

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Elektrostatický separátor plastových částic**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na sestavení obecného matematického modelu elektrostatického separátoru, řešení formulovaného modelu pro free-fall separátor a jeho experimentálního ověření. Na základě tohoto modelu byly stanoveny teoretické trajektorie částic s elektrickým nábojem, který je nutný k vychýlení částic. Pro účely dalších projektů a této bakalářské práce vzniklo experimentální zařízení, na němž byla zkoumána účinnost vychylování částic, jejich poloha a rychlost.

## **Klíčová slova**

Separace, triboelektrický efekt, HDPE, PMMA, numerický model, experiment, Agros2D, metoda konečných prvků, Runge-Kutta-Fehlberg

## **Abstract**

The bachelor thesis is focused on the assembly of the general mathematical model of electrostatic separator, numerical solution of formulated model for triboelectric free-fall separator and its experimental verification. There were found out trajectories of particles with electric charge which is necessary for the correct displacement of particles based on the numerical model. Experimental device formed for the purposes of this work and other project was tested for effectiveness of deflecting particles, their position and speed.

## **Key words**

Separation, triboelectric effect, HDPE, PMMA, numerical simulation, experiment, Agros2D, higher-order finite element method, Runge-Kutta-Fehlberg

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Tomáš Kaminský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Za značnou podporu děkuji také doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D.. Dále bych rád poděkoval Ing. Václavu Štarmanovi, Ing. Janu Kacerovskému a Ing. Jindřichu Jansovi za pomoc při stavbě separátoru a realizaci experimentu.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
1.1 POPIS PROBLEMATIKY .....	9
1.2 ELEKTROSTATICKÝ SEPARÁTOR .....	10
1.2.1 Nabíjení částic .....	10
1.2.2 Základní typy elektrostatických separátorů.....	11
<b>2 CÍLE PRÁCE A SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ.....</b>	<b>13</b>
<b>3 MATEMATICKÝ MODEL.....</b>	<b>14</b>
<b>4 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>15</b>
4.1 KONVERGENCE ŘEŠENÍ.....	16
4.2 ŘEŠENÍ NUMERICKÉHO MODELU .....	19
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ.....</b>	<b>21</b>
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	21
5.1.1 Nabíjecí zařízení .....	21
5.1.2 Separátor .....	22
5.1.3 Zdroj napětí.....	23
5.2 VLASTNÍ EXPERIMENT .....	23
5.2.1 Postup měření účinnosti.....	23
5.2.2 Výsledky měření .....	24
5.2.3 Analýza pohybu částic a korekce výsledků .....	25
<b>6 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>27</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>28</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>29</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$F$ .....	Skalární veličina
$\vec{F}$ .....	Vektorová veličina
$\vec{E}$ .....	Intenzita elektrického pole
$\vec{F}_e$ .....	Coulombova síla
$\vec{F}_a$ .....	Aerodynamická odporová síla
$\vec{F}_g$ .....	Gravitační síla
$\vec{g}$ .....	Gravitační zrychlení
$\vec{v}$ .....	Rychlost částice
$Q$ .....	Elektrický náboj
$\varphi$ .....	Elektrický potenciál
$\varepsilon$ .....	Permitivita prostředí
$c$ .....	Součinitel aerodynamického odporu
$\rho$ .....	Hustota
$m$ .....	Hmotnost částice
$S$ .....	Plocha
$s$ .....	Dráha
$t$ .....	Čas
$n$ .....	Stupeň polynomu
$HDPE$ .....	High-density polyethylen
$PMMA$ .....	Polymethylmethakrylát



## Úvod

Slovo separace má několik různých významů. V obecném pojetí se jedná o oddělování, odlučování či odloučení ať už osob nebo dílčích neživých částí od sebe navzájem. V podstatě se jedná o rozdělení určité množiny na jednotlivé prvky. Různé techniky separace se využívají například ve zdravotnictví, zemědělství, chemii, metalurgii, matematice, a v neposlední řadě v odpadovém hospodářství.

### 1.1 Popis problematiky

V současné době se problematikou separace v oblasti odpadového hospodářství zabývají univerzity a firmy po celém světě, neboť čísla poukazující na množství lidstvem produkováného odpadu stále rostou a je tedy nutné přemýšlet nad recyklací těchto materiálů.

