

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Experimentální dvoustupňový free-fall elektrostatický
separátor plastových materiálů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jan BRABEC
Osobní číslo: E15N0082P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Technická ekologie
Název tématu: Experimentální dvoustupňový free-fall elektrostatický separátor plastových materiálů
Zadávající katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

Zásady pro vypracování:

1. Prozkoumejte současný stav plastového odpadového hospodářství.
2. Popište princip klasického jednostupňového free-fall elektrostatického separátoru plastových materiálů.
3. Popište princip, navrhnete a realizujte dvoustupňový free-fall elektrostatický separátor plastových materiálů.
4. Experimentálně ověřte funkčnost realizovaného zařízení.
5. Zhodnoťte výsledky experimentu a vyvoďte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. G. Dodbiba, J. Sadaki, A. Shibayana, and T. Fujita, "Sorting Techniques for Plastics Recycling," *The Chinese Journal Process Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 186-191, 2006.
2. A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Roll-Type versus Free-Fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles," *IEEE Transactions Industry Application*, Vol. 46, No. 4, pp. 1564-1569, 2010.
3. M. Saeki, "Triboelectric Separation of Three-Component Plastic Mixture," *Particulate Science and Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 494-506, 2008.
4. D. K. Yanar and B. A. Kwetkus, "Electrostatic Separation of Polymer Powders," *Journal of Electrostatics*, Vol. 36, no. 273, pp. 257-266, 1995.
5. V. Štarman, J. Kacerovský, F. Mach, P. Karban and L. Doležel "Experimental Study of Triboelectric Separator for Mixture of Plastic Particles," *Proc. ISTET 2013, Pilsen, Czech Republic*, 2013.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Kacerovský

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

19. května 2017


Doc. Ing. Jiří Hameršpílov, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Písní dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na separaci plastů s využitím dvoustupňového elektrostatického free-fall separátoru. Pro tuto práci byl přestaven původní jednostupňový separátor. Směsi byly vybrány na základě předešlých měření na jednostupňovém separátoru v rámci mé bakalářské práce. Cílem práce je ověření teorie o získání lepších výsledků s využitím složitějšího dvoustupňového separátoru. Výstupy této práce jsou dále předány a zohledněny v projektu stavby průmyslového separátoru.

Klíčová slova

Elektrostatická separace, triboelektrický efekt, free-fall separátor, měření, účinnost, čistota, plastové částice, směsi plastových částic

Abstract

Submitted master thesis is focused on separation of plastic using a two-stage free-fall separator. For the purpose of this thesis the experimental one-stage free-fall separator was rebuilt. The plastic mixtures were selected by on previous measurements on the one-stage separator in my bachelor thesis. The aim of this work is verification of theory about achievement of better resets with usig a two-stage separator. The outputs of this work are further transmitted and taken in to the project of building an industrial separator.

Keywords

Electrostaticseparation, triboelectriceffect, free-fallseparator, measurement, effectiveness, purity, plasticparticles, mix ofplasticparticles

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.5.2017

Bc. Jan Brabec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Kacerovskému za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Velké poděkování náleží mé rodině za podporu, trpělivost a povzbuzování po dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 ÚVOD	9
2 SBĚR A SEPARACE PLASTOVÉHO ODPADU	11
2.1 PLASTOVÝ ODPAD.....	11
2.2 TECHNOLOGIE PRO SEPARACI PLASTŮ	12
2.2.1 <i>Manuální separace</i>	12
2.2.2 <i>Automatizovaná separace</i>	12
2.3 ELEKTROSTATICKÁ SEPARACE.....	14
2.3.1 <i>Deskový separátor (Plate-type)</i>	15
2.3.2 <i>Bubnový separátor (Roll-type)</i>	15
2.3.3 <i>Vertikální separátor (Free-fall)</i>	16
3 MATEMATICKÝ MODEL	18
3.1.1 <i>Jednostupňový separátor</i>	19
3.1.2 <i>Dvoustupňový separátor</i>	21
4 EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROSTATICKÉ SEPARÁTORY FREE-FALL	24
4.1 POPIS PŮVODNÍHO JEDNOSTUPŇOVÉHO FREE-FALL SEPARÁTORU	24
4.1.1 <i>Nabíjecí zařízení</i>	24
4.1.2 <i>Separátor</i>	25
4.1.3 <i>Sběrné kolektory</i>	26
4.2 POPIS DVOUSTUPŇOVÉHO FREE-FALL SEPARÁTORU.....	27
4.2.1 <i>Separátor</i>	27
4.2.2 <i>Sběrné kolektory</i>	29
5 POSTUP A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	30
5.1 POSTUP MĚŘENÍ	31
6 VLASTNÍ MĚŘENÍ	33
6.1 PVC A PS – LEDNIČKY	33
6.1.1 <i>PVC a PS – ledničky, připojené všechny elektrody</i>	33
6.1.2 <i>PVC a PS – ledničky, připojené pouze vnější elektrody</i>	34
6.2 POM A ABS	36
6.2.1 <i>POM a ABS, připojené všechny elektrody</i>	37
6.2.2 <i>POM a ABS, připojené pouze vnější elektrody</i>	38
6.3 PET A HDPE	40
6.3.1 <i>PET a HDPE, připojené všechny elektrody</i>	40
6.3.2 <i>PET a HDPE, připojené pouze vnější elektrody</i>	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

T [°C]	Teplota
rH [%]	Vzdušná vlhkost
Pur [-,%]	Čistota separace
Eff [-,%]	Efektivita separace
m [g]	Hmotnost
TPC	Copolyester termoplastický elastomer
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PVC	Polyvinylchlorid
PC/ABS	Polykarbonát/akrylonitril-butadien-styren
PS	Polystyren
PA6 + PA6,6	Polyamid
POM	Polyoxymetylen
PS HIPS	Houževnatý polystyren
PET	Polyethylentereftalát
HDPE	Vysokohustotnípolyethylen
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
PS	Polystyren
MATLAB	Matrix laboratory

1 Úvod

Když v roce 1862 Alexandr Parkes představil na Velké výstavě v Londýně svůj objev nitrát celulosy, nikdo netušil, jak významnou součástí našeho života se plasty stanou. Postupně se však začaly objevovat mnohé další plasty s různými vlastnostmi. Po první světové válce to byly například vinylové plasty (PVC, polystyren), ve 30. letech minulého století pak první polyamid nylonu. Masová výroba a použití plastů však přišlo až po druhé světové válce.

Tyto materiály se staly levnou a snadno využitelnou náhradou klasických materiálů, např. dřeva, skla, oceli a jiných kovů. Stále rostoucí využití plastů však s sebou nese také velké problémy. Zdroje surovin, ze kterých se většina plastů vyrábí, jsou omezené, a především plastový odpad dlouhodobě zatěžuje naše životní prostředí. Než se rozloží obyčejný igelitový sáček, uplyne 25 let. Plastový kelímek se rozkládá 70 let, PET lahve až 100 let a polystyren dokonce desetitisíce let. [2] Některé druhy, například PVC, dokonce při rozkladu uvolňují do okolí škodlivé látky jako například chlorovodík, dioxiny, hexachlorbenzen a polyaromatické uhlovodíky. [3]

Z toho plyne, že udržitelný rozvoj výroby, zpracování a spotřeba plastů, se neobejdou bez efektivního řešení využití odpadů po skončení životnosti výrobků z těchto hmot, i odpadu, který při výrobě plastových výrobků vzniká. Podle materiálu a momentálních možností lze přistoupit k opětovnému použití výrobků, recyklaci, kompostování, energetickému využití a skládkování. [1]

Základem efektivního využití a opětovného zpracování plastů je kvalitní separace jednotlivých druhů. Nejjednodušším a v současné době také nejrozšířenějším způsobem je separace na linkách, kde lidé třídí svezenny odpad ručně. Tento způsob je však velmi pracný a pro dělníky také nepříjemný. Proto je snaha tuto lidskou práci nahradit automatickými linkami. Přestože již existuje velké množství různých technologií, pracujících na mnoha různých fyzikálních i chemických principech, stále je nutné hledat jednodušší, ekologičtější a levnější způsoby, které by umožnily separovat co nejširší škálu odpadních surovin.

Elektrostatická separace nabízí zajímavé možnosti. Nejen že lze separovat jednotlivé druhy plastů, ale i oddělovat kovy a plasty. To vše na poměrně jednoduchém principu, který slibuje malou poruchovost a nabízí možnost třídít drobný odpad vzniklý rozdrčením výrobků skládajících se z většího množství druhů materiálů. Bohužel jednostupňové separátory vykazují chybovost, která při třídění nedodává dostatečně čistý separát u některých dvojic materiálů. Z tohoto důvodu se zde zabývám možností rozšířit jednostupňový elektrostatický separátor o další stupeň.

Plasty použité v tomto experimentu byly získány od firem Puruplast a ECO-F. Mají tvar granulátu či drti, a jednotlivé informace o velikosti a hustotě jsou uvedené vždy u jednotlivých směsí. U některých plastů je známo jejich původní využití. U těchto plastů je tak vždy zaznačeno v textu a tabulkách.

2 Sběr a separace plastového odpadu

2.1 Plastový odpad

Komunální odpad

Základem úspěšné recyklace odpadních plastů z komunálního odpadu je zodpovědné třídění v domácnostech. Do žluté popelnice umístěné na sběrných místech patří fólie, sáčky, plastové tašky, sešlápnuté PET lahve, obaly od pracích, čistících a kosmetických přípravků, kelímky od jogurtů a mléčných výrobků, obaly od CD disků, menší kusy pěnového polystyrenu a další výrobky z plastů. Přesný seznam plastů sbíraný v určité lokalitě se může částečně lišit podle firmy, která se svozem a zpracováním zabývá. Všechny tyto předměty by neměly být mastné ani znečištěné od barev nebo jiných chemikálií. Odpad ze žlutých popelnic je svážen svozovými vozy k dotřídění, jež probíhá většinou na manuálních dotřídovacích linkách. Alternativou sběru plastů je sběr jednoho vybraného druhu, například plastová víčka, která vykupují specializované firmy.

Průmyslový a technologický plastový odpad

Významnou součástí odpadového hospodářství v oblasti plastů je průmyslový odpad, vznikající při výrobě z tohoto materiálu (například zmetky, přetoky, odřezky, obrusy a další). Jako o tzv. vratném neboli technologickém odpadu se hovoří o odpadu vznikajícím při likvidaci strojů a výrobků (například aut, ledniček, oken nebo elektroniky). Ten je většinou zpracován přímo specializovanou firmou zabývající se touto činností, nebo odvezen k dalšímu zpracování. Zákazník za tuto službu platí již při koupi výrobku formou tzv. recyklačního příspěvku (PHE).

Odpad a výrobky z 3D tiskáren

Většina plastů používaných pro 3D tisk technologií FDM je recyklovatelných. Poměrně vysoké ceny materiálu ve formě vlákna vedou k potřebě využít k tisku již vytisknuté a nepovedené modely. V současné době se objevují speciální zařízení schopná z granulí a kousků plastů vytvářet potřebné vlákno v dostatečné kvalitě. Jedním z takových zařízení je například extrudér značky Recyclebot. Toto řešení, využívané přímo v místech, kde se tisk

provádí, šetří mnoho práce při třídění odpadu i energie potřebné pro přepravu odpadu k místu vytvoření nového materiálu. [20]

Materiály pro tisk jako PLA, ABS, PET, nylon, TPU či PC jsou samozřejmě recyklovatelné také s dalším průmyslovým nebo komunálním odpadem. Nevýhodou ale může být chybějící označení plastu, ze kterého je výrobek vytištěn.

V budoucnu bude také významným problémem třídění a druhotné zpracování kompozitních materiálů do 3D tiskáren. Již nyní totiž lze jako plniva využívat velké množství materiálů (např. písky, mramorové prášky, dřevěné prášky, keramické prášky, sklo, papír). Plniva ovlivňují fyzikální vlastnosti materiálů a tím ovlivní i chování těchto materiálů při separaci.

2.2 Technologie pro separaci plastů

Zpracováním plastů z průmyslového i komunálního odpadu se zabývají specializované firmy, které mají technologie vhodné pro jejich ekologické zpracování.

