{oběžný kapitál}} \quad (5.17)$$

Diskontovaná míra návratnosti toku hotovosti DCFRR je nejrozšířenější metodou, podle které se firmy rozhodují, zda daný projekt uskutečnit. Zahrnuje všechny toky hotovosti po celou dobu trvání projektu, které jsou převedeny na stejný bod v čase, obvykle do okamžiku zahájení investice. Toto kritérium také zohledňuje tzv. časovou hodnotu peněz a jde o to najít takovou diskontní sazbu, při níž je současná hodnota toku hotovosti celého projektu rovna nule. Podle [56] ji vyjadřuje rovnice.

$$0 = \sum_{j=1}^{j=T} \frac{\text{tok hotovosti v roce } j}{(1+r)^j} \quad (5.18)$$

T je poslední rok trvání projektu. Životnost projektu uvažuji 10 let. Diskontní sazba byla použita 10 %.

Pro zadané parametry vychází tato kritéria následujícím způsobem.

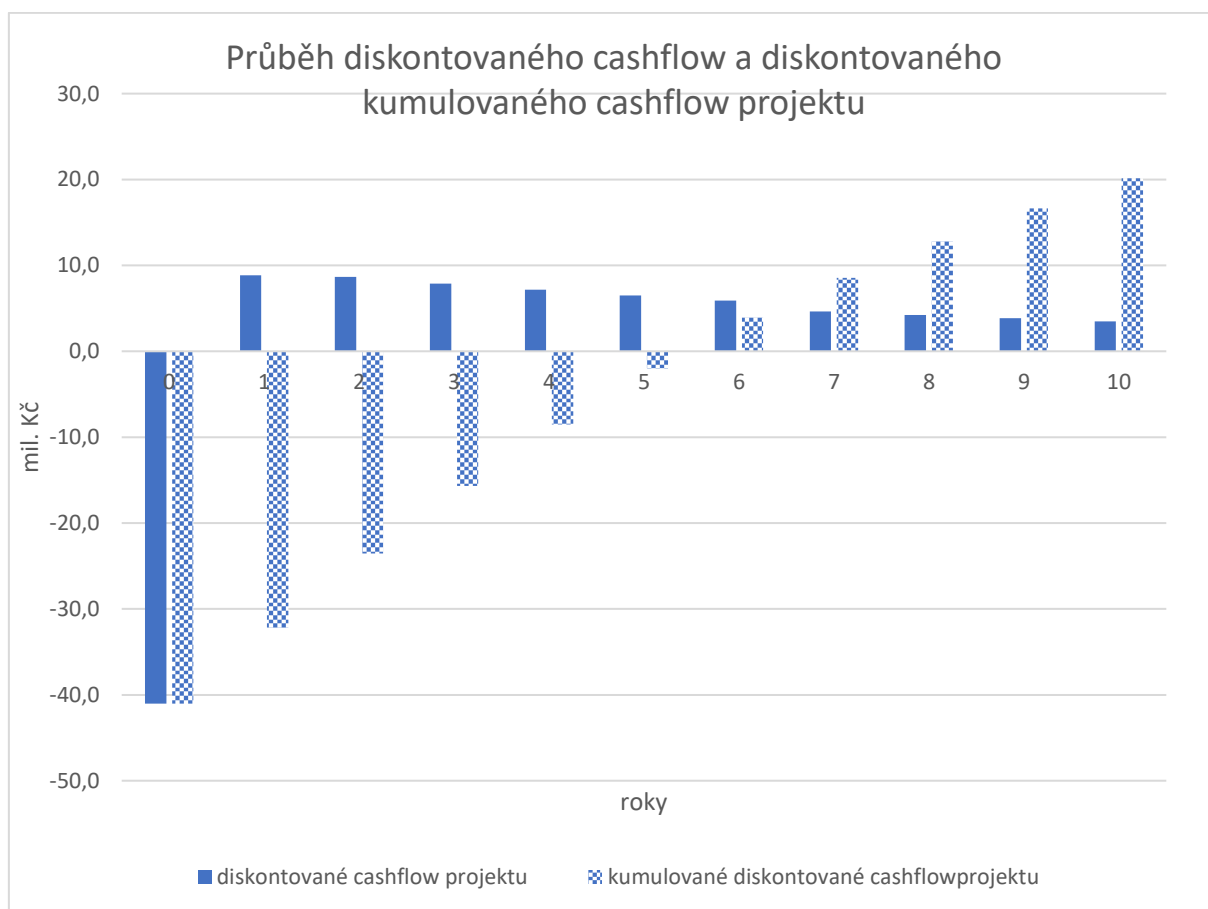
Tabulka 24: Kritéria ziskovosti projektu