Recyklací je myšlen sběr různých odpadových materiálů a jejich opětovné využití. Je důležitou součástí ochrany životního prostředí. Podle posledních průzkumů lidstvo vyprodukuje více než 1,3 miliardy tun odpadu ročně [1]. Jeho likvidace a znovuvyužití, zejména syntetických polymerních materiálů neboli plastů, je v současné době celosvětovým problémem, neboť se v přírodě přirozenou cestou nerozloží. Při nedokonalém spalování těchto materiálů se do ovzduší dostávají toxické látky, jako jsou oxid uhelnatý, ftaláty a různé další karcinogenní látky. Z toho plyne, že zbavit se těchto odpadů uvedeným způsobem je nepříjemné.

Trendem posledních let je hledání způsobu efektivního, ekologického a ekonomického využití použitých plastů. Vzhledem ke skutečnosti, že odpady produkované civilizací jsou nestejnorodé, fyzické rozřídění je pro jejich opětovné využití nezbytné. V současnosti je využíván systém založený na kontejnerech pro jednotlivé druhy materiálů a následné dotřídění pomocí lidských zdrojů [2].

Alternativou k nahrazení současného recyklačního modelu může být využití mokré [5] nebo suché separace [3]. Mezi suché technologie patří proces elektrostatické separace, kdy je možné na základě několika základních principů separovat různé druhy materiálů. Především vlivem rozdílu ve vodivosti jsou oddělitelné vodivé částice od nevodivých. Je to jedna z možných cest, jak získat cenné kovy např. z elektronického odpadu, nebo naopak jak vyčistit plastové hmoty od kovových částic před dalším využitím.

Výhodou elektrostatické separace je fakt, že lze třídit i různé nevodivé materiály na základě rozdílného elektrického náboje. Toho lze využít při řešení jednoho ze zásadních problémů dnešního odpadového hospodářství, což jsou smíchané plastové hmoty pocházející ze sběrných kontejnerů. Vliv rozdílného nabíjení jednotlivých plastových částic lze s úspěchem využít při konstrukci elektrostatického separátoru, který by mohl nahradit lidské zdroje v třídárnách.

## 1.2 Elektrostatický separátor

Jedná se o zařízení založené na principu elektrostatické separace, což je technologický postup využívaný pro třídění zrnitých směsí pomocí elektrických sil působících na nabitě nebo polarizované částice.

Tento princip pochází již z roku 1879, kdy Theodore B. Osborne navrhl systém na oddělování plev od pomletých obilných zrn [4]. Směs se sypala na rotující buben potažený gumou, která byla triboelektricky nabíjena plastovým kartáčem.

V současné době je výzkum separátorů zaměřen na vývoj účinné suché technologie [5] pro separaci granulárních plastů (plastových odpadů), s cílem přispět k ochraně životního prostředí.

Pro funkci elektrostatických separátorů je bezpodmínečně nutné, aby byly částice před vlastní separací nabity.

### 1.2.1 Nabíjení částic

Pokud se částice dostane do elektrického pole, akumuluje na základě své vodivosti elektrický náboj, přímo závislý na maximální dosažitelné hustotě náboje a na povrchu částice, po kterém se může rozložit. Způsob získání elektrického náboje je několikový. V zásadě je dělení následovné:

- **Bombardování ionty** (ion bombardment)

Těleso získává náboj „bombardováním“ ionty atmosférických plynů vznikajících při korónovém výboji na ionizující elektrodě [6].

- **Vodivostní indukce** (conductive induction)

Pokud se elektricky nenabité těleso (elektricky vodivé i nevodivé) dostane do kontaktu s elektricky nabitým povrchem, okamžitě obdrží stejný potenciál náboj totožné polarizace [5].

- ***Triboelektrický efekt*** (triboelectric effect)

Triboelektrický efekt je jev, který vzniká v důsledku tření dvou různých nevodivých materiálů, jehož výsledkem je vznik elektrického náboje. Je známo, že různé materiály se nabíjí stejným způsobem na různé hodnoty náboje. Síla a polarita náboje na částici závisí na použitém materiálu, jeho drsnosti, okolních vlivech a dalších okolnostech [7-8]. Velikost a polaritu náboje pro různé materiály lze dohledat v triboelektrické řadě [9].

### 1.2.2 Základní typy elektrostatických separátorů

K realizaci samotné separace lze využít několik základních typů elektrostatických separátorů.