V České republice se na tuto činnost specializují například firmy Puruplast, ECO-F, Global recycling či Jelínek-trading, které vyrábí nejen granulát, ale i finální výrobky jako sáčky na odpad, kompostéry, zahradní dlaždice a jiné. Kvalita a následně i cena granulátu je závislá především na kvalitě třídění, které probíhá různými způsoby. [5]

2.2.1 Manuální separace

Ze směsi plastů unášených pohyblivým pásem se ručně třídí vybrané plasty, z nichž každý má speciální samostatné zpracování. Jedná se především o PET lahve, polystyren, víčka z PET lahví a další. Pracovníci také z pásu odstraňují jiný než plastový odpad. Vytřízené druhy plastů, včetně zbylé směsi plastových odpadů, se lisují do balíků a odváží k dalšímu zpracování a využití (výroba předmětů, granulátů, výroba energie). [6]

2.2.2 Automatizovaná separace

Automatické třídění využívá různé fyzikální, mechanické a chemické principy, pro oddělení jednoho druhu plastu od ostatních. Popřípadě pro roztřídění plastů do několika skupin podobných vlastností. [7] [8]

Fluidní separace

Je vhodná pro oddělení pěnových plastů, jejichž hustota je výrazně nižší než hustota ostatního separovaného materiálu. Je zde využito kmitavého pohybu nakloněného síta a současného profukování proudem vzduchu, který lehčí částice nadnáší a tím dojde k jejich separaci. Tímto způsobem je možné oddělit jeden druh plastů, nebo odpad rozdělit na několik částí odpovídající hustoty. [21]

Flotačně sedimentační postup

Povrchy jednotlivých plastů mají odlišné fyzikálně-chemické vlastnosti. Flotačně sedimentační postup separace vychází z těchto rozdílných vlastností povrchů plastů určených k roztřizení. Odlišné povrchové napětí způsobuje odlišnou smáčivost. Samotné třídění pak probíhá na fázovém rozhraní (například voda vzduch), kdy smáčivé látky klesají ke dnu, zatímco málo smáčivé látky zůstávají na povrchu kapaliny nebo v pěně (pěnová flotace je používána nejčastěji). Různé plasty jsou rozdílně smáčivé pro jednotlivé kapaliny. [9] Například pro oddělení PP, PE od PS, PVC se využívá voda, zatím co pro oddělení HDPE od PP, LDPE je nutné využívat speciální tekutiny. [7]

Hydrocyklony

Umožňují oddělení drobných zrn látek s různou hustotou pomocí odstředivých sil. Tyto síly by v gravitačním poli Země měly malý vliv na dráhu jednotlivých částic, a proto se zde využívá odporu (viskozity) vody.

Spektroskopické metody (NIR, FTIR)

Tyto metody se využívají například k oddělení chlorovaných plastů. Při využití této metody se odpad nedrtí.

NIR (Near-infrared) spektrometry - zobrazení v blízké infračervené oblasti

Každý materiál po osvětlení odráží záření v infračervené oblasti spektra, které se liší podle druhu materiálu a je viditelné lidským okem. Senzor odraz zachytí a předá ke zpracování softwaru. Poté je předmět linkou vyřazen. [10]

FTIR (Fourier transform infrared) spektrometry – infračervené zobrazení s Fourierovou transformací

Různé látky pohlcují různé vlnové délky světla. V případě plastů se jedná o frekvence, které odpovídají kvantům energií potřebným ke změně vibrační a rotační energie molekul (tyto energie jsou kvantovány). Tato kvanta jsou pro látku charakteristická. Výhodou interference spektra je využití celého paprsku. Pro převedení do klasického spektra je nutné využití matematické úpravy. Tento způsob umožňuje měření i silně absorbujících vzorků. [11]

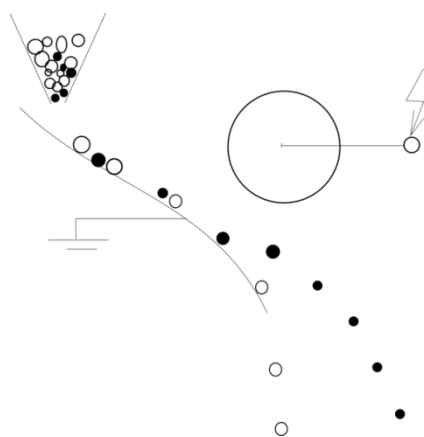
2.3 Elektrostatická separace

Elektrostatická separace se využívá pro oddělení jednotlivých složek suchých zrnitých směsí látek vodivých i nevodivých a vychází z Coulombova zákona. Využívá sil, které působí na elektricky nabitá tělesa v elektrickém poli ve spojení s dalšími silami (např. gravitační, odstředivá), a které ovlivňují funkčnost jednotlivých zařízení. Podle vlastností látek určených k separaci, existuje několik odlišných technologií. Ty se liší jednak způsobem pohybu jednotlivých částic v průběhu separace, ale také způsobem jejich nabíjení. Vždy se však jedná o separaci skládající se ze tří základních fází, které na sebe logicky navazují. Jsou to nabíjení, ovlivnění dráhy a samotná separace.

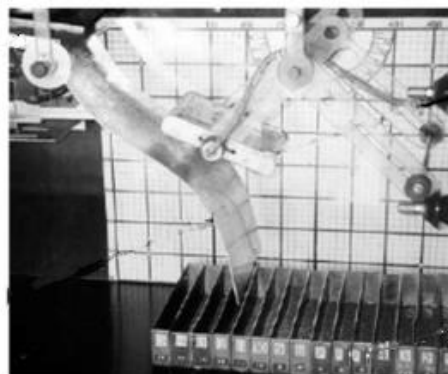
2.3.1 Deskový separátor (Plate-type)

Deskový separátor se využívá pro separaci drobnozrnných vodivých částic od větších částic nevodivých látek. Na obrázku č. 1 je znázorněn princip tohoto separátoru. Směs vstupuje pomocí vibračního podavače na vhodně prohnutou a uzemněnou desku, po níž díky gravitaci kloužou směrem dolů. Nad deskou je umístěna vysokonapěťová elektroda, jejímž působením dochází k nabití pohybujících se částic na principu vodivostní indukce.

Nevodivé nebo málo vodivé částice tento náboj nezískají. Elektroda je tedy nijak neovlivňuje při jejich dalším pohybu. Nadále však působí na nabitě částice, které k sobě přitahuje. Vychyluje je z jejich dráhy a ony tak dopadnou dále od desky, čímž dochází k jejich separaci. Účinnost tohoto separátoru je ovlivněna tvarem a náklonem uzemněné desky, jakož i napětím na elektrodě a jejím postavením vůči uzemněné desce.



Obrázek 1 Princip deskového separátoru [12]



Obrázek 2 Deskový separátor [13]

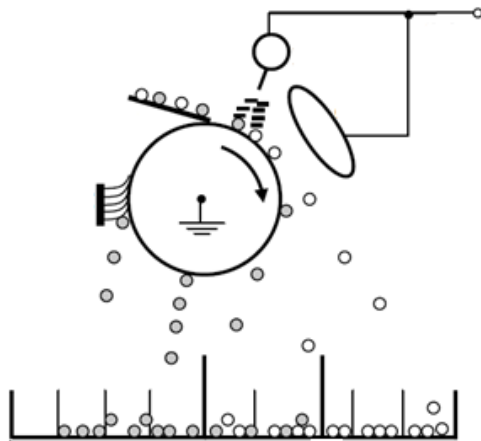
2.3.2 Bubnový separátor (Roll-type)

Svojí stavbou a principem je tento typ vhodný především pro separaci granulovaného separátu nebo jemné drti elektricky vodivých látek od nevodivých. Například pro recyklaci desek tištěných spojů.

Na obrázku č.3 vidíme schémato tohoto typu separátoru. Materiál do něj vstupuje vibračním dopravníkem, který ve slabé vrstvě sype částice na uzemněný otáčející se válec. Na tomto válci dochází k jejich zelektrizování pomocí sršící elektrody, které se nachází nad válcem a je připojena k vysokému napětí. [18] Takto ionizované molekuly plynů, které vznikají při

korónovém výboji, dále ionizují částice na válci. Nevodivé částice zůstávají nabité, na rozdíl od vodivých, které se na uzemněném válci okamžitě vybijí. Nabité nevodivé částice jsou přitahovány elektrickou silou k válci a válcem jsou unášeny dál. Od válce tyto částice oddělí vhodně umístěný smetáček, a separát padá do příslušného koše. Na vodivé částice s nulovým nábojem působí pouze gravitační a odstředivá síla. Tedy opouští válec a padají dolů samovolně.

Pro zdokonalení oddělení vodivých materiálů se do prostoru za sršící elektrodu umísťuje jedna nebo více elektrostatických elektrod. Ty, na principu elektrostatické indukce, zelektrizují vodivé částice opačným nábojem a poté přitahují tyto padající částice. Tím se rozšíří zóna, do které separát padá a zvyšuje se tak kvalita separace. [18]



Obrázek 3 Schéma bubnového separátoru[15]

Obrázek 4 Bubnový separátor[15]

2.3.3 Vertikální separátor (Free-fall)

Vertikální separátor je vhodný pro separaci drobnozrnných směsí nevodivých materiálů. Částice se v tomto typu separátoru nabíjí samovolně při průchodu nabíjecím zařízením založeném na principu triboelektrického jevu. Ten nastává v rotující trubici, uvnitř které do sebe navzájem naráží jednotlivé částice směsí. Ty se třou nejen o sebe, ale i o stěnu trubice. Díky vysokému počtu srážek je náboj dostatečně velký, aby byla možná následná separace pomocí elektrického pole. [16]

To vzniká mezi nabitými plechovými elektrodami obdélníkového tvaru, připojenými ke zdroji vysokého stejnosměrného napětí. Zde na padající částice působí Coulombovy síly, jež elektricky nabitě částice vychylují z původně svislého směru. K vychýlení dochází v obou směrech, podle náboje jednotlivých částic.

Triboelektrický jev

Triboelektrický jev je jedním z typů kontaktní elektrifikace, při kterém nevodivé materiály získávají elektrický náboj. Tento triboelektrický náboj vzniká třením povrchu jednoho materiálu s povrchem materiálu jiného.

Pro určení vznikajícího náboje se využívají triboelektrické řady. V těch jsou ve vyšších polohách látky relativně kladně nabitě oproti látkám v nižších polohách řad, které jsou relativně záporně nabitě. Důležitou charakteristikou těchto látek je triboelektrická afinita A_{TE} definovaná vztahem

$$A_{TE} = Q_{TE} / W_{TL}, \quad (1)$$

v němž Q_{TE} je triboelektrický náboj a W_{TL} je práce spotřebovaná na vytvoření náboje Q_{TE} . [17]

Potřebná práce je dodávána pohybem nabíjecího zařízení a její velikost je závislá na rychlosti otáčení a době nabíjení. Velikost náboje vznikajícího na jednotlivých částicích ovlivňuje její povrch, drsnost, působící síly a vnější podmínky (například vlhkost).

3 Matematický model

Numerické řešení matematického modelu formulovaného níže, bylo provedeno ve výpočetním programu MATLAB a je ilustrativním příkladem teoretického pohybu částice v separátoru. Matematický model je vytvořen pro zjednodušený model separátoru, který má kolmé elektrody. Matematický model je tedy formulován pro zjednodušený model separátoru, který má rovnoběžné elektrody.

Zjednodušený výpočet dráhy částice v hlavní části separátoru

K třídění částic dochází v hlavní části separátoru, v prostoru mezi elektricky nabitými elektrodami. Elektricky nabitá částice o náboji Q vstupují mezi elektrody podavačem, který má souřadnice $[0,0]$. Počáteční rychlost částic je velmi malá a proto ji můžeme zanedbat $v(0)=0$. Od okamžiku, kdy částice opouští podavač, ovlivňuje její dráhu několik sil.

Gravitační sílu působící svisle dolů popisuje rovnice

$$F_g = mg, \quad (2)$$

kde m je hmotnost částice a g je gravitační zrychlení ($g = 9,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Aerodynamický odpor částic, který působí proti směru pohybu částice, je vidět v rovnici číslo (3). Tento odpor je možné pro zjednodušený model zanedbat. Výpočet této síly je ohledem na různorodý tvar částic komplikovaný. Ve zjednodušeném případě lze uvažovat rovnici ve tvaru

$$F_a = -v \frac{1}{2} \rho c S v, \quad (3)$$

kde c je frikční koeficient (závisející na geometrii částice), ρ představuje hustotu okolního vzduchu, S je charakteristický povrch částice a v označuje modul její rychlosti.

Elektricky nabitě elektrody mezi sebou vytváří elektrické pole, které vychyluje jednotlivé částice podle polarit a velikosti jejich náboje. Coulombovy síly působící mezi jednotlivými padajícími částicemi jsou ve srovnání s ostatními působícími silami velmi malé a proto je lze zanedbat.

Coulombova síla působící na jednotlivé částice v elektrickém poli je dána vztahem:

$$\vec{F}_e = F_{ex} = QE_x = Q \cdot \frac{U}{d} \quad (4)$$

kde Q je elektrický náboj, E_x je intenzita elektrického pole, U je elektrické napětí a d je vzdálenost.