Kritérium	Hodnota
Prostá doba návratnosti	4,15 let
ROI	13,97 %
DCFRR	20,75 %

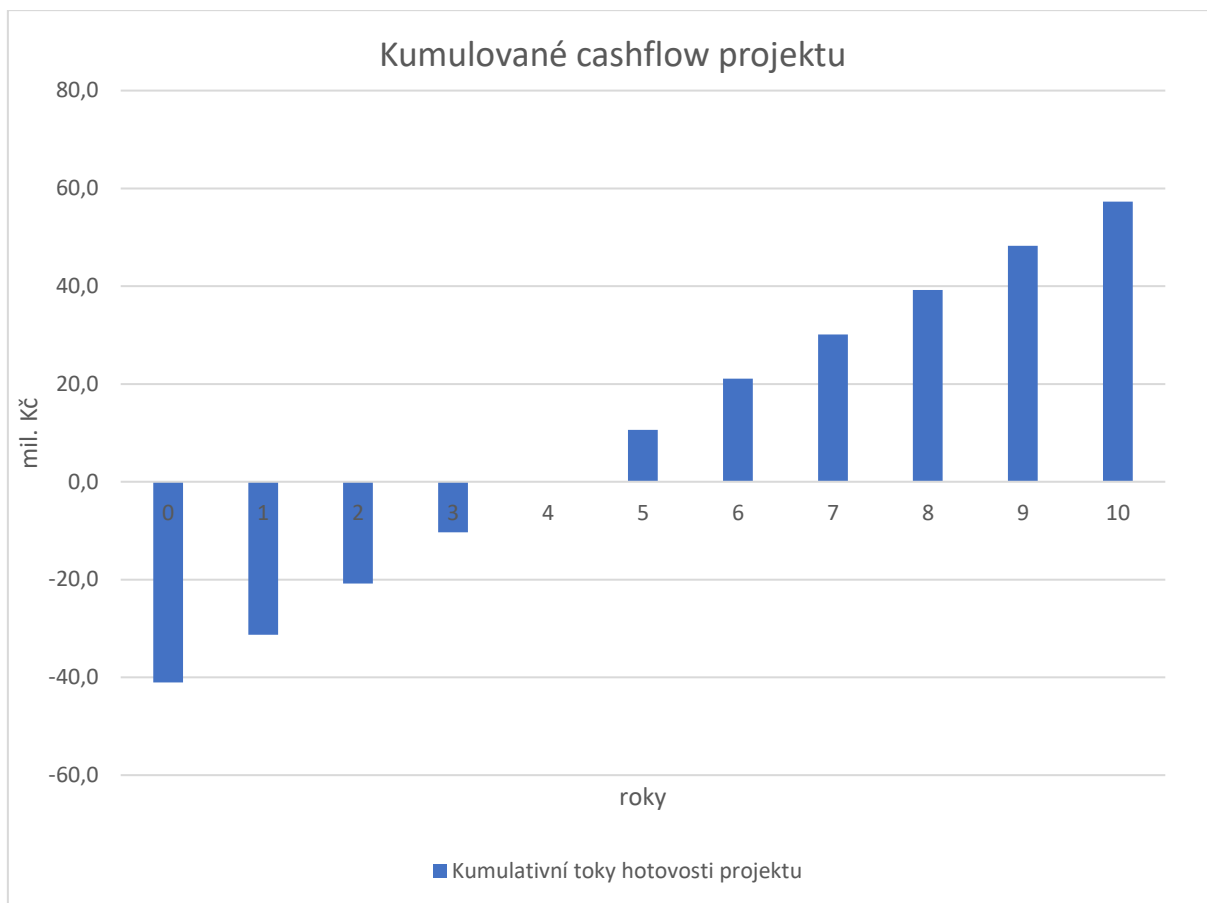
Tato čísla jsou poměrně optimistická. ROI vychází návratnost investice 13,97 procent za rok. Hodnota DCFRR pak vlastně říká, že z projektu získáme za dobu jeho životnosti příjem stejný, jako kdybychom své finanční prostředky vložili do investičního nástroje s výnosem 20,75 % [56].

Tato čísla platí pro zadanou kapacitu a parametry. Další částí práce je citlivostní analýza. Pro lepší rozhodování je dobré vědět i co se stane, pokud se nějaký významný parametr změní, jak se to projeví na výnosnosti projektu atd.

Na následujících grafech je vidět průběh jak kumulovaného cashflow, tak diskontovaného cashflow a diskontovaného kumulovaného cashflow projektu.



Obrázek 23: Průběh diskontovaného cashflow a diskontovaného kumulovaného cashflow projektu



Obrázek 24: Průběh kumulovaného cashflow projektu

5.6 Citlivostní analýza

Při citlivostní analýze chceme zejména vědět, jak se změní výnosnost projektu, pokud se budou měnit výkupní ceny produktů. Podle toho se dá např. zjistit, pod jakou cenu už nemůžeme jít s produktem, aby se projekt zaplatil. Další sledovanou veličinou může být změna provozních nákladů, která bude ovlivňovat toky hotovosti projektu a tím opět výnosnost atd.

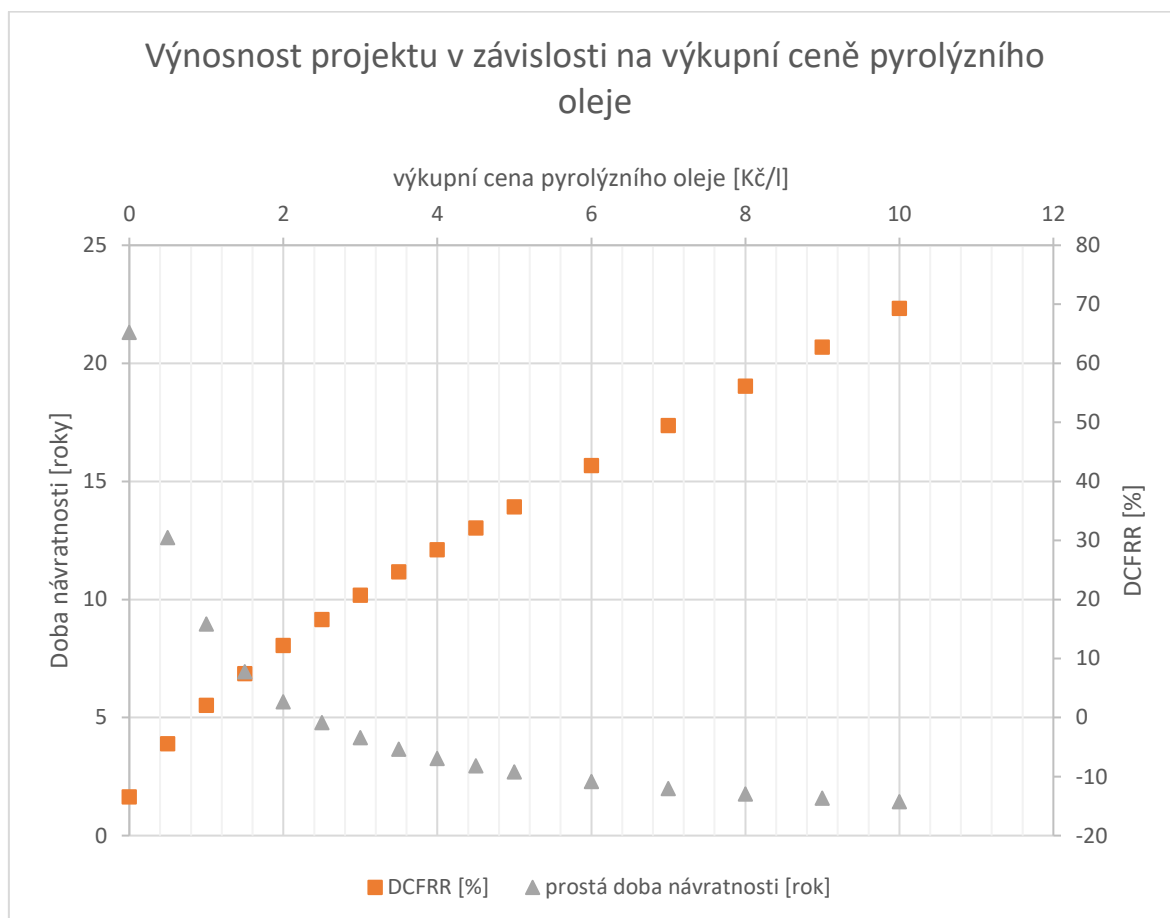
V této citlivostní analýze sleduji výnosnost projektu neboli DCFRR jako funkci:

- Výkupní ceny oleje
- Výkupní ceny pyrolýzního uhlí
- Fixní náklady ceny technologie čištění plynů
- Provozních nákladů za čištění plynů
- Zvolené kapacity zpracovávaných pneumatik

Postup je takový, že všechny parametry zůstanou konstantní a měním jen jeden zvolený parametr.