- ***Bubnový separátor (roll-type)***

Využívá se zejména tam, kde je třeba oddělit vodivé částice od nevodivých. Princip separátoru spočívá v přivedení materiálu, na povrch uzemněné rotující elektrody, která tyto částice nese elektrickým polem vygenerovaným jednou nebo více aktivními elektrodami.

Tyto elektrody jsou připojené ke zdroji vysokého stejnosměrného napětí. Nabíjení částic je realizováno pomocí ionizace z nabitě elektrody. Je zde využíváno vodivosti jednotlivých složek granulátu. Vodivé složky se velmi rychle vybijí do uzemněné rotující elektrody a jsou svrženy směrem k zemi. Nevodivé složky jsou přidržovány na rotujícím bubnu a pohybují se s ním.

Nejlépeších výsledků dosažených na tomto typu separátoru lze dosáhnout při použití několika elektrod, z nichž první, využívající korónového výboje, je nabíjecí a další vytváří elektrostatické pole. Toto pole neovlivní nevodivé částice, avšak nabije částice vodivé a ty jsou poté silněji přitahovány k vysokonapěťové elektrodě a tím zvýšíme pravděpodobnost dopadu tříděného materiálu na správně místo. Přesto, že je dokázáno, že přítomnost a umístění daných elektrod je prvotním a elementárním problémem při návrhu takového zařízení, je třeba dále uvažovat další faktory ovlivňující přesnost a efektivitu separace. Mezi tyto vlastnosti řadíme zejména rychlost otáčejícího se bubnu, rychlost posuvu daných částic, ale také charakteristiku separovaného materiálu, tj. tvar, složení, velikost atd. [10].

- ***Deskový separátor (plate-type)***

Tato zařízení jsou určena pro separaci jemnozrnných vodivých materiálů od hrubě zrnitých nevodivých. Skládá se typicky ze zahnuté uzemněné kovové desky a vysokonapěťové elektrody. Tyto elektrody bývají většinou oválné.

Materiál je přiváděn do elektrostatického pole. Nevodivé materiály nejsou elektrodou ovlivněny a sklouznou po rovinné desce. Vodivé materiály jsou nabity na základě vodivostní indukce a díky tomu se pohybují vzhůru k nabitě elektrodě [10]. Nejvíce využívané separátory pracují tak, že částice se gravitací dostanou na uzemněnou elektrodu do elektrostatického pole vytvořeného vysokonapětovou elektrodou. Pohyb nevodivých částic je tímto elektrostatickým polem neovlivněn.

- ***Vertikální separátor (free-fall)***

Tato zařízení jsou využívána k separaci různých dielektrických materiálů [3]. Naprostá většina, ne-li všechny triboelektrické separátory byly původně vyvinuté pro oddělování minerálních rud. Touto problematikou se lidstvo zabývá od začátku 90.let 20.století, tudíž se jedná o poměrně novou technologii [11]. Tato zařízení jsou tvořena nabíjecí jednotkou, několika sběrnými kolektory a dvěma deskami vytvářející elektrické pole.

Princip takového separátoru spočívá v zavedení granulovaného materiálu do nabíjecí jednotky, kde se vlivem různých srážek o stěny a třením nabije buď pozitivním, nebo negativním nábojem. Další fází tohoto procesu je již samotné třídění na jednotlivé segmenty. Vlivem elektrického pole, které vzniká mezi nabitými deskami, připojenými ke zdroji vysokého stejnosměrného napětí, jsou částice vychylovány Coulombovo silou z původně kolmého horizontálního směru pohybu. Částice, které nebyly dostatečně nabitě, se poté shromažďují v centrálním kolektoru.

Účinnost této separace závisí zejména na schopnosti řídit nabíjení separovaných částic, což je proces, který je velmi složitě popsatelný a je pro nás zatím jen těžko předvídatelný.

## 2 Cíle práce a současný stav znalostí

Cílem této práce je formulovat a popsat obecný matematický model pohybu elektricky nabitých částic v elektrostatickém separátoru typu free-fall a provést jeho numerické řešení pro případ experimentálního zařízení. Následně pak experimentálně ověřit danou technologii a srovnáním numerického modelu s výsledky experimentu stanovit přibližné hodnoty potřebného elektrického náboje.