3.1.1 Jednostupňový separátor

Rychlost pohybu částice je dána rovnicí

$$\frac{ds}{dt} = v, \quad (5)$$

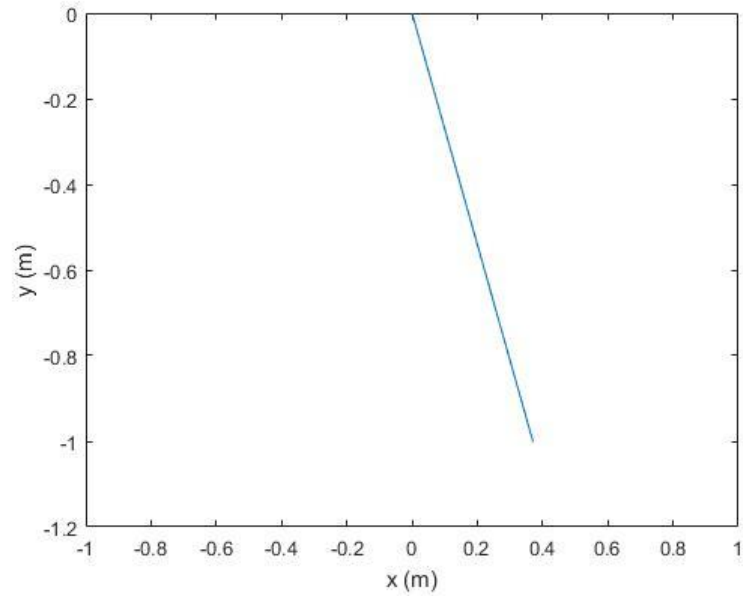
kde s je trajektorie, t je čas a v je rychlost. Pohyb částice je tedy popsán pohybovou rovnicí ve tvaru

$$m \frac{dv}{dt} = \sum F = F_e + F_g, \quad (6)$$

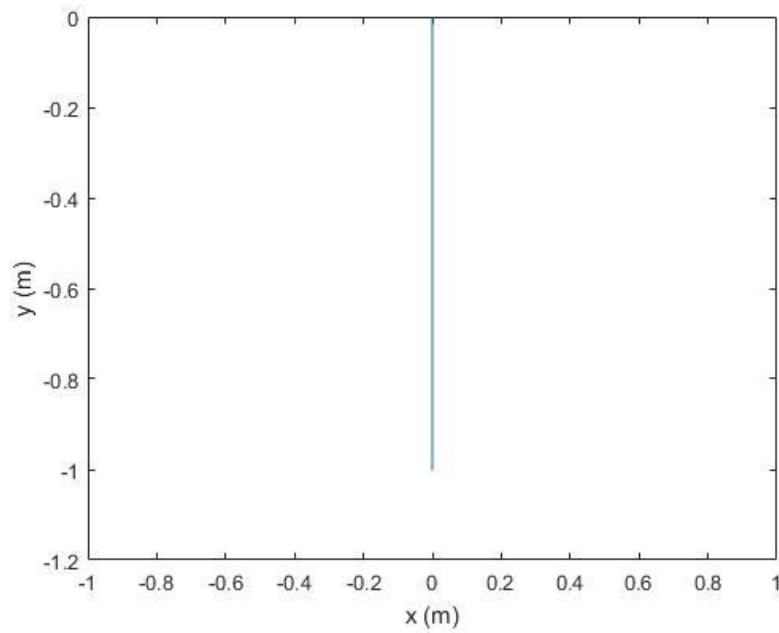
kde F_e je Coulombova síla, F_g je gravitační síla. Počáteční podmínky lze formulovat ve tvaru

$$v(0)=0, s(0)=0.$$

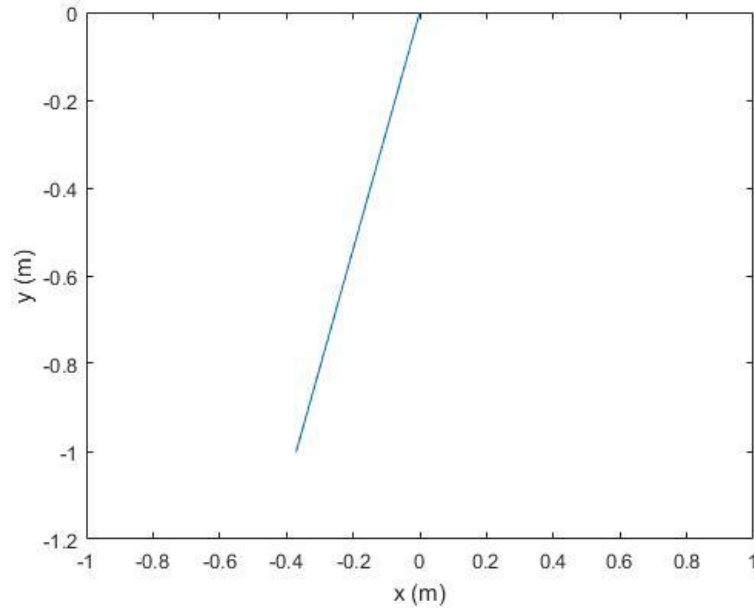
Pro ilustrativní výpočet byly zvolené následující hodnoty $U = 45\text{kV}$, $d = 0,1\text{m}$. Rozsah řešení je dán konstrukcí separátoru, jehož výška je 1m.



Obrázek 5 Grafické znázornění dráhy částice s $Q = 8 \text{ nC}$



Obrázek 6 Grafické znázornění dráhy částice s $Q = 0 \text{ nC}$



Obrázek 7 Grafické znázornění dráhy částice $sQ = -8 \text{ nC}$

3.1.2 Dvoustupňový separátor

Na obrázku č. 18 je vidět, že tento separátor se liší od jednostupňového, navýšením počtu elektrod, jejichž horní hrana se nachází ve vzdálenosti 0,4 m od podavače. Přidáním těchto elektrod dochází k rozdělení oblasti třídění na dvě části s rozdílnou velikostí Coulombovských sil.

Coulombova síla v první části separátoru je vyjádřena rovnicí

$$y \leq -0,4 : \vec{F}_e = F_{\text{ex}} = QE_x = Q \cdot \frac{U}{d_1}, \quad (7)$$

kde d_1 je vzdálenost elektrod v prvním stupni separátoru. Následující rovnice č.(8) vyjadřuje Coulombovu sílu působící na pohybující se částici v oblasti se čtyřmi segmenty elektrod druhého stupně.

$$y > -0,4 : \vec{F}_e = F_{\text{ex}} = QE_x = Q \cdot \frac{U}{d_2} \quad (8)$$

kde d_2 je vzdálenost elektrod v druhém stupni separátoru.

Pohyb částice je popsán rovnicí

$$m \frac{dv}{dt} = \Sigma F = F_e + F_g \quad (11)$$

kde F_e je Coulombova síla, F_g je gravitační síla.

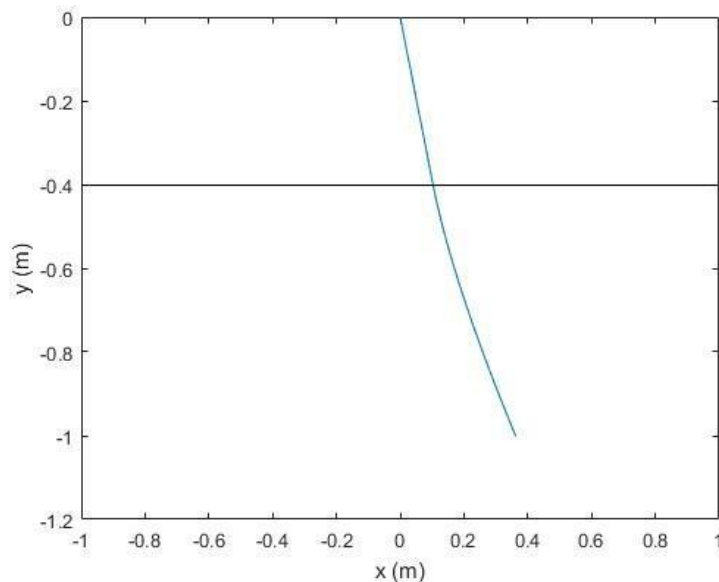
Počáteční podmínky:

$$v(0)=0, s(0)=0$$

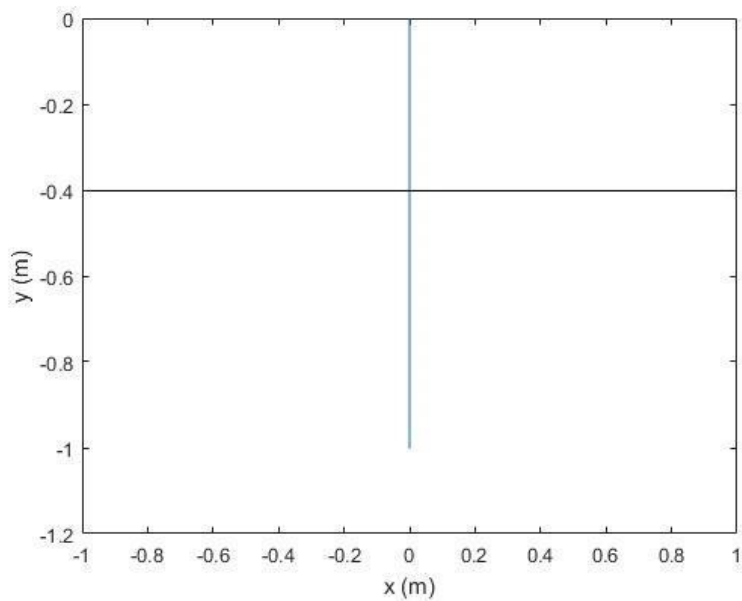
Pro tento výpočet byly zvolené hodnoty:

$$U = 45\text{kV}, d_1 = 0,1 \text{ m}, d_2 = 0,03 \text{ m}$$

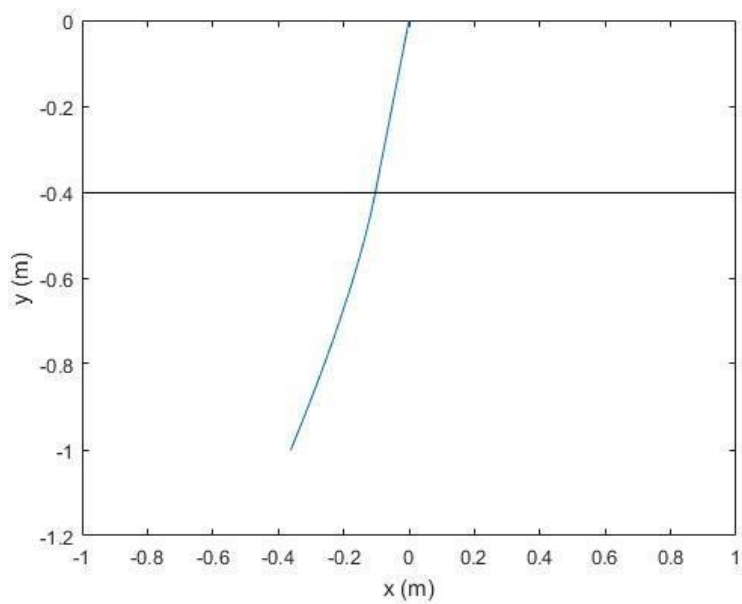
Rozsah řešení je dán konstrukcí separátoru, jehož výška je 1 m.