5.6.1 Výnosnost jako funkce výkupní ceny oleje

Již bylo dříve uvedeno, že výkupní cena oleje je vlastně velká neznámá. Např. za vyjetý olej dnes nikdo nezaplatí. Tato jednotka produkuje pyrolýzní olej nerafinovaný, a tedy by se měl prodávat ještě na rafinaci. Z této analýzy by mělo vyplynout, kam až se dá s cenou za litr klesnout. Pro představu analýza začíná na ceně 0 Kč/l a poté je zvyšována až na 10 Kč/l. Bylo sledováno DCFRR a prostá doba návratnosti pro porovnání. Průběh takové závislosti těchto dvou kritérií je na následujícím grafu.

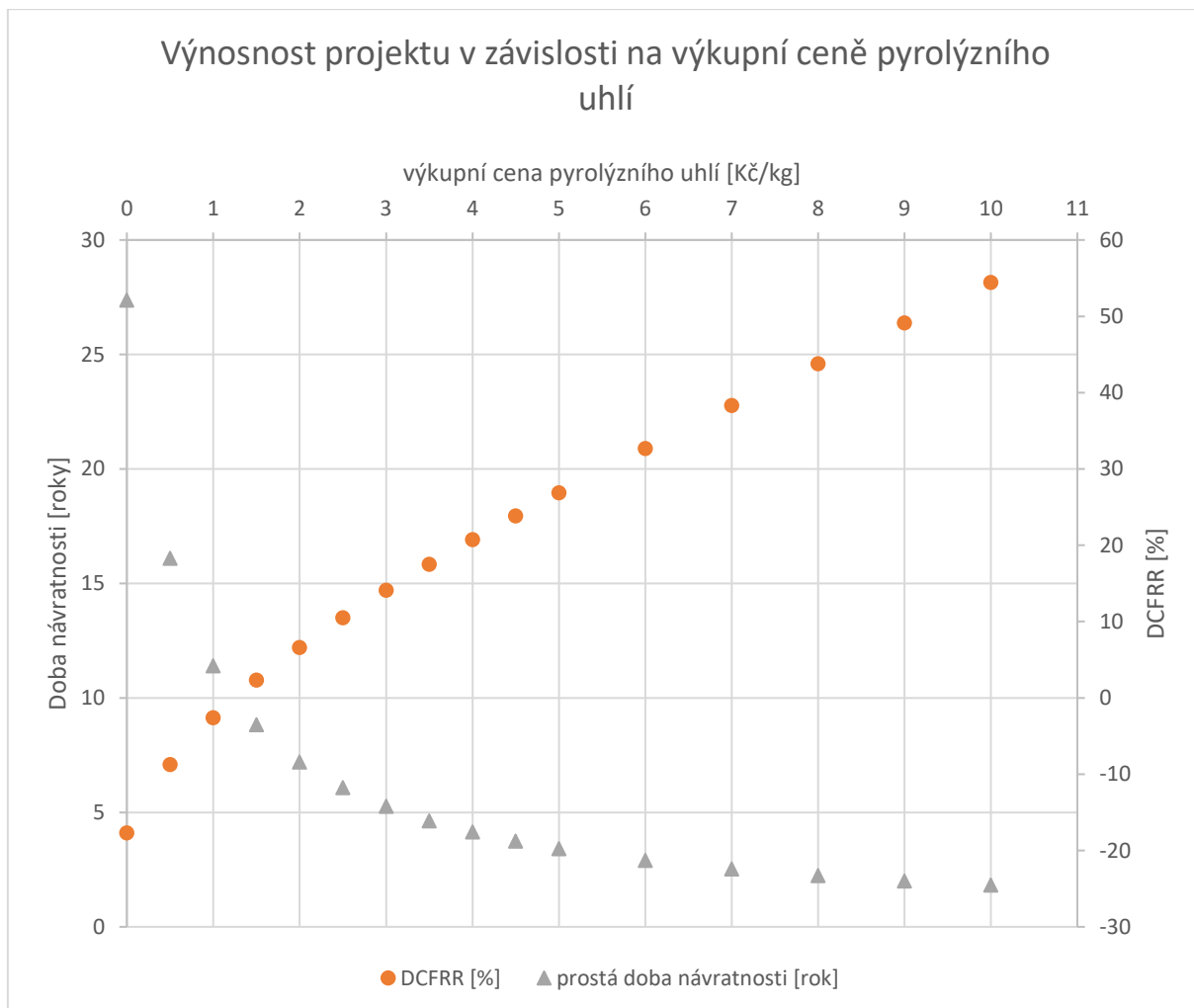


Obrázek 25: Výnosnost projektu v závislosti na výkupní ceně oleje

Pokud by cena pyrolýzního oleje byla skutečně nulová, je vidět, že projekt by nemělo smysl realizovat. Doba návratnosti je daleko za hranicí životnosti a s DCFRR se dostáváme do záporných hodnot. To samé platí pro hodnotu 0,5 Kč/l. Cena oleje, při které už vypadá projekt rozumně je zhruba od 2 Kč/l. V tuto chvíli se s životností dostáváme na 5,67 let a s hodnotou DCFRR na 12,24 %. Při dalším zvyšování už by neměl být takto nastavený projekt uskutečnit.

5.6.2 Výnosnost jako funkce výkupní ceny pyrolýzního uhlí

Pyrolýzní uhlí je dalším produktem, který je poměrně nevyzpytatelným, co se týká prodejní ceny. Byla obdobným způsobem provedena závislost DCFRR a prosté doby návratnosti na ceně uhlí.