Pro účely této práce bylo na Katedře teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické v Plzni sestaveno experimentální zařízení, které bylo využito k základním experimentům s nabíjením a vychylováním částic HDPE (high-density polyethylene).

V současné době se separací plastových materiálů pomocí triboelektrického separátoru free-fall zabývá několik výzkumných týmů z celého světa. Jsou mezi nimi například členové z University of Poitiers, Francie [13], Technical University of Cluj-Napoca, Rumunsko [14] University Djillali Liabes of Sidi Bel Abbes [12] nebo také z University of Tokyo, Japonsko [3]. Žádné průmyslově využitelné zařízení však není k dispozici a daná technologie je ve fázi výzkumu.

V roce 2012 vznikl na Katedře teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické v Plzni projekt zabývající se touto technologií. Na základě tohoto projektu byly publikovány práce zabývající se numerickým modelováním výpočtu trajektorie částic v elektrickém poli a také využití multikriteriální tvarové optimalizace elektrod triboelektrického separátoru typu free-fall [15].

### 3 Matematický model

Jak je patrné z obrázku, model je tvořen dvěma deskami, jež jsou hlavními elektrodami systému. Částice, nabitá nábojem  $Q$ , padající rychlostí  $v_0$ , se dostávají do prostoru mezi elektrodami, přičemž na jednu z nich je přivedeno vysoké napětí  $U$  a druhá je uzemněná. Pohyb částic je ovlivněn polaritou a velikostí náboje. V tomto modelu zanedbáváme vzájemnou Coulombovu sílu mezi jednotlivými částicemi, tudíž předpokládáme, že pohyb v separátoru je ovlivněn pouze vnějším elektrickým polem.

Elektrostatické pole mezi elektrodami separátoru je popsáno parciální diferenciální rovnicí pro elektrický potenciál

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} \varphi) = 0, \quad (1)$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita a  $\varphi$  elektrický potenciál. Okrajové podmínky jsou dány známými potenciály elektrod a Neumannovo podmínkou definovanou na fiktivní hranici řešené oblasti. Pohyb částice v elektrostatickém poli je pak popsán pohybovými rovnicemi

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_a + \vec{F}_g, \quad \vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}, \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnost částice,  $v$  rychlost,  $t$  čas,  $\vec{F}_e$  Coulombova síla,  $\vec{F}_a$  aerodynamický odpor prostředí,  $\vec{F}_g$  gravitační síla a konečně  $s$  dráha. Coulombova síla je popsána vztahem

$$\vec{F}_e = Q\vec{E} = -Q \operatorname{grad} \varphi, \quad (3)$$

kde  $Q$  je náboj částice,  $\vec{E}$  intenzita elektrického pole a určující sílu elektrického pole v daném bodě. Síla  $\vec{F}_a$  reprezentuje aerodynamický odpor částic. Jedná se o odporovou sílu vyjadřující závislost odporu prostředí na tvaru tělesa. Je dána rovnicí

$$\vec{F}_a = -\vec{v} \frac{1}{2} \rho c S v, \quad (4)$$

kde  $c$  je součinitel aerodynamického odporu, který zohledňuje tvar a kvalitu povrchu tělesa,  $\rho$  reprezentuje hustotu prostředí, ve kterém se separátor nachází, tj. vzduch.  $S$  je aktivní plocha zkoumané částice a  $v$  velikost její rychlosti. Poslední silou vystupující v pohybové rovnici je tíhová síla

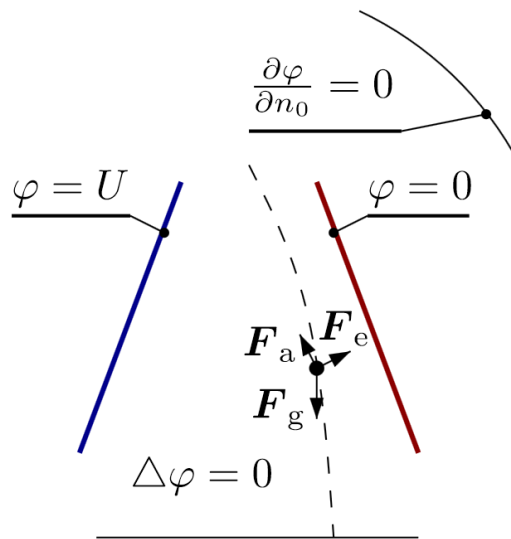
$$\vec{F}_g = m \vec{g}, \quad (5)$$

kde  $m$  je hmotnost částice a  $\vec{g}$  je gravitační zrychlení.