Obrázek 8 Grafické znázornění dráhy částice s $Q = 0,1 \text{ nC}$



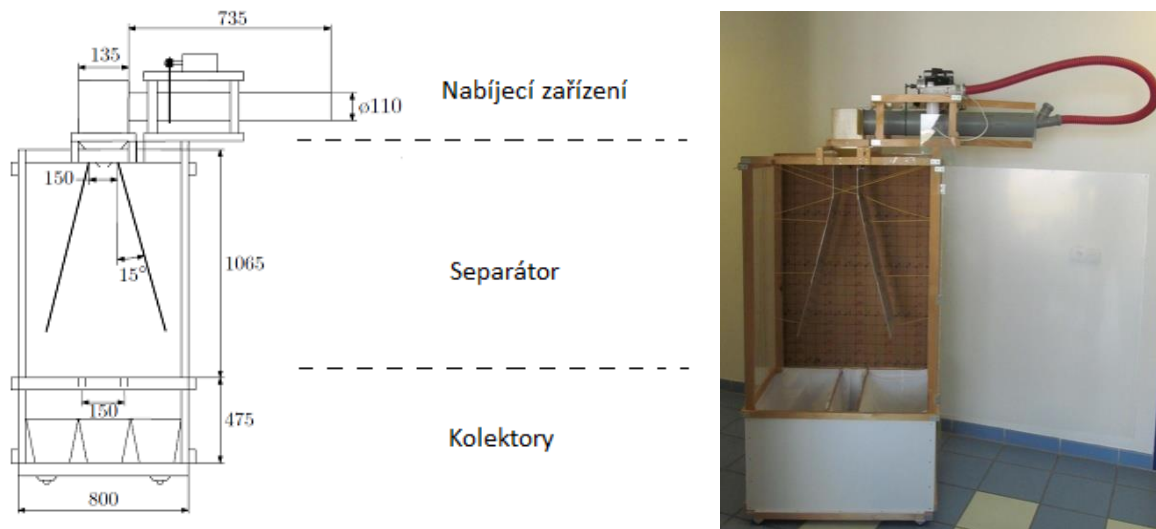
Obrázek 9 Grafické znázornění dráhy částice s $Q = 0 \text{ nC}$



Obrázek 10 Grafické znázornění dráhy částice s $Q = -0,1 \text{ nC}$

4 Experimentální elektrostatické separátory free-fall

4.1 Popis původního jednostupňového free-fall separátoru



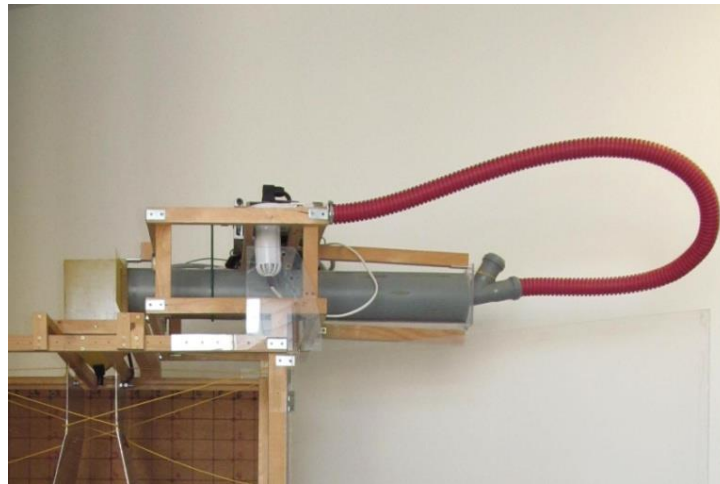
Obrázek 11 Separátor free-fall s popisem

4.1.1 Nabíjecí zařízení

Nabíjecí zařízení separátoru tvoří pohon a nabíjecí trubice. Pohon zde zajišťuje motor o jmenovitém napětím 18V s regulací otáček pomocí frekvenčního měniče. Přenos rotačního pohybu na nabíjecí trubici je zajištěn pomocí gumového řemene. Nabíjecí trubice z PP (polypropylen), pohyblivá část celého nabíjecího zařízení, byla na vnitřní straně opatřena lamelami z kompozitu tvořeného skelnou tkaninou a epoxidovou pryskyřicí. Jedná se o obdobný materiál, který se pro své elektrické vlastnosti využívá na výrobu desek plošných spojů. Tyto lamely, kolmé na plášť válce, tvoří při nabíjení překážky tak, aby docházelo k lepšímu promíchání (či mísení) částic a tím k jejich lepšímu nabíjení.

Tato trubice je uchycena v dřevěné konstrukci, jež umožňuje vhodné nastavení úhlů. Od vodorovné polohy pro nabíjení, po sklon 15° pro přemístění částic do další části zařízení - samotného separátoru. Otvor pro vstup částic, které nejsou nabitě (neutrální), je volný. Na opačné straně trubky je v průběhu nabíjení zábrana vyrobená ze skloepoxidového laminátu, která zabraňuje částicím opustit trubici dříve, než budou dostatečně nabitě.

Dále je v oblasti nabíjení zajištěno vysoušení vlhkosti pomocí fěnu typu 521 od výrobce Zlatník Ostrava (sériové číslo 44060) o výkonu 350 W, zapnutého na maximální výkon.



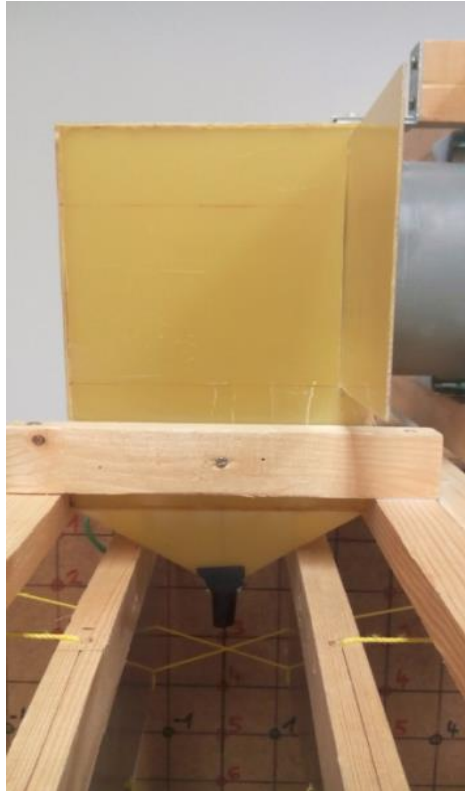
Obrázek 12 Nabíjení



Obrázek 13 Vysoušení

4.1.2 Separátor

Skříň vlastního separátoru byla pro potřeby experimentů sestavena z dřevěných latí a průhledných desek z PMMA (polymethylmethakrylát). Vše bylo upraveno tak, aby bylo možné měnit podmínky experimentů změnou vzdáleností mezi elektrodami. Mezi ně byl vsypáván elektricky nabitý materiál pomocí podavače vyrobeného ze skloepoxidového laminátu, který má dostatečně nízkou elektrickou vodivost. Dno podavače (tvaru trychtýře) mělo za úkol zajistit vstup nabitých částic mezi elektrody a neovlivnit přitom velikost jejich náboje. Gravitační síla způsobuje samovolný pohyb částic podavačem směrem dolů mezi hliníkové elektrody o rozměrech 800x300 mm a tloušťkou 1mm. Postavení elektrod při měření je znázorněno na obrázku č. 15 Jejich nejmenší vzdálenost byla 9cm a elektrody byly nabíjeny zdrojem HT 55-I HIGH VOLTAGE TEST SUPPLY s možností volby rozsahu 0 - 30 kV a 0 - 60 kV.



Obrázek 14 Podavač



Obrázek 15 Elektrody

4.1.3 Sběrné kolektory

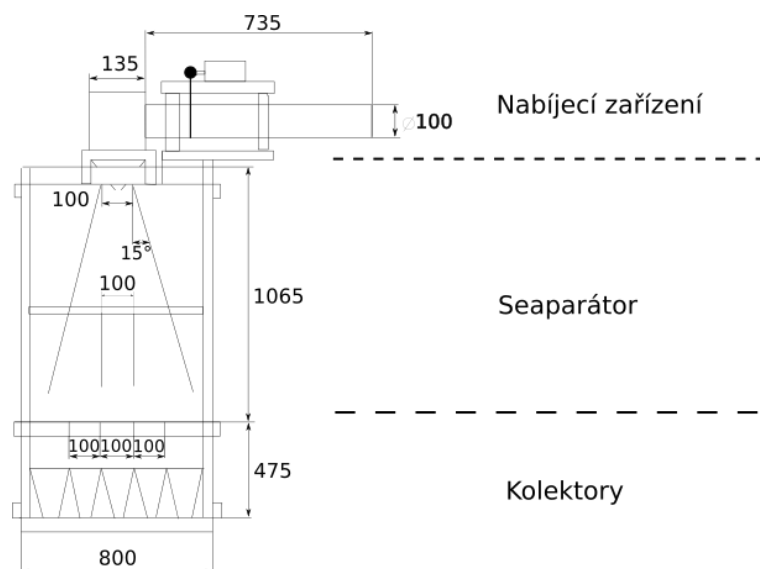
Pro vyhodnocení bylo využíváno tří sběrných kolektorů umístěných ve spodní části separátoru, viz obrázek č.16, se středním kolektorem o rozměru 6 cm.



Obrázek 16 Sběrné kolektory

4.2 Popis dvoustupňového free-fall separátoru

Pro vytvoření dvoustupňového experimentálního zařízení bylo potřeba provést úpravy na již existujícím jednostupňovém free-fall separátoru. Tyto změny se nedotkly pouze nabíjecího zařízení, které zůstalo stejné. Ostatní dvě části – separátor a kolektory – prošly změnami, které jsou popisány níže.



Obrázek 17 Dvoustupňový separátor free-fall s popisem

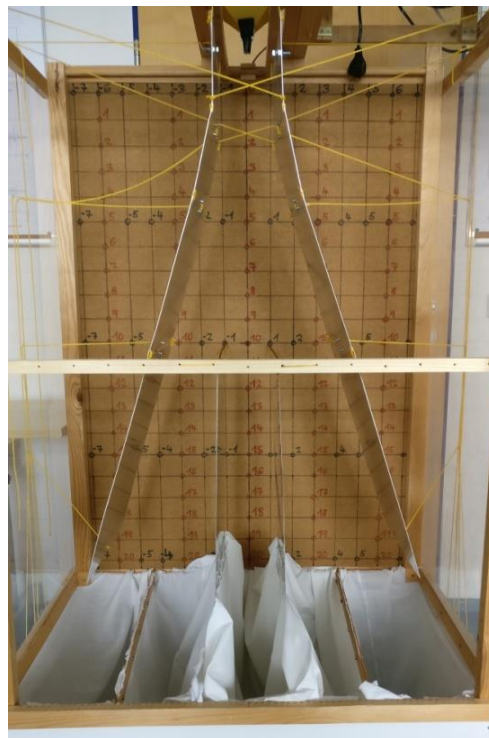
4.2.1 Separátor

Dřevěná konstrukce vlastního separátoru zůstala stejná jako u jednostupňového. Nezměněný zůstal i podavač separátoru, který můžeme vidět na obrázku č. 14.

4.2.1.1 Elektrody

Hlavní částí separátoru jsou elektrody z hliníkových plátů o rozměrech 400x300mm a tloušťce 1mm pod vysokým napětím. To je generováno zdrojem HT 55-I HIGH VOLTAGE TEST SUPPLY s možností volby rozsahu 0 – 30kV a 0 – 60kV. Tato část je pozměna až počtem elektrod, kde první stupeň separátoru je tvořen dvěma výše popsanými elektrodami, zatím co druhý stupeň je tvořen čtyřmi elektrodami (viz obrázek č. 12).

Pro všechna měření v této práci byla nastavená jednotná vzdálenost mezi elektrodami a to 9cm v neušším místě pro první stupeň a 10cm pro stupeň druhý. Vždy je pak pravá elektroda z dvojice protilehlých připojena jako kladná, levá jako záporná.



Obrázek 18 Elektrody

4.2.2 Sběrné kolektory

Pro vyhodnocení na tomto zařízení je využíváno pěti sběrných kolektorů umístěných ve spodní části separátoru (viz obrázek č. 19), oproti třem kolektorům na zařízení jednostupňovém. Jejich šířka je u krajních košů 21 cm a u vnitřních kolektorů 10 cm.



Obrázek 19 Sběrné kolektory

5 Postup a vyhodnocení měření

Výběr směsí pro měření na dvoustupňovém separátoru byl založen na výsledcích měření na jednostupňovém separátoru. Celkem byly vybrány tři směsi a to PS-ledničky a PVC, POM a ABS, HDPE a PET. Vybrány byly podle klíče první, poslední a jedna ze „středu“ výsledků z tabulky č.1, která prezentuje výsledky čistoty a účinnosti vytříděných směsí na výše zmíněném jednostupňovém zařízení.

Tabulka 1 Výsledky na jednostupňovém separátoru [22]

	Eff [%]	Pur [%]
PS a PVC	93	98
TPC a ABS	90	95
PC/ABS a ABS	90	97
PET a PVC	89	96
PS a ABS	87	93
PET a ABS	87	94
TPC a PVC	84	93
POM a PVC	83	90
POM a ABS	77	93
PA6+PA6,6 a HDPE	74	87
TPC a HDPE	60	79
PC/ABS a HDPE	55	72
PS a HDPE	46	69
PET a HDPE	32	60

Měření směsí probíhalo v sérii se třemi opakování, vždy ve dvou sadách. První sada s připojením všech šesti elektrod, druhá sada pak pouze s připojením vnějších čtyř elektrod. Důvodem pro to bylo ověření průkaznosti výsledků dvoustupňového separátoru.

Stanovené veličiny na základě předchozích měření na tomto zařízení byly: doba vysoušení, doba nabíjení a napětí mezi elektrodami. Jako optimální hodnoty byly nastaveny: doba vysoušení 120s, doba nabíjení 120s a napětí mezi elektrodami 45kV.

5.1 Postup měření

Přípravná fáze

Samotnému měření vždy předcházela přípravná fáze, ve které byly nejprve připojeny desky separátoru k vysokonapětovému zdroji, a současně byla k notebooku připojena vysokorychlostní kamera pro vytvoření záznamu experimentu (ve formátu .seq).

Pro každé měření byl připraven vzorek směsi o hmotnosti 100 g, kde byly obě látky zastoupeny hmotností 50 g.