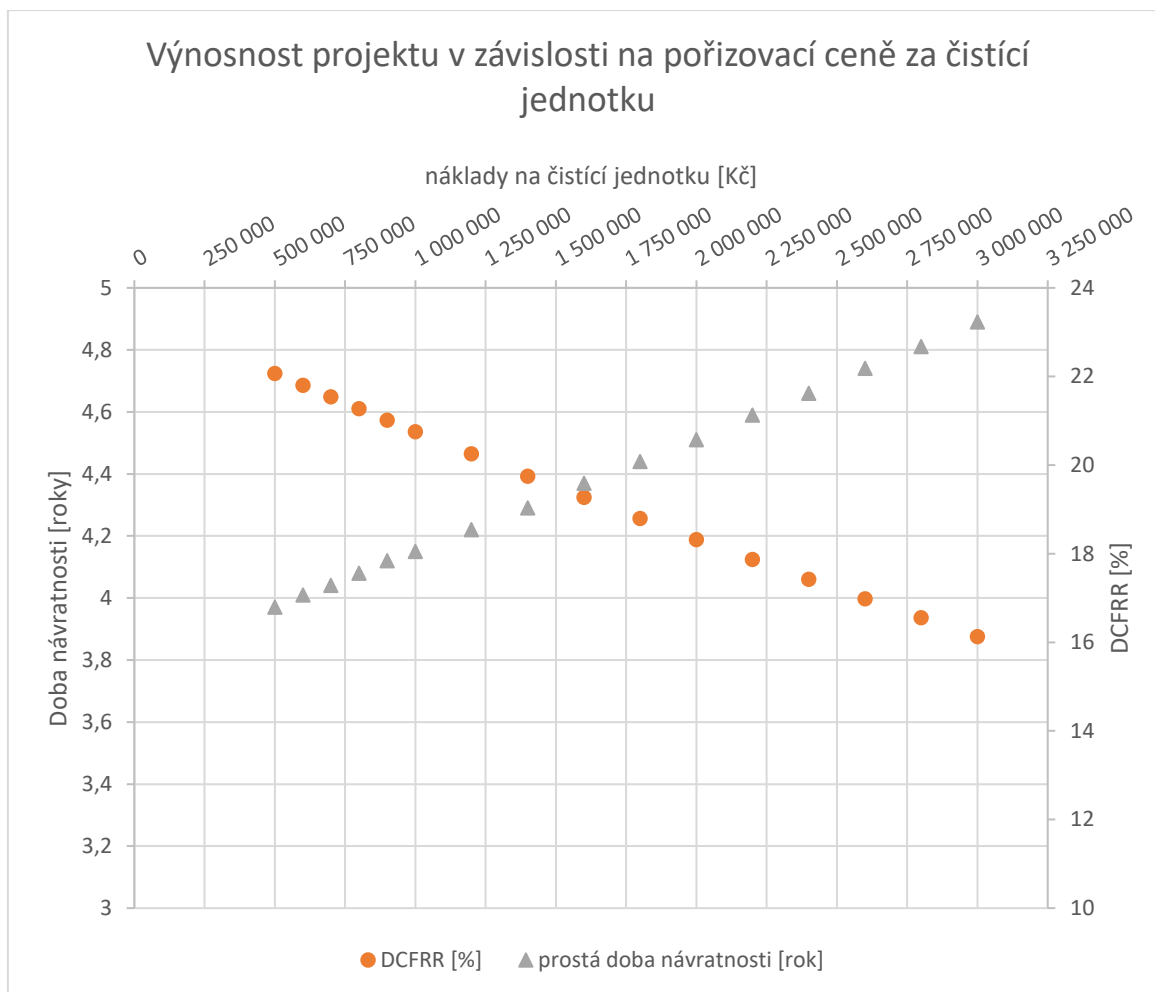


Obrázek 26: Výnosnost projektu v závislosti na výkupní ceně pyrolýzního uhlí

V tomto případě je vidět, že při nulové ceně za produkt, by byl dopad na ekonomické fungování projektu ještě horší než v prvním případě. Hodnota, při které by mělo smysl o tomto projektu uvažovat, se pohybuje okolo 2,5 Kč/kg. Pro tuto cenu je prostá doba návratnosti 6,09 let a parametr DCFRR 10,52 %.

5.6.3 Výnosnost jako funkce fixní ceny za čištění odpadních plynů

Náklady na toto zařízení patří mezi jeden z těch méně předvídatelných parametrů projektu. V této práci není nijak detailně řešena a pro základní bilance byla stanovena pouze rámcová cena 1 000 000 Kč, protože se jedná o poměrně malý průtok, zhruba 100 Nm³/h. V této části analýzy pak sleduji, jak se změní výnosnost projektu pro fixní náklady od 500 000 Kč do 3 000 000 Kč.