## 4 Numerické řešení

Matematický model definovaný v předchozí kapitole byl numericky řešen pomocí aplikace Agros2D [16]. Jedná se o multiplatformní aplikaci s využitím při řešení elektrostatických, magnetických, akustických, tepelných a dalších typů fyzikálních polí. Ke své činnosti využívá C++ knihovnu Hermes, která je společně s Agros2D vyvíjena na Katedře teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické v Plzni.

Oblast řešení (definiční oblast) problému je definována dle obr. 1. Na elektrodách jsou stanoveny Dirichletovy okrajové podmínky (známý elektrický potenciál) a na hranici definiční oblasti je umístěna nulová Neumannova podmínka (fiktivní hranice problému).



Obr. 1 Definice okrajových podmínek

V rámci řešení numerického modelu jsou definovány dvě základní úlohy. V první řadě se jedná o vyšetření poměrů v elektrostatickém poli na základě uvedené rovnice (2). Použitou metodou řešení je metoda konečných prvků (Finite Elements Method). Princip této metody je založen na diskretizaci spojité veličiny do konečného počtu prvků diskretizační sítě. Zjišťované parametry jsou dále zkoumány pouze v uzlech této sítě a řešení na elementech mezi těmito uzly je proloženo polynomem stupně  $n$ , díky němuž jsme schopni získat výsledek v jednotlivých oblastech.

V našem případě se jedná o spojitou oblast mezi deskami modelovaného separátoru, která je programem rozdělena na konečný počet prvků (pro diskretizaci definiční oblasti je v Agros2D využíván program Triangle, který využívá Delaunayho triangulace [17]), ve kterých je separátně řešena daná rovnice.

Druhým úkolem numerického řešení formulovaného modelu je stanovit náboj potřebný ke správnému vychýlení částic do kolektorů. K získání této informace je třeba vyřešit pohybové rovnice (3) uvedené v kapitole 2. Použitá metoda se nazývá Runge-Kutt-Fehlberg s adaptivním krokem. Základní výhodou tohoto řešení je značné ušetření výpočetního času, kdy se poloha částic stanoví pouze v bodech, ve kterých se odehrává větší změna řešené veličiny.

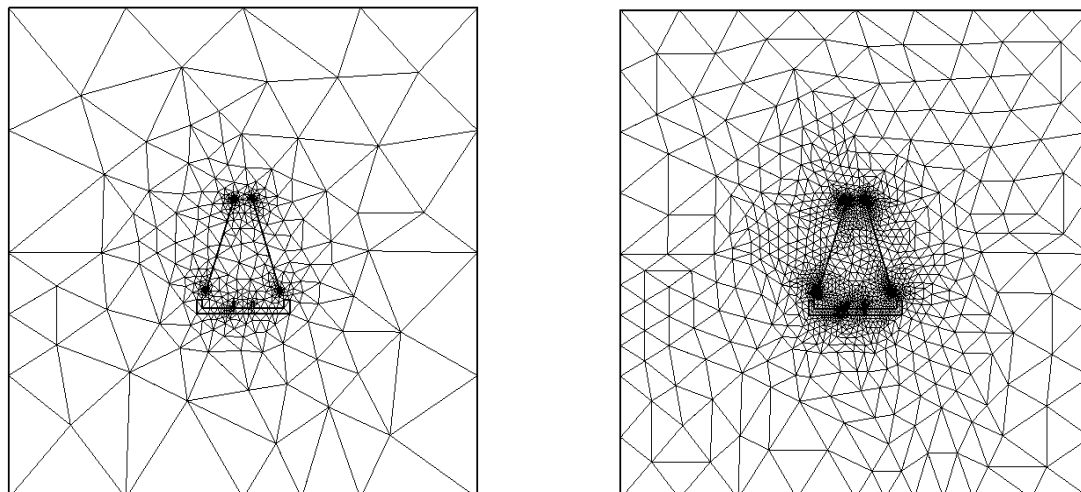
#### 4.1 Konvergence řešení

Při samotném modelování těchto úloh je třeba zajistit vhodné podmínky, pro co nejpřesnější stanovení výsledků. Je zapotřebí vhodně zvolit definiční oblast a provést její korektní diskretizaci, aby nedocházelo k devalvací výsledků, a zároveň nebyl algoritmus zbytečně výpočetně náročný. Jelikož nejsme schopni toto nastavení předem stanovit, je nezbytně nutné provést konvergenci řešení.