Otáčky nabíjecího zařízení byly nastaveny na 200 ot/min a bylo zapnuto také vysoušení vzduchu v nabíjecím zařízení. To probíhalo po dobu 120 s, ve kterých bylo dosaženo hodnot vlhkosti 10 - 20 % a teploty 30 - 40 °C

Nabíjení a separace

Po ukončení vysoušení byl umístěn vzorek materiálu do nabíjecí trubky, která byla uzavřena proti úniku částic. Nabíjecí zařízení bylo motorem uvedeno do otáček, které byly předem nastaveny. Po uplynutí 120 s byla vysunuta zábrana na výstupu a částice byly vsypány do prostoru mezi elektrody, kde probíhala samotná separace.

Vyhodnocení

Po průchodu částic separátorem se přistoupilo k závěrečné fázi celého separačního procesu. Jednotlivé separační koše byly nejdříve zváženy a následně ručně vytřízeny pro určení hmotnosti nesprávně vytríděných částic. Dále se přikročilo k výpočtu účinnosti separace a čistoty směsi podle následujících vzorců, jejichž výsledky byly zaneseny do tabulky a porovnány s výsledky jednostupňového separátoru.

Pro označení jednotlivých kolektorů v tabulkách byly použity zkratky: PK pravý kolektor, SK střední kolektor, LK levý kolektor, PK-1 pravý kolektor vnější, PK-2 pravý kolektor vnitřní, LK-1 levý kolektor vnější, LK-2 levý kolektor vnitřní.

Výpočet účinnosti separace směsi (Eff)

$$Eff = \frac{(m_{L1} + m_{L2} + m_{P1} + m_{P2})}{m_{celková}} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

m_{L1} - váha levého vnějšího kolektoru po ručním dotřídění

m_{L2} - váha levého vnitřního kolektoru po ručním dotřídění

m_{P1} - váha levého vnějšího kolektoru po ručním dotřídění

m_{P2} - váha levého vnitřního kolektoru po ručním dotřídění

$m_{celková}$ - hmotnost celého vzorku

Výpočet čistoty směsi (pur)

Levý vnější koš

$$pur_{L1} = \frac{m_{L1}}{m_{L1c}} \quad (11)$$

m_{L1} - váha levého vnějšího kolektoru po ručním dotřídění

m_{L1c} - celková váha levého vnějšího kolektoru

Levý vnitřní koš

$$pur_{L2} = \frac{m_{L2}}{m_{L2c}} \quad (12)$$

m_{L2} - váha levého vnitřního kolektoru po ručním dotřídění

m_{L2c} - celková váha levého vnitřního kolektoru

Pravý vnější koš

$$pur_{P1} = \frac{m_{P1}}{m_{P1c}} \quad (13)$$

m_{P1} - váha pravého vnějšího kolektoru po ručním dotřídění

m_{P1c} - celková váha pravého vnějšího kolektoru

Pravý vnitřní koš

$$pur_{P2} = \frac{m_{P2}}{m_{P2c}} \quad (14)$$

m_{P2} - váha pravého vnitřního kolektoru po ručním dotřídění

m_{P2c} - celková váha pravého vnitřního kolektoru

Průměrná čistota

$$pur = \frac{(pur_{L1} + pur_{L2} + pur_{P1} + pur_{P2})}{4} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

pur_{L1} – čistota levého vnějšího koše

pur_{L2} – čistota levého vnitřního koše

pur_{P1} – čistota pravého vnějšího koše

pur_{P2} – čistota pravého vnitřního koše

6 Vlastní měření

Pro vyhodnocování měření jsme zvolili označení:

- A – separace se zapojenými všemi elektrodami
- B – separace pouze se zapojenými vnějšími elektrodami
- C – výsledné hodnoty z měření na jednostupňovém separátoru

6.1 PVC a PS – ledničky

Hmotnost částice PVC: 0,0327 g

Průměr částice PVC: 3,57 mm

Hustota PVC: 1,38 g/cm³

Hmotnost částice PS – ledničky: 0,0133 g

Průměr částice PS – ledničky: 2,9 mm

Hustota PS – ledničky: 1,05 g/cm³



Obrázek 20 PVC (vlevo) PS – ledničky (vpravo)

6.1.1 PVC a PS – ledničky, připojené všechny elektrody

Datum měření: 15.3.2017

Okolní teplota: 23,3 °C

Okolní vlhkost: 24,6 %

Tabulka 2 Výsledky levé strany separace směsi PVC a PS – ledničky, všechny elektrody připojené

PVC, PS- ledničky		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	PVC [g]	PS – ledničky [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PVC [g]	PS – ledničky [g]	Pur [-]	Eff [-]
33,8	14	44,63	44,37	0,26	0,994	0,887	2,68	2,58	0,1	0,96	0,052
36	14,7	46,73	46,51	0,22	0,995	0,93	2,59	2,54	0,05	0,98	0,051
36	12,5	46,56	46,4	0,16	0,997	0,928	2,79	2,59	0,2	0,93	0,052

V koši LK-1 dosaženo průměrné účinnosti 91,5% a průměrné čistoty 99,5%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 5,1% a průměrné čistoty 95,6% (viz tabulka č. 2).

Tabulka 3 Výsledky pravé strany separace směsi PVC a PS – ledničky, všechny elektrody připojené

PVC, PS- ledničky		PK									
		PK-2					PK-1				
T [°C]	rH [%]	m [g]	PS – ledničky [g]	PVC [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PS – ledničky [g]	PVC [g]	Pur [-]	Eff [-]
33,8	14	2,447	2,31	0,16	0,935	0,046	44,5	43,45	1,05	0,976	0,869
36	14,7	2,84	2,71	0,13	0,954	0,054	44,19	43,2	0,99	0,978	0,864
36	12,5	3,25	3,03	0,22	0,932	0,061	42,39	41,6	0,79	0,981	0,832

V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 85,5% a průměrné čistoty 68,4%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 5,3% a průměrné čistoty 94%.

6.1.2 PVC a PS – ledničky, připojené pouze vnější elektrody

Datum měření: 15.3.2017

Okolní teplota: 23,3 °C

Okolní vlhkost: 24,6 %

Tabulka 4 Výsledky levé strany separace směsi PVC a PS – ledničky, pouze vnější elektrody připojené

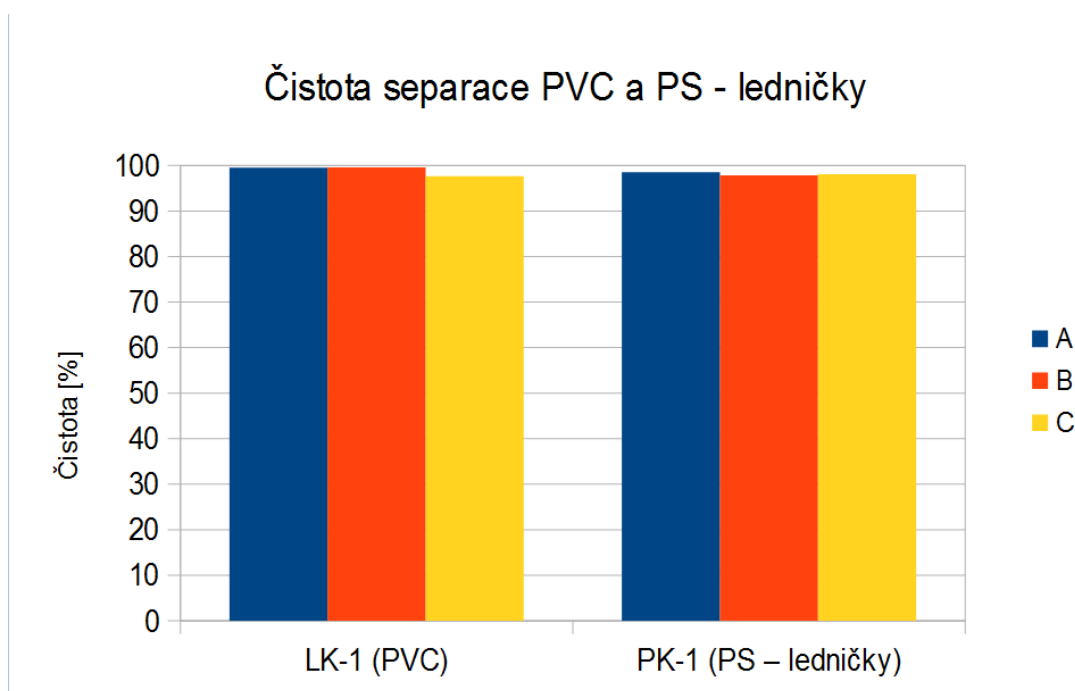
PVC, PS- ledničky		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	PVC [g]	PS – ledničky [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PVC [g]	PS – ledničky [g]	Pur [-]	Eff [-]
35,1	13,8	44,44	44,24	0,2	0,995	0,885	4,34	4,21	0,13	0,97	0,084
44,6	10,8	42,51	42,34	0,17	0,996	0,847	3,68	3,6	0,08	0,98	0,072
40,6	11,9	43,4	43,21	0,19	0,996	0,864	3,84	3,74	0,1	0,974	0,075

V koši LK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 84,5% a průměrné čistoty 99,5%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 7,7% a průměrné čistoty 97,4%.

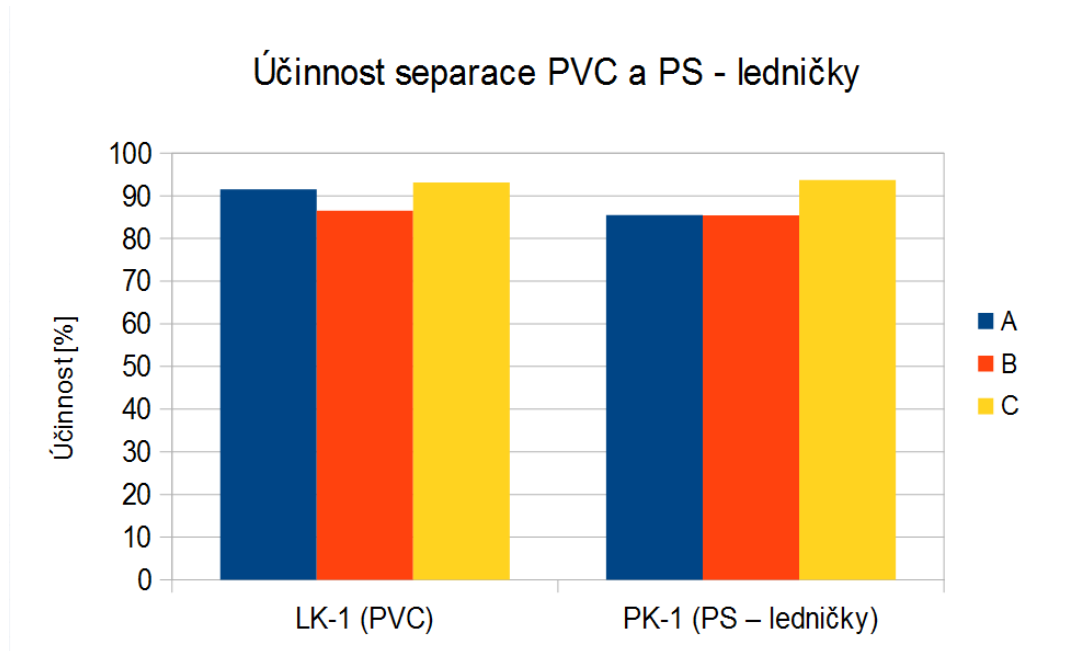
Tabulka 5 Výsledky pravé strany separace směsi PVC a PS – ledničky, pouze vnější elektrody připojené

PVC, PS- ledničky		PK										
		PK-2					PK-1					
T [°C]	rH [%]	m [g]	PS – ledničky [g]	PVC [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PS – ledničky [g]	PVC [g]	Pur [-]	Eff [-]	
35,1	13,8	3,54	3,46	3,46	0,977	0,069	44,26	43,59	0,67	0,985	0,872	
44,6	10,8	3,65	3,23	3,23	0,885	0,065	42,53	41,97	0,56	0,987	0,839	
40,6	11,9	3,58	3,43	0,15	0,958	0,069	43,29	42,61	0,68	0,984	0,852	

V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 85,4% a průměrné čistoty 98,5%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 6,7% a průměrné čistoty 94%.