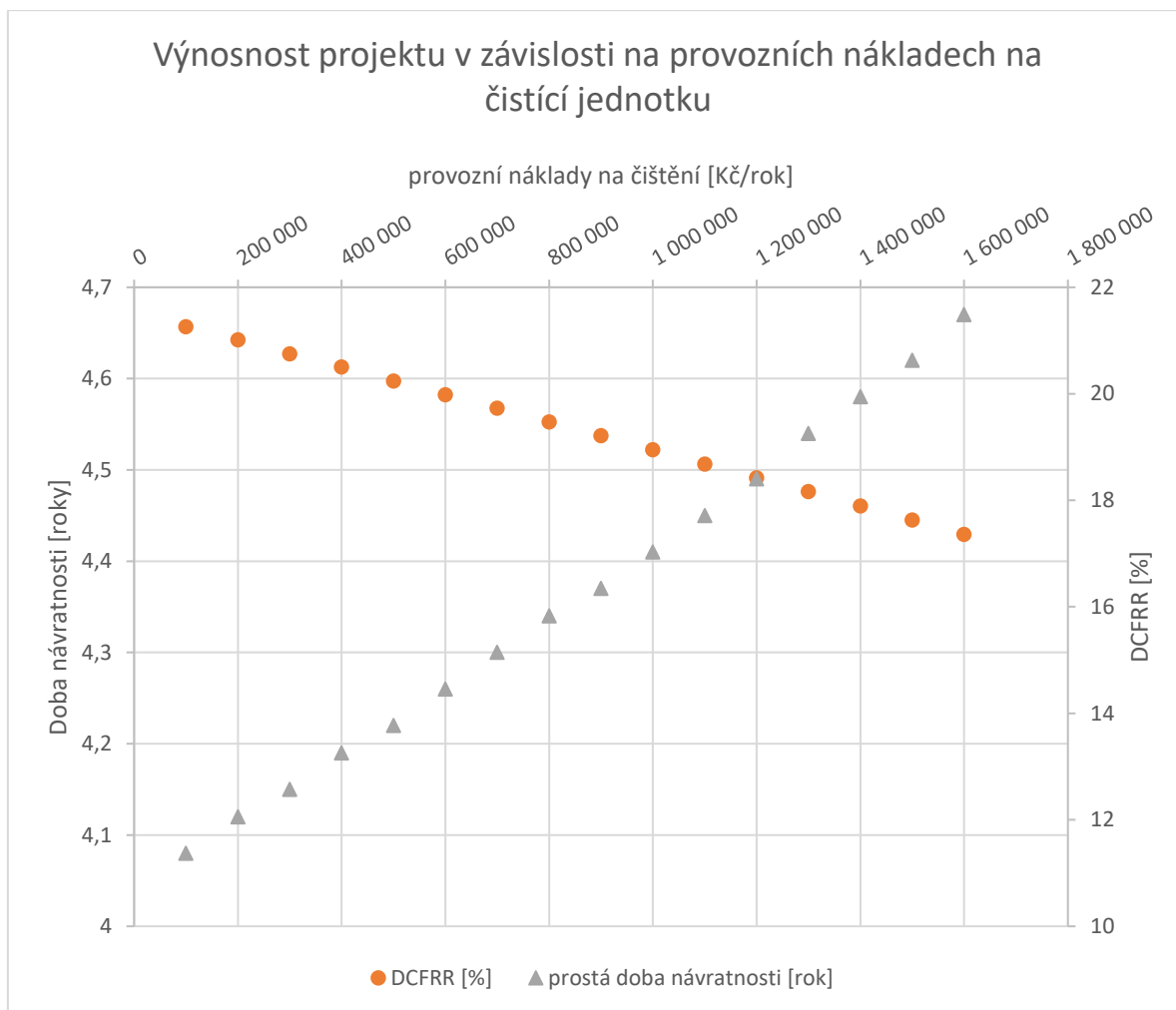


Obrázek 27: Výnosnost v závislosti na pořizovací ceně za čisticí zařízení

Evidentně se nejedná o nijak výrazný parametr, který by měl drtivý dopad na sledovaná kritéria ziskovosti. Doba návratnosti se mění jen v rozmezí zhruba 1 roku a pro nejvyšší cenu v daném rozsahu klesne hodnota DCFRR na 16,13 %. Tento parametr by tedy i při vyšších nákladech neměl ohrozit realizovatelnost projektu.

5.6.4 Výnosnost jako funkce provozních nákladů na čisticí zařízení

Vzhledem k tomu, že je uvažováno čištění absorpční a adsorpční, budou muset být vynakládány nějaké provozní náklady. Bude se jednat o náklady na případný sorbent do absorpční jednotky a na výměnu, případně regeneraci aktivního uhlí. Náklady jsou v analýze voleny v rozmezí od 100 000 Kč/rok do 1 600 000 Kč/rok.