Konvergence řešení je v tomto případě založena na zkoumání vlivu různého zjemnění řešené sítě a řádu polynomu, kterým je dané řešení na každém elementu proloženo. Navýšení zjemnění sítě a zároveň i řádu polynomu může být vhodné pro přesnější řešení dané úlohy za cenu zvýšení výpočetní náročnosti. Ta však způsobí, že v některých aplikacích nejsou současné počítače schopné dosáhnout požadovaného výsledku. Z toho plyne, že nelze automaticky nastavit, co nejvyšší počet zjemnění a řád polynomu. V blízkosti ostrých hran elektrod dochází k velkým změnám rozložení elektrického potenciálu a tak je důležité v těchto místech dostatečné zjemnění výpočetní sítě. Naopak v okolním prostoru je rozložení potenciálu hladké a je tedy vhodné vyšší řád polynomu.

Obr. 2 ukazuje rozdíl mezi nezjemněnou (počáteční) diskretizační a sítí lineárně zjemněnou.





. Obr. 2 Porovnání nezjemněné a zjemněné sítě

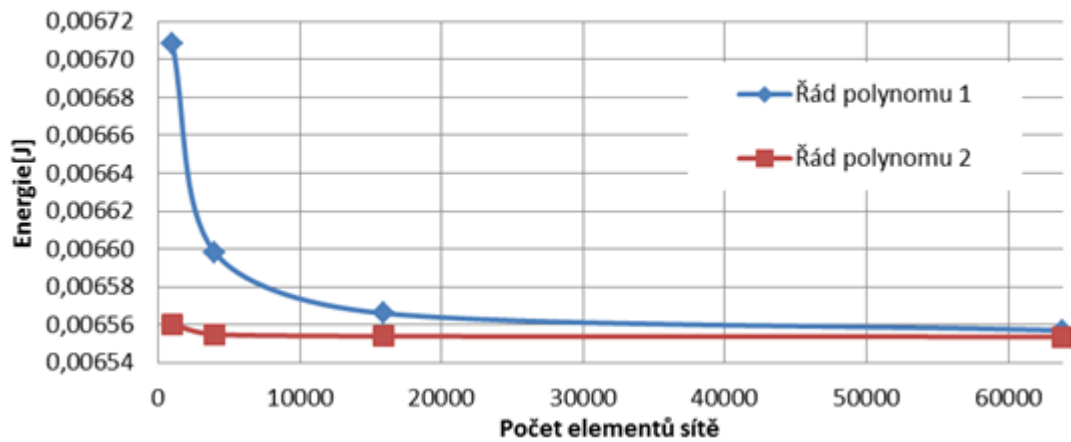
V následujících tabulkách jsou vyobrazeny výsledky konvergence řešení při proložení řešených oblastí polynomem 1. a 2. řádu. Byla zkoumána závislost počtu elementů na energii v definiční oblasti a na poloze vychylovaných částic vzhledem k ose separátoru. Do grafu byla vynesena porovnání jednotlivých nastavení.

Počet zjemnění	Počet elementů	Energie [J]	Konečná poloha částice [m]
0	997	0,0067086	-0,252059628
1	3988	0,0065983	-0,252363615
2	15952	0,0065661	-0,252332702
3	63808	0,0065571	-0,252223543

Tab. 1 Konvergence při proložení polynomem 1. řádu

Počet zjemnění	Počet elementů	Energie [J]	Konečná poloha částice [m]
0	997	0,0065604	-0,251280699
1	3988	0,0065550	-0,252373209
2	15952	0,0065540	-0,252528892
3	63808	0,0065537	-0,252512132