Graf 1 Čistota separace PVC a PS - ledničky



Graf 21 Účinnost separace PVC a PS - ledničky

6.2 POM a ABS

Hmotnost částice POM: 0,0117 g

Průměr částice POM: 2,51 mm

Hustota POM: 1,41 g/cm³

Hmotnost částice ABS: 0,0214 g

Průměr částice ABS: 3,4 mm

Hustota ABS: 1,04 g/cm³



Obrázek 21 POM (vlevo) ABS (vpravo)

6.2.1 POM a ABS, připojené všechny elektrody

Datum měření: 31.3.2017

Okolní teplota: 24 °C

Okolní vlhkost: 32 %

Tabulka 6 Výsledky levé strany separace směsi POM a ABS, všechny elektrody připojené

POM, ABS		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	ABS [g]	POM [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	ABS [g]	POM [g]	Pur [-]	Eff [-]
38,31	14,1	38,17	37,36	0,81	0,979	0,747	3,62	2,82	0,8	0,779	0,056
36,7	13,5	35,04	33,89	1,15	0,967	0,678	3,01	2,51	0,5	0,834	0,05
37,5	14	32,97	32,41	0,56	0,864	0,648	2,62	2,23	0,39	0,851	0,045

V koši LK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 69,1% a průměrné čistoty 93,6%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 5% a průměrné čistoty 82,1%.

Tabulka 7 Výsledky pravé strany separace směsi POM a ABS, všechny elektrody připojené

POM, ABS		PK									
		PK-2					PK-1				
T [°C]	rH [%]	m [g]	POM [g]	ABS [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	POM [g]	ABS [g]	Pur [-]	Eff [-]
38,31	14,1	1,64	0,27	1,37	0,165	0,005	41,84	41,33	0,51	0,988	0,413
36,7	13,5	2,4	0,36	2,08	0,148	0,007	47,96	47,09	0,87	0,982	0,471
37,5	14	3,11	0,89	2,22	0,286	0,018	46,7	45,59	1,11	0,976	0,456

V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 44,6% a průměrné čistoty 98,2%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 1% a průměrné čistoty 19,9%.

6.2.2 POM a ABS, připojené pouze vnější elektrody

Datum měření: 5.4.2017

Okolní teplota: 27 °C

Okolní vlhkost: 23 %

Tabulka 8 Výsledky levé strany separace směsi POM a ABS, pouze vnější elektrody připojené

POM, ABS		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	ABS [g]	POM [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	ABS [g]	POM [g]	Pur [-]	Eff [-]
34	14,4	30,64	29,77	0,87	0,972	0,595	5,7	4,46	1,06	0,814	0,093
35,4	14,1	29,86	29,08	0,78	0,974	0,582	4,61	3,77	0,84	0,818	0,075
40,3	10,2	29,4	28,13	1,27	0,957	0,563	5,65	4,32	1,33	0,765	0,086

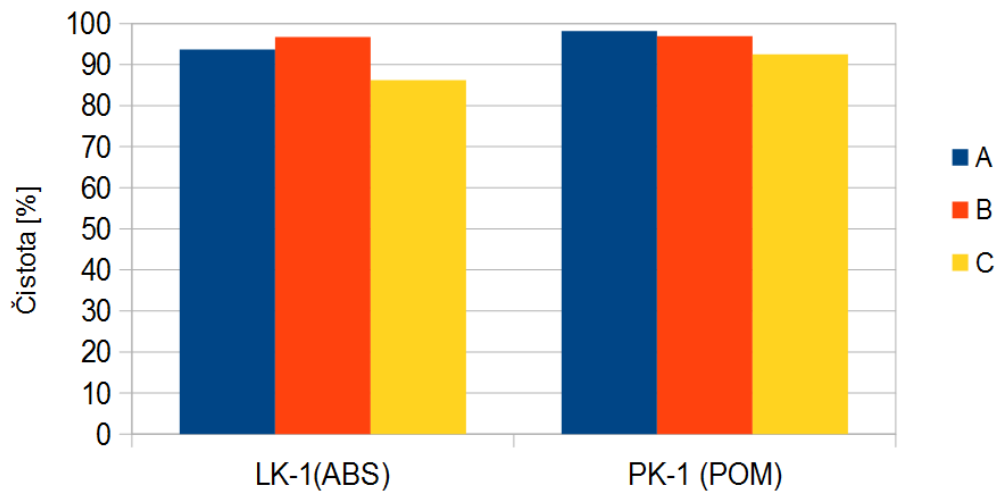
V koši LK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 58% a průměrné čistoty 96,7%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 8,4% a průměrné čistoty 79,9%.

Tabulka 9 Výsledky pravé strany separace směsi POM a ABS, pouze vnější elektrody připojené

POM, ABS		PK									
		PK-2					PK-1				
T [°C]	rH [%]	m [g]	POM [g]	ABS [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	POM [g]	ABS [g]	Pur [-]	Eff [-]
34	14,4	4,28	1	3,28	0,234	0,02	46,99	45,45	1,54	0,967	0,455
35,4	14,1	4,42	1,24	3,18	0,281	0,25	47,23	45,92	1,31	0,972	0,459
40,3	10,2	4,4	1,05	3,35	0,239	0,021	44,6	43,1	1,5	0,966	0,431

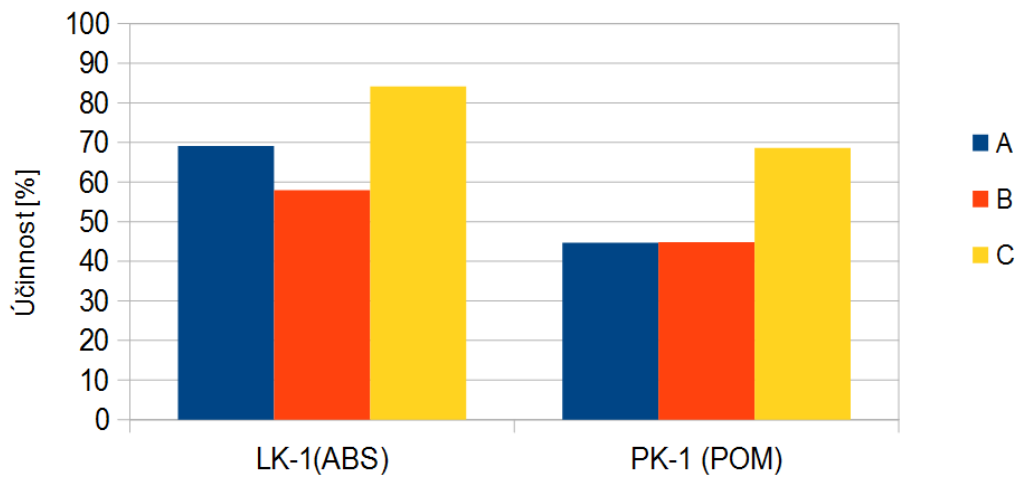
V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 44,8% a průměrné čistoty 96,8%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 9,7% a průměrné čistoty 25,1%.

Čistota separace ABS a POM



Graf 3 Čistota separace POM a ABS

Účinnost separace POM a ABS



Graf 4 Účinnost separace POM a ABS

6.3 PET a HDPE

Hmotnost částice PET: 0,0117 g

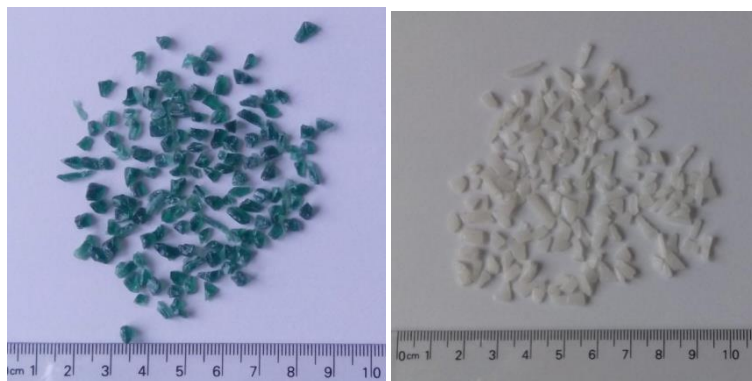
Průměr částice PET: 2,51 mm

Hustota PET: 1,41 g/cm³

Hmotnost částice HDPE: 0,0186 g

Průměr částice HDPE: 3,35 mm

Hustota HDPE: 0,95 g/cm³



Obrázek 22 PET (vlevo) HDPE (vpravo)

6.3.1 PET a HDPE, připojené všechny elektrody

Datum měření: 29.3.2017

Okolní teplota: 25,8 °C

Okolní vlhkost: 26 %

Tabulka 10 Výsledky levé strany separace směsi PET a HDPE, všechny elektrody připojené

PET, HDPE		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	HPE [g]	PET [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	HPE [g]	PET [g]	Pur [-]	Eff [-]
37,4	13,2	17,95	16,44	1,51	0,916	0,329	15,04	12,02	3,02	0,799	0,12
38,5	12,5	21,35	20,99	0,36	0,983	0,42	9,63	8,98	0,65	0,933	0,09
40,1	14,8	10,94	10,6	0,34	0,969	0,212	9,17	8,67	0,5	0,945	0,087

V koši LK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 32,3% a průměrné čistoty 95,5%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 9,9% a průměrné čistoty 89,2%.

Tabulka 11 Výsledky pravé strany separace směsi PET a HDPE, všechny elektrody připojené

PET, HDPE		PK									
		PK-2					PK-1				
T [°C]	rH [%]	m [g]	PET [g]	HDPE [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PET [g]	HDPE [g]	Pur [-]	Eff [-]
37,4	13,2	7	5,92	1,08	0,846	0,118	23,54	20,85	2,69	0,886	0,209
38,5	12,5	7,9	6,72	1,18	0,851	0,134	36,6	33,26	3,34	0,909	0,333
40,1	14,8	13,26	11,23	2,03	0,847	0,225	22,63	18,66	3,97	0,825	0,187

V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 24,3% a průměrné čistoty 87,3%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 15,9% a průměrné čistoty 72,2%.

6.3.2 PET a HDPE, připojené pouze vnější elektrody

Datum měření: 4.4.2017

Okolní teplota: 22,7 °C

Okolní vlhkost: 40 %

Tabulka 12 Výsledky levé strany separace směsi PET a HDPE, pouze vnější elektrody připojené

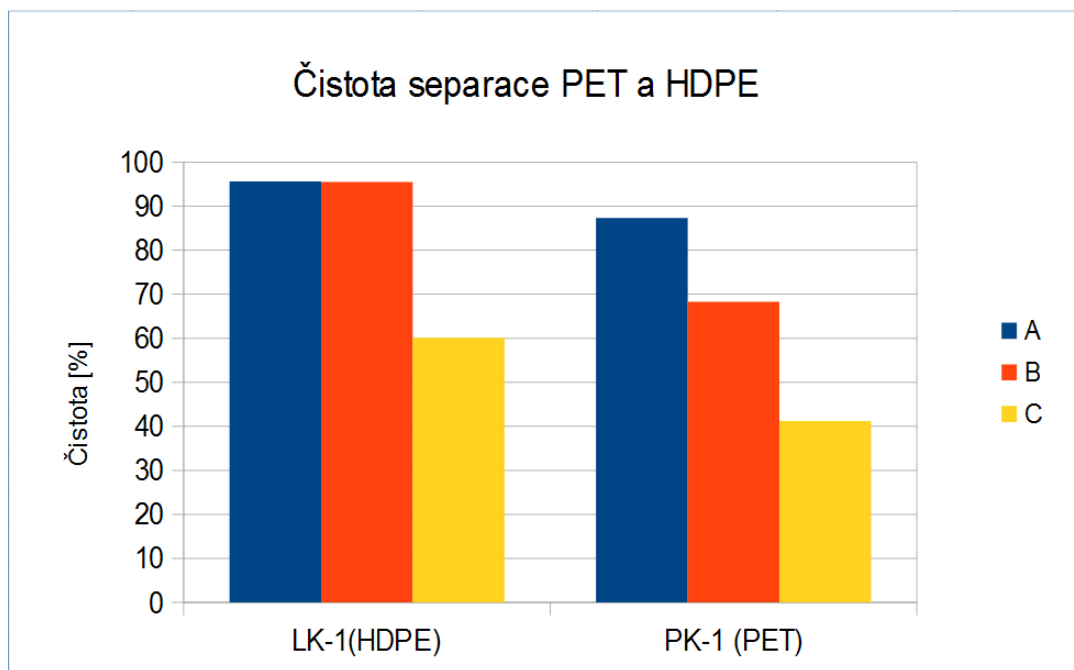
PET, HDPE		LK									
		LK-1					LK-2				
T [°C]	rH [%]	m [g]	HPE [g]	PET [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	HPE [g]	PET [g]	Pur [-]	Eff [-]
39,7	17,3	0,36	0,32	0,4	0,889	0,006	0,93	0,89	0,04	0,957	0,009
40,1	16	0,24	0,24	0	1	0,005	0,42	0,4	0,02	0,952	0,004
40,5	14	0,41	0,4	0,01	0,976	0,008	1,39	1,39	0,26	0,913	0,011

V koši LK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 0,6% a průměrné čistoty 95,5%. V koši LK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 0,8% a průměrné čistoty 94%.