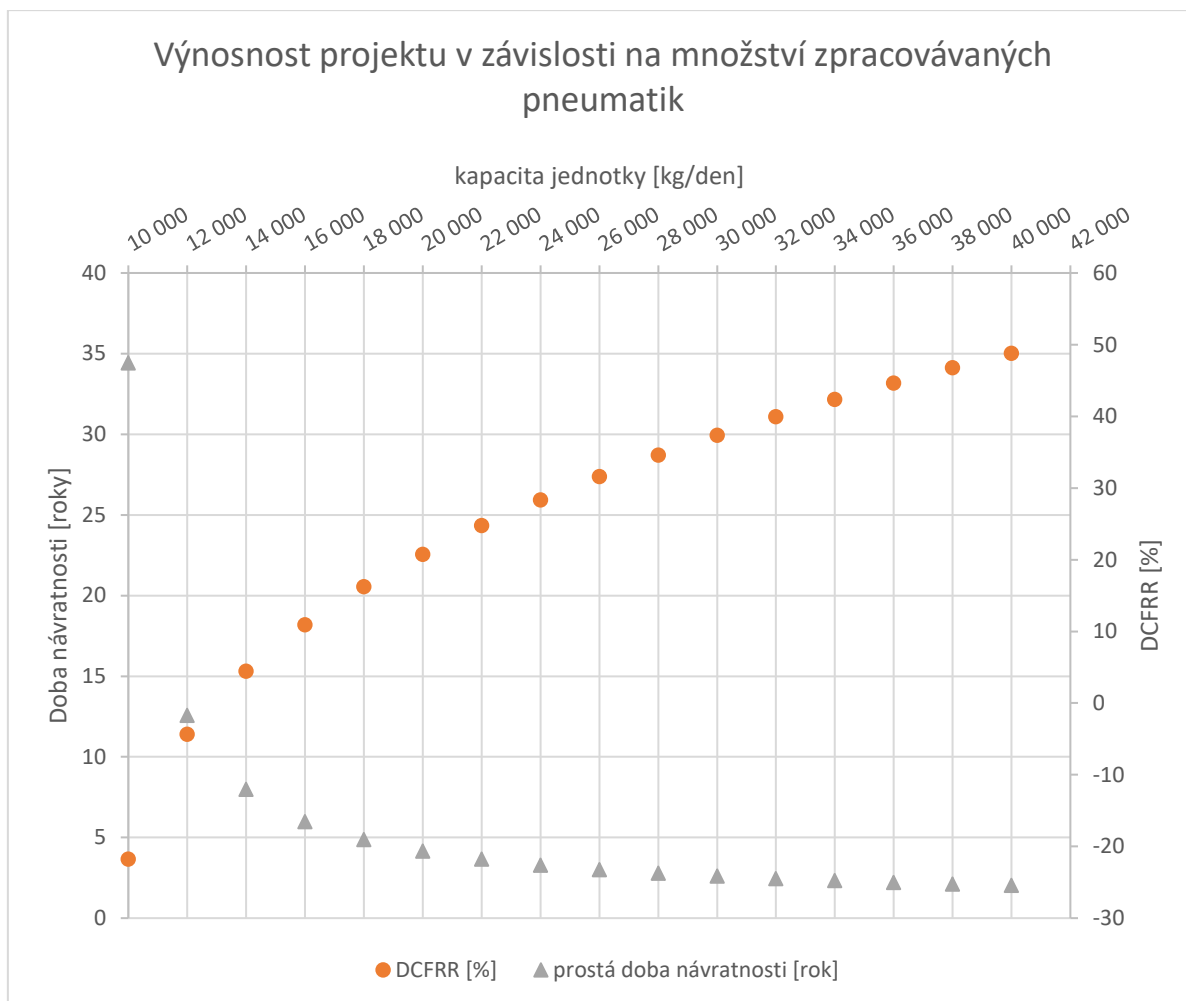


Obrázek 28: Výnosnost v závislosti na provozních nákladech za čištění plynu

Analýza pro tento sledovaný parametr ukazuje, že vliv na daná kritéria ziskovosti není nijak závratný. Doba návratnosti se mění v rozsahu zhruba 0,5 roku a při největších provozních nákladech klesne hodnoty DCFRR na 17,63 %.

5.6.5 Výnosnost jako funkce denní kapacity zpracovávaných pneumatik

Jedním ze zásadních faktorů je množství zpracovávaných pneumatik za den. Tento rozbor ukáže, od jaké kapacity se vůbec vyplatí takovou jednotku s nastavenými parametry provozovat. V této práci jsem počítal s kapacitou 20 tun/den. Pro tuto kapacitu byla nadimenzována zařízení a podle velikostí byla vypočítána a určena jejich cena. Při zadání jiné hodnoty se u většiny zařízení tyto hodnoty přepočítají, což se projeví zejména ve výnosech z produktů a na fixních nákladech. Otázkou je, jak se to projeví na výnosnosti.



Obrázek 29: Výnosnost projektu v závislosti na množství zpracovaných pneumatik

Zejména v menších množstvích má kapacita jednotky velmi významný vliv na výnosnost projektu. Pokud začneme na 10 tun kapacity za den, projekt nemá smysl vůbec realizovat. Při zvýšení kapacity o 2 tuny za den už je vidět, že se doba návratnosti zkrátí více než dvakrát, nicméně pořád by projekt nemohl po ekonomické stránce fungovat. Minimální kapacita je okolo 16 tun/den. Pro tuto hodnotu je doba návratnosti 5,98 let a DCFRR 10,94 %. Při dalším zvyšování kapacity už vypadají hodnoty optimisticky.

5.7 Popis výpočtového souboru Microsoft Excel

V souboru používám přednastavený systém značení buněk, který je patrný z následující tabulky.

Tabulka 25: Značení buněk

	Vstupní data, která je možné měnit
	Výpočet
	Buňka měněná pomocí funkce „Hledání řešení“
	Propojená buňka

Jedná se o model s materiálovou a ekonomickou bilancí. Hlavním zadávaným parametrem je množství zpracovávaných pneumatik v kg/den. Na základě této hodnoty jsou u většiny zařízení počítány velikosti zařízení a jejich cena, aby mohla být provedena ekonomická bilance celého zařízení.

Soubor se skládá z několika listů. První list s názvem „Bilance“ obsahuje schéma s označením a s názvy proudů. V tomto listu se zadává množství pneumatik, které se mají zpracovávat. Je zde i informace o průměrném složení pneumatik na vstupu. Dále se zde počítá hmotnostní průtok všech produktů podle zjištěných průměrných koncentrací a hmotnostní toky v jednotlivých prouděch. Nakonec je zde i výpočet přibližné velikosti skladu na pneumatiky podle požadovaného množství v zásobě.

Dále jsou listy odpovídající jednotlivým zařízením. Vždy je označeno, jaký proud do zařízení vstupuje a jaký vystupuje s příslušnými hmotovými toky. Dále jsou pak uvedeny parametry potřebné k dimenzování a nacenění zařízení. Většina zařízení se automaticky přepočítá, pokud se změní množství zpracovávaných pneumatik, u některých se musí údaj zadat ručně, a to proto, že nebyly k dispozici potřebné rovnice. U listu s čištěním odpadních plynů jsou pevně dané ceny, podle kterých byla dělána citlivostní analýza.

Po sérii zařízení následuje část ekonomická. Zde je nejdříve list „Výnosy“, ve kterém se zadávají ceny za produkty. Dále list s názvem „CAPEX“ označujícím Capital Expenditures jakožto fixní kapitálové náklady. V tomto listu je vidět struktura fixních kapitálových investic. Je zde možné i nastavit cenu za pozemek a index na přepočtení mezi jednotlivými roky.

V listu „Energie“ je spočítána celková spotřeba elektrické energie a chladicí výkon a pomocí jednotkové ceny stanoveny provozní náklady za rok.

Nejdůležitějším listem je pak list s názvem „Ekonomika“. V tabulce Parametry projektu jsou vidět všechny potřebné údaje potřebné k výpočtu ekonomické bilance. Jsou zde např. i procenta použita pro výpočet jednotlivých složek nákladů. Je zde i možnost nastavit financování pomocí bankovního úvěru, což se projeví jen na případných minimálních tocích hotovosti vlastních zdrojů. V další tabulce jsou přehledně seřazeny provozní výnosy, náklady, zisk a daně z příjmu. Pomocí těchto dat jsou pak vypočteny toky hotovosti projektu a pokud je projekt financován i cizími zdroji, tak se zde počítají tok hotovosti cizích zdrojů a minimální tok hotovosti vlastních zdrojů. Nakonec jsou vypočteny diskontované cashflow a diskontované kumulované cashflow projektu, čistá současná hodnota NPV a parametry ROI (návrátnost investice), DCFRR (Diskontovaná míra toku hotovosti projektu) viz. kapitola 5.7.5. Poslední parametr je ve žlutě vyznačené buňce, což znamená, že je to hodnota počítána pomocí funkce „Hledání řešení“ dostupné z nabídky Data → Citlivostní analýza.

Posledním listem je „Analýza“. V té jsou hodnoty průběhu závislosti kritérií ziskovosti na zvoleném parametru citlivostní analýzy.

6. Závěr

V této práci bylo řešeno pyrolytické zpracování odpadních pneumatik. Nejdříve byla provedena rešerše experimentálních i průmyslových zařízení. Na základě znalostí získaných při této rešerši byla navržena a zvolena procesní technologie. Hlavním výstupem z rešerše průmyslových zařízení byla data o procentuálním zastoupení jednotlivých produktů pyrolýzy, která byla zprůměrována a posloužila pro hmotové bilance celé jednotky a jednotlivých procesních proudů. Pro potřeby výpočtů byla zvolena denní kapacita zařízení 20 tun/den a na tuto kapacitu byla dimenzována technologická zařízení, která byla dále naceněna, aby mohla být provedena ekonomická bilance celého projektu. Výstupem ekonomické bilance jsou kritéria ziskovosti, konkrétně *Prostá doba návratnosti* a *Diskontovaná míra návratnosti toku hotovosti projektu*. Protože tato ekonomická kritéria mohou být snadno ovlivněna nepříliš velkými změnami některých klíčových parametrů na vstupu, jako jsou např. výkupní ceny produktů, byla pro vybrané parametry provedena citlivostní analýza, jejímž výstupem je průběh závislosti ekonomických kritérií na těchto vybraných parametrech. Nakonec je popsán výpočtový program, který byl použit pro zmíněné bilance.

Hlavní otázkou je, jestli se tedy takovýto projekt vyplatí realizovat, a pokud ne, co by bylo nutné změnit, aby to tak bylo. Pro zadané parametry, jak jsou předkládány v této práci, vychází celková ekonomická bilance poměrně optimisticky. Citlivostní analýza potvrdila předpoklad, že největší vliv na hodnoty kritérií ziskovosti mají výkupní ceny produktů. Zde je také největší slabina celého projektu, protože právě ceny těchto produktů nejsou nijak pevně dané a zaručené. Jedním z výstupů této práce je tedy stanovení přibližné minimální ceny za jednotlivé produkty, což je provedeno v části citlivostní analýzy. Pokud by nebylo možné dosáhnout alespoň takovýchto hodnot, nemělo by cenu o projektu uvažovat. Celá technologie má nicméně ještě i další rozměr, než jenom čistě investorský a vzhledem k tomu, že se jedná o zpracování a využití nebezpečného odpadu, je zde prostor pro úvahy o případné podpoře formou např. dotací, pokud by ekonomické výsledky nebyly uspokojivé.

Na závěr je také potřeba zmínit, že tento model vychází jen z hrubých prvotních výpočtů a pro přesnější hodnoty by byla potřeba provést detailnější rozbor. Také vychází z několika předpokladů, které je nutné experimentálně ověřit. Mezi ty patří zejména skutečné procentuální zastoupení produktů, hodnoty součinitele přestupu tepla u kondenzátoru a chlazení pyrolýzního uhlí, na kterých potom budou záviset velikosti teplosměnných ploch a tím pádem pořizovací ceny. Dále je potřeba mít na paměti, že projekt počítá s nulovou cenou vstupních surovin. Jedná se také

o projekt i s výstavbou budov. Počítá se také s tím, že veškerý plyn se spotřebuje v pyrolýzním reaktoru na provoz, nicméně to je další věc, kterou je potřeba určit experimentálně. Pokud by k provozu reaktoru stačila jen část produkovaného pyrolýzního plynu, projevilo by se to pozitivně na ekonomické bilanci. Experimentem by také bylo dobré ověřit množství a druh škodlivých látek ve spalinách a celkové působení na životní prostředí. Firmy sice rády prohlašují, že spalování pyrolýzního plynu probíhá za vysokých teplot a pokud je například ještě upraven, tak jsou škodliviny pod emisními limity, nicméně v dnešní době bude nejspíš ještě potřeba investovat i do čištění spalin, čímž by se celá technologie opět prodražila.

7. Zdroje

- [1] ANDĚL, Matouš. Pyrolytické zpracování odpadů. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
- [2] *ERTma: European Tyre and Rubber Manufacturers' association* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://www.etrma.org/tyres/ELTs>
- [3] CZAJCZYNSKA, Dina, Renata KRZYZYNSKA, Hussam JOUHARA, Nik SPENCER Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*. 2017, **2017**(134), 1121-1131.
- [4] MARTÍNEZ, Juan Daniel, Ramón MURILLO, Tomás GARCÍA a Alberto VESES. Demonstration of the waste tire pyrolysis process on pilot scale in a continuous auger reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 2013, **2013**(261), 637-645.
- [5] Radwan Alkhatib. Development of an alternative fuel from waste of used tires by pyrolysis. *Environmental Engineering*. Ecole des Mines de Nantes, 2014. English. <NNT : 2014EMNA0197>. <tel-01186556>
- [6] FRIGO, Stefano, Maurizia SEGGIANI, Monicca PUCCINI a Sandra VITOLO. Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *Fuel*. 2013, **2014**(116), 399-408.
- [7] Konstrukce pneumatiky. Autolexiconnet: ...s námi uvidíte pod kapotu [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
- [8] WILLIAMS, Paul T. Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*. 2013, **2013**(33), 1714-1728.
- [9] Aydın, H., İlkılıç, C., 2012. Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods. *Fuel* **102**, 605–612.
- [10] Williams, P.T., Bottrill, R.P., Cunliffe, A.M., 1998. Combustion of tyre pyrolysis oil. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* **76**, 291–301.
- [11] Islam, R.M., Hossain Joardder, M.U., Kader, M.A., Islam Sarker, M.R., 2011. Valorization of solid tire wastes available in Bangladesh by thermal treatment. In: *Proceedings of the WasteSafe 2011–2nd International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries*, 13–15 February, Khulna, Bangladesh.
- [12] Banar, M., Akyıldız, V., Ozkan, A., Cokaygil, Z., Onay, O., 2012. Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel). *Energy Conversion and Management* **62**, 22–30.
- [13] Laresgoiti, M.F., Caballero, B.M., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M.A., Chomón, M.J., 2004. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **71**, 917–934.
- [14] de Marco, I., Laresgoiti, M.F., Cabrero, M.A., Torres, A., Chomon, M.J., Caballero, B., 2001. Pyrolysis of scrap tyres. *Fuel Processing Technology* **72**, 9–22.
- [15] Rada, E.C., Ragazzi, M., Dal Maschio, R., Ischia, M., Panaitescu, V.N., 2012. Energy recovery from tyres waste through thermal option. *Scientific Bulletin, Politehnica University of Bucharest, Series D: Mechanical Engineering* **74**, 201–210