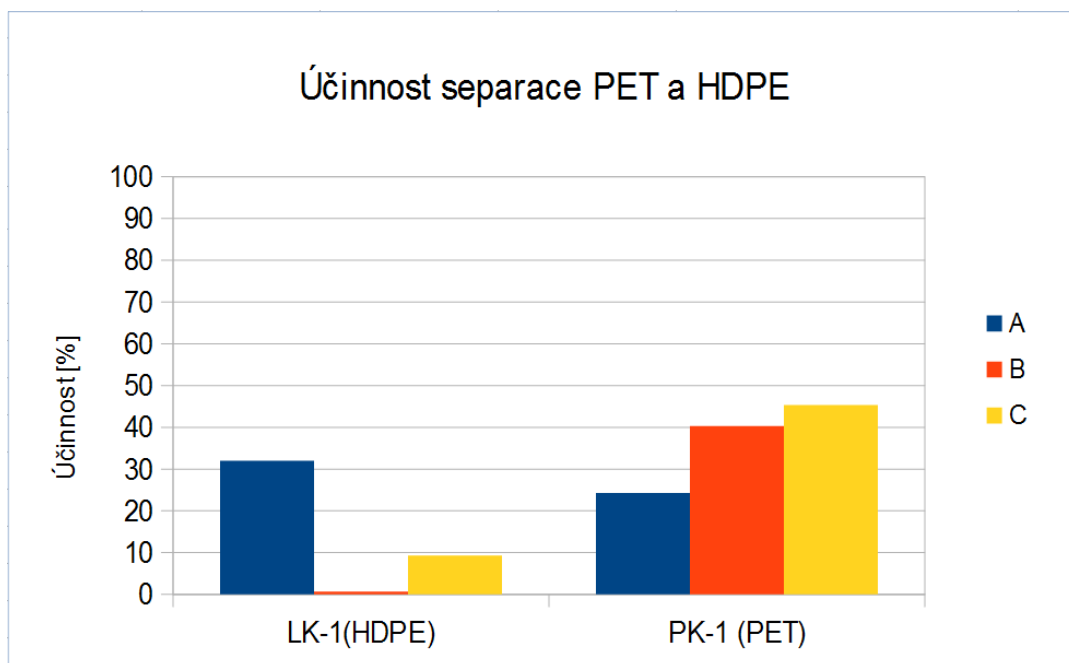
Tabulka 13 Výsledky pravé strany separace směsi PET a HDPE, pouze vnější elektrody připojené

PET, HDPE		PK									
		PK-2					PK-1				
T [°C]	rH [%]	m [g]	PET [g]	HDPE [g]	Pur [-]	Eff [-]	m [g]	PET [g]	HDPE [g]	Pur [-]	Eff [-]
16,5	5,34	16,51	5,34	11,17	0,323	0,107	59,62	41,76	17,86	0,70	0,418
18,6	6,91	18,58	6,91	11,67	0,372	0,138	60,52	39,69	20,83	0,656	0,397
14,2	5,06	16,51	14,23	9,17	0,356	0,101	56,90	39,41	17,49	0,693	0,394

V koši PK-1 bylo dosaženo průměrné účinnosti 40,3% a průměrné čistoty 68,3%. V koši PK-2 bylo dosaženo průměrné účinnosti 11,5% a průměrné čistoty 35%.



Graf 5 Čistota separace PET a HDPE



Graf 6 Účinnost separace PET a HDPE

Závěr

Obsahem této diplomové práce bylo přestavění jednostupňového elektrostatického separátoru free-fall na separátor dvoustupňový, kterému následovalo praktické měření dvousložkových směsí. Pro tuto práci byly vybrány tři směsi na základě předchozích měření na jednostupňovém separátoru. Výsledné hodnoty čistoty a účinnosti jednotlivých materiálů na dvoustupňovém separátoru byly porovnány s výsledky z předchozího typu separátoru.

První porovnávanou směsí je směs PVC a PS – ledničky. V měření se všemi zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zlepšení čistoty vyseparovaného PVC o 1,45 % a zhoršení účinnosti o 2,22 %. V měření s pouze vnějšími zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zlepšení čistoty vyseparovaného PVC o 1,49 % a zhoršení účinnosti o 7,22 %. U PS – ledničky jsme při zapojení všech elektrod pozorovali zlepšení čistoty o 0,2 % a zhoršení účinnosti o 7,6 %. Při zapojení pouze vnějších elektrod pak zlepšení čistoty o 0,9 % a zhoršení účinnosti o 7,68 %.

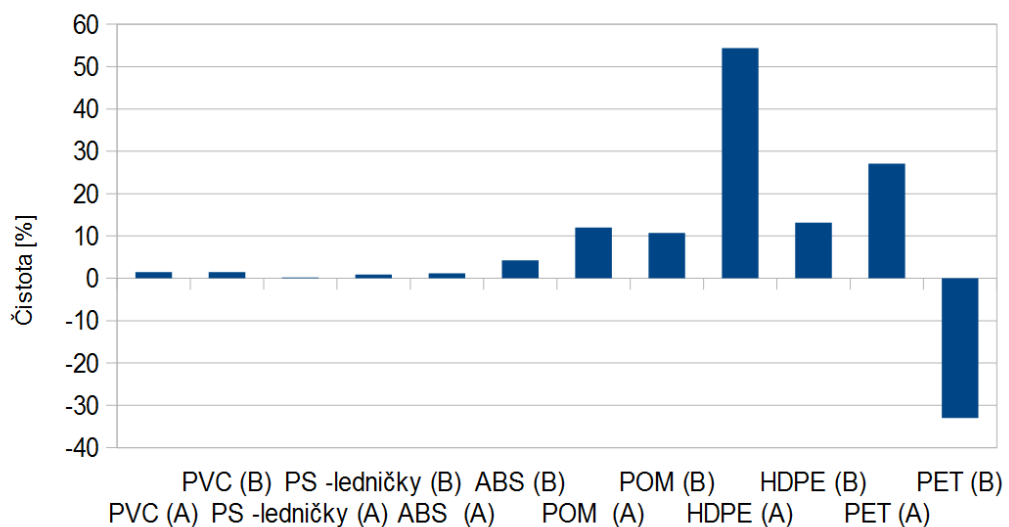
Druhou porovnávanou směsí je směs POM a ABS. V měření se všemi zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zlepšení čistoty vyseparovaného ABS o 1,2 % a zlepšení účinnosti o 0,52 %. V měření s pouze vnějšími zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zlepšení čistoty vyseparovaného ABS o 4,27 % a zhoršení účinnosti o 10,59 %. U POM jsme při zapojení všech elektrod pozorovali zlepšení čistoty o 12 % a zhoršení účinnosti o 39,44 %. Při zapojení pouze vnějších elektrod pak zlepšení čistoty o 10,7 % a zhoršení účinnosti o 39,29 %.

Třetí porovnávanou směsí je směs PET a HDPE. V měření se všemi zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zlepšení čistoty vyseparovaného PET o 27,1 % a zlepšení účinnosti o 14,95 %. V měření s pouze vnějšími zapojenými elektrodami jsme zaznamenali zhoršení čistoty vyseparovaného PET o 33 % a zlepšení účinnosti o 5,64 %. U HDPE jsme při zapojení všech elektrod pozorovali zlepšení čistoty o 54,38 % a zhoršení účinnosti o 13,31 %. Při zapojení pouze vnějších elektrod pak zlepšení čistoty o 13,17 % a zhoršení účinnosti o 58,64 %. Velký rozdíl mezi výsledky měření se všemi zapojenými elektrodami a zapojenými pouze vnějšími elektrodami byl způsoben vysokou vzdušnou vlhkostí, která

byla u měření se všemi zapojenými elektrodami 26 %, se zapojenými pouze vnějšími elektrodami 40% a u jednostupňového separátoru 28 %.

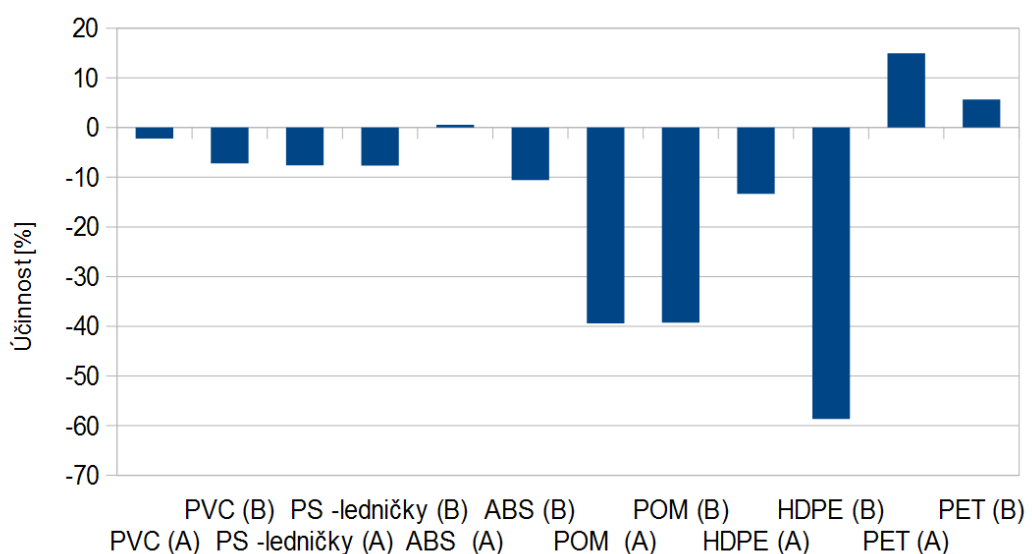
Na základě provedených měření v této práci, vidíme zlepšení výsledků účinnosti a čistoty separátu na dvoustupňovém separátoru oproti jednostupňovému. Bylo dosaženo lepších výsledků, ať už při zapojení všech elektrod nebo pouze vnějších.

Čistota vztážená k jednostupňovému separátoru



Graf 7 Grafické znázornění změny čistoty jednotlivých materiálů vztážené k jednostupňovému separátoru

Účinnost vztážená k jednostupňovému separátoru



Graf 8 Grafické znázornění změny účinnosti jednotlivých materiálů vztážené k jednostupňovému separátoru

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Aktuální údaje o plastech a využití plastových odpadů [online]. [Cit. 14.5.2017].
Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11996-aktualni-udaje-o-plastech-a-vyuziti-plastovych-odpadu>
- [2] Odpady [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
<http://www.krasec.cz/krasec/otazkydetail/479>
- [3] Proč si nehrát s PVC? aneb čím PVC škodí [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
<http://arnika.org/proc-si-nehrat-s-pvc>
- [4] Jak správně třídít [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
<http://www.jaktridit.cz/cz/trideni/jak-spravne-tridit-barevne-kontejnery/plast>
- [5] Co znamená princip RRR [online]. [Cit. 24.5.2015]. Dostupné z:
http://www.ekoporadna.cz/wiki/doku.php?id=odpady:jak_se_tridi_a_recykluji_plasty
- [6] Třídění odpadů v Jihočeském kraji, cose děje s odpadem [online]. [Cit. 14.5.2017].
Dostupné z: <http://www.jihocesketrideni.cz/co-se-deje-s-odpadem>
- [7] Recyklace plastů [prezentace]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/14_%20RECYKLACE%20PLASTU.pdf
- [8] Ondřej Maliník, Možnosti recyklace elektronického odpadu, Bakalářská práce, UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, 2009, 51 str., [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/9274/malan%C3%ADk_2009_bp.pdf?sequence=1
- [9] Princip flotace [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
http://hgf10.vsb.cz/546/Flotace/text_2.htm
- [10] Představení automatické třídící linky s NIR detekcí [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/predstaveni-automaticke-tridici-linky-s-nir-detekci/>

- [11] IR a UV VIS spektroskopie [prezentace]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
<http://physics.ujep.cz/~mkormund/P219/NanoMataChar-prednaska3.pdf>
- [12] VLAD, Simona, MIHAILESCU, Michaela, RAFIROIU, Dan, LUGA, Alexandru, DASCALESCU, Lucian. Numerical analysis of the electric field in plate-type electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*. 2000, 48(3-4): 217-229. DOI: 10.1016/s0304-3886(99)00067-4.
- [13] VLAD, Simona, LUGA, Alexandru, DASCALESCU, Lucian. Numerical Computation of Conducting Particle Trajectories in Plate-Type Electrostatic Separators. In *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volume 39, Issue 1. [online]. 2003 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.1109/TIA.2002.807218.
- [14] DASCALESCU, L., A. MIHALCIOIU, A. TILMATINE, M. MIHAILESCU, A. IUGA a A. SAMUILA. A linear-interaction model for electrostatic separation processes. In: *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)* [online]. 2002 [cit. 2015-06-04]. DOI: 10.1109/ias.2002.1042741.
- [15] Amar Tilmatine, Karim Medles, Salah-Eddine Bendimerad, Fodil Boukholda, Lucien Dascalescu, Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. [online] *Waste Manag.* 2009 Jan;29(1):228-32. doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.008. Epub 2008 Aug 5.
- [16] TILMATINE, Amar, Karim MEDLES, Mohamed YOUNES, Abdelber BENDAOUD a Lucian DASCALESCU. Roll-Type Versus Free-Fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2010, 46(4): 1564-1569 [cit. 2015-06-04]. DOI: 10.1109/tia.2010.2049553.
- [17] [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z:
<http://sodomkalubomir.blog.cz/1308/triboelektrina-a-triboluminiscence-polymeru-a-nanovlaken-1>
- [18] IUGA, Al, et al. Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals. *Journal of Electrostatics*, 1989, 23: 235-243 s.

- [19] TAYLOR, J. B. Dry electrostatic separation of granular materials. In: *Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE*. IEEE, 1988. 1741-1759 s.
- [20] Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83240
- [21] Linka fluidní separace [online]. [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z: http://aquatest.cz.kappa.nen.cz/underwood/download/files/9.LINKA_FLUIDNI_SEPARACE.pdf
- [22] Jan BRABEC: Separace plastových materiálů s využitím free-fall elektrostatického separátoru (bakalářská práce 2015). Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015

Přílohy

Příloha A - Výpočet trajektorie částice v jednostupňovém separátoru

```
function [] = separator()
clear
clc

Q = -8e-9;
m = 1e-3;
U = 45e3;
d = 0.1;
g = 9.72;

function [dsvdt] = rce(t, sv)

    F = Q*U/d;
    ax = F/m;
    if (sv(2) < -1)
        ax = 0;
    end

    dsvdt = [sv(3); sv(4); ax; -g];
end

function stop = prulet(t, sv)
    stop = false;
    ifsv(2) <= -1
        stop = true;
    end
end

sx0 = 0; sy0 = 0;
vx0 = 0; vy0 = 0;

[t, sv] = runge_kuttal(@rce, [0, 1], [sx0, sy0, vx0, vy0], 1e3, @prulet);

subplot(1,1,1)
sx = sv(:,1); sy = sv(:,2);
plot(sx, sy)
xlabel('x (m)')
ylabel('y (m)')
xlim([-1, 1])

end

function [x, y] = runge_kuttal(fce, interval, y0, n, stop)

a = interval(1);
b = interval(2);

% vytvoreni vektoru nezavislepromenne
x = linspace(a, b, n+1)';
h = (b-a)/n;
```

```
% vytvoreni prazdneho vektoru reseni
y = zeros(n+1, length(y0));

y(1,:) = y0;
for i = 1 : (length(x) - 1)
    if stop(x(i), y(i,:))
        y = y(1:i, :);
        x = x(1:i);
    break
end

% odhady derivaci resene soustavy
k_1 = fce(x(i), y(i,:))';
k_2 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_1)';
k_3 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_2)';
k_4 = fce(x(i) + h, y(i, :) + k_3*h)';

% vypocet reseni v novem kroku
y(i+1,:) = y(i,:) + h*(k_1 + 2*k_2 + 2*k_3 + k_4)/6;
end
end
```

Příloha B - Výpočet trajektorie částice ve dvoustupňovém separátoru

```
function [] = casticer()
clear
clc

Q = 1e-8;
m = 1e-3;
U = 45e3;
d = 0.1;
d2 = 0.03;
g = 9.72;

function [dsvdt] = rce(t, sv)
% dsvdt = [ds/dt, dv/dt]

if (sv(2) > -0.4)
    F = Q*U/d;
    ax = F/m;
elseif (sv(2) < -0.4) && (sv(1) > d2/2)
    F = Q*U/d2;
    ax = F/m;
elseif (sv(2) < -0.4) && (sv(1) < d2/2)
    F = -Q*U/d2;
    ax = F/m;
else
    ax = 0;
end

dsvdt = [sv(3); sv(4); ax; -g];
end

function stop = prulet(t, sv)
    stop = false;
    ifsv(2) <= -1
        stop = true;
    end
end

sx0 = 0; sy0 = 0;
vx0 = 0; vy0 = 0;

[t, sv] = runge_kutta(@rce, [0, 1], [sx0, sy0, vx0, vy0], 1000, @prulet);

subplot(1,1,1)
sx = sv(:,1); sy = sv(:,2);
plot(sx, sy)
xlabel('x (m)')
ylabel('y (m)')
xlim([-1, 1])

end

function [x, y] = runge_kutta(fce, interval, y0, n, stop)

a = interval(1);
b = interval(2);
```

```
% vytvoreni vektoru nezavislepromenne
x = linspace(a, b, n+1)';
h = (b-a)/n;

% vytvoreni prazdneho vektoru reseni
y = zeros(n+1, length(y0));

y(1,:) = y0;
for i = 1 : (length(x) - 1)
    if stop(x(i), y(i,:))
        y = y(1:i, :);
        x = x(1:i);
    break
end

% odhady derivaci resene soustavy
k_1 = fce(x(i), y(i,:))';
k_2 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_1)';
k_3 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_2)';
k_4 = fce(x(i) + h, y(i, :) + k_3*h)';

% vypocet reseni v novem kroku
y(i+1,:) = y(i,:) + h*(k_1 + 2*k_2 + 2*k_3 + k_4)/6;
end
end
```

Příloha C – Naměřené hodnoty se zapojenými všemi elektrodami

PVC, PS-ledničky		T [°C]	33,8	36	36
		rH [%]	14	14,7	12,5
LK	LK-1	m [g]	44,63	46,73	46,56
		PVC [g]	44,37	46,51	46,4
		PS – ledničky [g]	0,26	0,22	0,16
		Pur [-]	0,994	0,995	0,997
		Eff [-]	0,887	0,93	0,928
	LK-2	m [g]	2,68	2,59	2,79
		PVC [g]	2,58	2,54	2,59
		PS – ledničky [g]	0,1	0,05	0,2
		Pur [-]	0,96	0,98	0,93
		Eff [-]	0,052	0,051	0,052
SK		m [g]	4,4	3,74	5,23
PK	PK-2	m [g]	2,447	2,84	3,25
		PS – ledničky [g]	2,31	2,71	3,03
		PVC [g]	0,16	0,13	0,22
		Pur [-]	0,935	0,954	0,932
		Eff [-]	0,046	0,054	0,061
	PK-1	m [g]	44,5	44,19	42,39
		PS – ledničky [g]	43,45	43,2	41,6
		PVC [g]	1,05	0,99	0,79
		Pur [-]	0,976	0,978	0,981
		Eff [-]	0,869	0,864	0,832
		Pur [-]	0,967	0,976	0,959
		Eff [-]	0,927	0,949	0,936

POM, ABS		T [°C]	38,31	36,7	37,5
		rH [%]	14,1	13,5	14
LK	LK-1	m [g]	38,17	35,04	32,97
		ABS [g]	37,36	33,89	32,41
		POM [g]	0,81	1,15	0,56
		Pur [-]	0,979	0,967	0,864
		Eff [-]	0,747	0,678	0,648
	LK-2	m [g]	3,62	3,01	2,62
		ABS [g]	2,82	2,51	2,23
		POM [g]	0,8	0,5	0,39
		Pur [-]	0,779	0,834	0,851
		Eff [-]	0,056	0,05	0,045
SK		m [g]	8,75	12,3	13,74
PK	PK-2	m [g]	1,64	2,4	3,11
		POM [g]	0,27	0,36	0,89
		ABS [g]	1,37	2,08	2,22
		Pur [-]	0,165	0,148	0,286
		Eff [-]	0,005	0,007	0,018
	PK-1	m [g]	41,84	47,96	46,7
		POM [g]	41,33	47,09	45,59
		ABS [g]	0,51	0,87	1,11
		Pur [-]	0,988	0,982	0,976
		Eff [-]	0,413	0,471	0,456
		Pur [-]	0,727	0,732	0,744
		Eff [-]	0,817	0,838	0,811

PET, HDPE		T [°C]	37,4	38,5	40,1
		rH [%]	13,2	12,5	14,8
LK	LK-1	m [g]	17,95	21,35	10,94
		HPE [g]	16,44	20,99	10,6
		PET [g]	1,51	0,36	0,34
		Pur [-]	0,916	0,983	0,969
		Eff [-]	0,329	0,42	0,212
	LK-2	m [g]	15,04	9,63	9,17
		HPE [g]	12,02	8,98	8,67
		PET [g]	3,02	0,65	0,5
		Pur [-]	0,799	0,933	0,945
		Eff [-]	0,12	0,09	0,087
SK		m [g]	38,53	24,99	43,21
PK	PK-2	m [g]	7	7,9	13,26
		PET [g]	5,92	6,72	11,23
		HDPE [g]	1,08	1,18	2,03
		Pur [-]	0,846	0,851	0,847
		Eff [-]	0,118	0,134	0,225
	PK-1	m [g]	23,54	36,6	22,63
		PET [g]	20,85	33,26	18,66
		HDPE [g]	2,69	3,34	3,97
		Pur [-]	0,886	0,909	0,825
		Eff [-]	0,209	0,333	0,187
		Pur [-]	0,861	0,918	0,896
		Eff [-]	0,552	0,699	0,491

Příloha D – Naměřené hodnoty se zapojenými pouze vnějšími elektrodami

PVC, PS-ledničky		T [°C]	35,1	44,6	40,6
		rH [%]	13,8	10,8	11,9
LK	LK-1	m [g]	44,44	42,51	43,4
		PVC [g]	44,24	42,34	43,21
		PS – ledničky [g]	0,2	0,17	0,19
		Pur [-]	0,995	0,996	0,996
		Eff [-]	0,885	0,847	0,864
	LK-2	m [g]	4,34	3,68	3,84
		PVC [g]	4,21	3,6	3,74
		PS – ledničky [g]	0,13	0,08	0,1
		Pur [-]	0,97	0,98	0,974
		Eff [-]	0,084	0,072	0,075
SK		m [g]	2,82	4,32	3,68
PK	PK-2	m [g]	3,54	3,65	3,58
		PS – ledničky [g]	3,46	3,23	3,43
		PVC [g]	3,46	3,23	0,15
		Pur [-]	0,977	0,885	0,958
		Eff [-]	0,069	0,065	0,069
	PK-1	m [g]	44,26	42,53	43,29
		PS – ledničky [g]	43,59	41,97	42,61
		PVC [g]	0,67	0,56	0,68
		Pur [-]	0,985	0,987	0,984
		Eff [-]	0,872	0,839	0,852
		Pur [-]	0,981	0,961	0,98
		Eff [-]	0,955	0,911	0,93

POM, ABS		T [°C]	34	35,4	40,3
		rH [%]	14,4	14,1	10,2
LK	LK-1	m [g]	30,64	29,86	29,4
		ABS [g]	29,77	29,08	28,13
		POM [g]	0,87	0,78	1,27
		Pur [-]	0,972	0,974	0,957
		Eff [-]	0,595	0,582	0,563
	LK-2	m [g]	5,7	4,61	5,65
		ABS [g]	4,46	3,77	4,32
		POM [g]	1,06	0,84	1,33
		Pur [-]	0,814	0,818	0,765
		Eff [-]	0,093	0,075	0,086
SK		m [g]	12,69	13,59	15,4
PK	PK-2	m [g]	4,28	4,42	4,4
		POM [g]	1	1,24	1,05
		ABS [g]	3,28	3,18	3,35
		Pur [-]	0,234	0,281	0,239
		Eff [-]	0,02	0,25	0,021
	PK-1	m [g]	46,99	47,23	44,6
		POM [g]	45,45	45,92	43,1
		ABS [g]	1,54	1,31	1,5
		Pur [-]	0,967	0,972	0,966
		Eff [-]	0,455	0,459	0,431
		Pur [-]	0,746	0,761	0,731
		Eff [-]	0,808	0,8	0,766

PET, HDPE		T [°C]	39,7	40,1	40,5
		rH [%]	17,3	16	14
LK	LK-1	m [g]	0,36	0,24	0,41
		HPE [g]	0,32	0,24	0,4
		PET [g]	0,4	0	0,01
		Pur [-]	0,889	1	0,976
		Eff [-]	0,006	0,005	0,008
	LK-2	m [g]	0,93	0,42	1,39
		HPE [g]	0,89	0,4	1,39
		PET [g]	0,04	0,02	0,26
		Pur [-]	0,957	0,952	0,913
		Eff [-]	0,009	0,004	0,011
SK		m [g]	22,7	20,82	24,28
PK	PK-2	m [g]	16,51	18,58	14,23
		PET [g]	5,34	6,91	5,06
		HDPE [g]	11,17	11,67	9,17
		Pur [-]	0,323	0,372	0,356
		Eff [-]	0,107	0,138	0,101
	PK-1	m [g]	59,62	60,52	56,9
		PET [g]	41,7	20,83	17,49
		HDPE [g]	17,86	20,83	17,49
		Pur [-]	0,7	0,666	0,693
		Eff [-]	0,418	0,397	0,394
		Pur [-]	0,72	0,75	0,71
		Eff [-]	0,48	0,47	0,46