- [16] Williams, P.T., Besler, S., Taylor, D.T., 1990. The pyrolysis of scrap automotive tyres: the influence of temperature and heating rate on product composition. *Fuel* 69, 1474–1482.
- [17] Leung, D.Y.C., Yin, X.L., Zhao, Z.L., Xu, B.Y., Chen, Y., 2002. Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product. *Fuel Processing Technology* 79, 141–155.
- [18] Aylón, E., Fernández-Colino, A., Navarro, M.V., Murillo, R., García, T., Mastral, A.M., 2008. Waste tyre pyrolysis: comparison between fixed bed reactor and moving bed reactor. *Industrial Engineering Chemistry Research* 47, 4029–4033.
- [19] Galvagno, S., Casu, S., Casabianca, T., Calabrese, A., Cornacchia, G., 2002. Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. *Waste Management* 22, 917–923.
- [20] Li, S.Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J.H., Cen, K.F., 2004. Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor. *Industrial Engineering Chemistry Research* 43, 5133–5145.
- [21] Kaminsky, W., Sinn, H., 1980. Pyrolysis of plastic waste and scrap tyres using a fluidised bed process. In: Jones, J.L., Radding, S.B. (Eds.), *Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass*. American Chemical Society Symposium Series 130, Washington DC, US.
- [22] Kaminsky, W., 1985. Thermal recycling of polymers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 8, 439–448.
- [23] Kaminsky, W., Mennerich, C., 2001. Pyrolysis of synthetic tire rubber in a fluidised bed reactor to yield 1,3-butadiene, styrene and carbon black. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 58, 803–811.
- [24] Kaminsky, W., Predel, M., Sadiki, A., 2004. Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed. *Polymer Degradation and Stability* 85, 1045–1050.
- [25] Kaminsky, W., Mennerich, C., Zhang, Z., 2009. Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85, 334–337.
- [26] Williams, P.T., Brindle, A.J., 2003a. Fluidised bed pyrolysis and catalytic pyrolysis of scrap tyres. *Environmental Technology* 24, 921–929.
- [27] Dai, X., Yin, X., Wu, C., Zhang, W., Chen, Y., 2001. Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor. *Energy* 26, 385–399.
- [28] Evans, A., Evans, R., 2006. *The Composition of A Tyre: Typical Components*. Waste & Resources Action Programme. Banbury Oxford, UK.
- [29] Kyari, M., Cunliffe, A., Williams, P.T., 2005. Characterisation of oils, gases and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. *Energy and Fuels* 19, 1165–1173.
- [30] Cypres, R., Bettens, B., 1989. Production of benzoles and active carbon from waste rubber and plastic materials by means of pyrolysis with simultaneous postcracking. In: Ferrero, G.L., Maniatis, K., Buekens, A., Bridgwater, A.V (Eds.), *Pyrolysis and Gasification*. Elsevier Applied Science, London.
- [31] Williams, P.T., Besler, S., 1995. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. *Fuel* 74, 1277–1283.

- [32] Seidelt, S., Muller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., 2006. Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 75, 11–18.
- [33] Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G., 2008a. The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines. *Waste Management* 28, 2743–2749.
- [34] Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G., 2008b. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis-oil blends. *Fuel Processing Technology* 89, 152–159.
- [35] Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G., 2008c. Influence of distillation on performance, emission, and combustion of a DI diesel engine using tyre pyrolysis oil diesel blends. *Thermal Science* 12, 157–167.
- [36] Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G., 2008d. A comparative study on the performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis oil-diesel blends. *Fuel* 87, 2111–2121.
- [37] JANTARAKSA, Nut, Pattarapan PRASASSARAKICH, Prasert REUBROZCHAREON a Napida HINCHIRANAN. Cleaner alternative liquid fuels derived from the hydrodesulfurization of waste tire pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*. 2015, 2015(95), 424-434.
- [38] Dirk Gerlach Engineer [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.dgengineering.de/Index-E.html>
- [39] Spalovny v přestrojení: Případové studie zplyňování, pyrolýzy a plazmové technologie v Evropě, Asii a USA. 2006.
- [40] VERMA, M., S. GODBOUT, S. K. BRAR, O. SOLOMATNIKOVA, S. P. LEMAY a J. P. LAROUCHE. Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies. DOI: 10.1155/2012/542426. ISBN 1687-806X. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2012/542426/>
- [41] [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.eeducation.psu.edu/egee439/node/537>
- [42] [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.ievb.tu-clausthal.de/en/equipment/specially-developed-methods-for-fuel-characterization/>
- [43] Plastic advanced recycling corp. [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.plastic2x.com/>
- [44] RESEM [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.pyrolysisplant.net/>
- [45] SUNNY GROUP: ..for a green future [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.sunygroup.cn/>
- [46] FAB INDIA INDUSTRIES [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.fab-india.in/waste-recycling-project.html>
- [47] HUAYIN Group [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.huayinenergy.com/>
- [48] Reklaim [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://reklaim.com>
- [49] Mobius [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.mobius.ua/en/>
- [50] Splainex Ecosystem [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <https://www.splainex.com/waste-to-energy-pyrolysis-turnkey-project.html>

- [51] BESTON: Engineering for Tommorow's World [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://tyrepyrolysisplants.net/>
- [52] TPP: Tyre Pyrolysis Plant [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.tyrepyrolysisplant.com/products/>
- [53] Technokompleks [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.tkomplex.ru/en>
- [54] ERVO EnviTech: Ekologická recyklace vysokomolekulárních odpadů [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://ekorecyklace.cz/>
- [55] TOWLER, Gavin P. a R. K. SINNOTT. Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design. Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, c2008. ISBN 978-0-7506-8423-1.
- [56] ROUŠAR, Ivo. Projektové řízení technologických staveb. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2602-1.
- [57] Eltma: ELT Management Company Czech Republic s.r.o. [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <https://www.eltma.cz/>
- [58] Lignocelulózová bioetanolová biorafinerie. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
- [59] The intermediate pyrolysis of de-inking sludge to produce a sustainable liquid fuel. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013, 2013(102), 24-32.
- [60] Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů, část 1. Ostrava, 2010.
- [61] [online]. [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <https://lh3.googleusercontent.com/3gmqWsdHSjNnFdZtmvzfGQcVI8djAmZ3toykknr7rOoRTcOt5A7wcG-FobibodgobS9PfbC=s114>

Seznam příloh

- (1) PFD schéma procesu (001)
- (2) Výpočtový program (Pyrolýza pneumatik.xlsx)