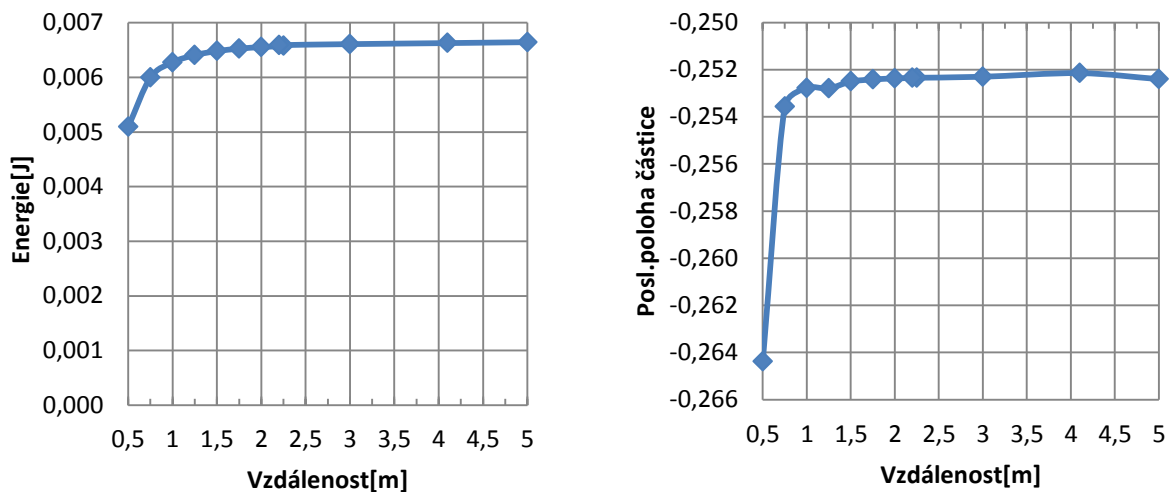
Tab. 2 Konvergence při proložení polynomem 2. řádu



Obr. 3 Výsledek konvergence řešení

Z průběhu grafu na obr. 3 je možné usoudit, že pokud je zvolen 2. řád polynomu a počet zjemnění 1, energie v systému se již výrazně nemění, tudíž je výpočetní náročnost a přesnost dostatečná ke stanovení výsledků.

Pro provedení správné konvergence je zapotřebí umístit hranici definiční oblasti do takové vzdálenosti, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků. V následujícím grafu je demonstrován vliv vzdálenosti definiční oblasti od osy separátoru na celkové energii systému a poloze částice po dopadu při výpočetních podmínkách stanovených na základě obr. 4.

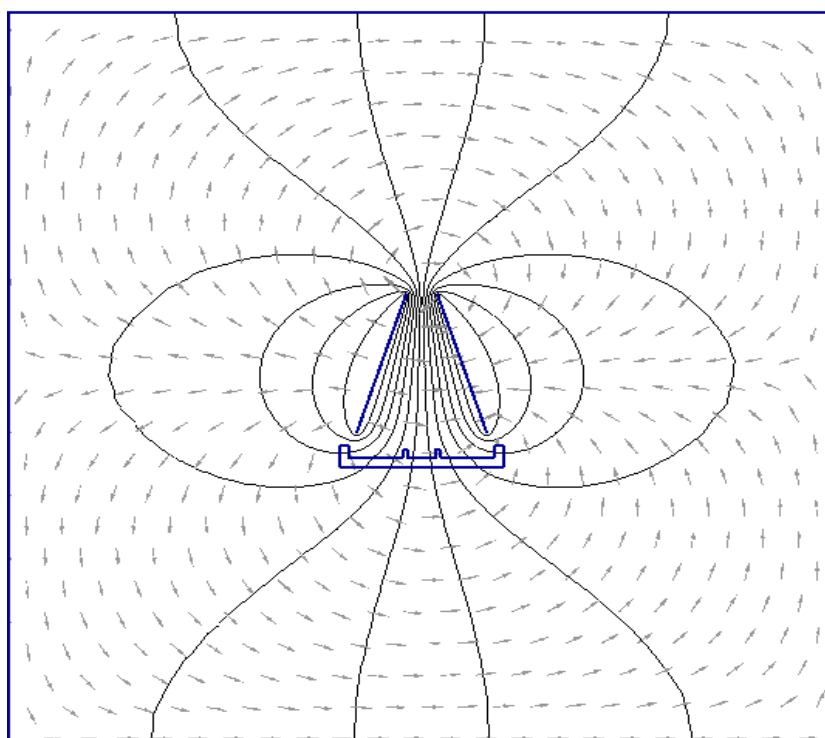


Obr. 4 Vliv vzdálenosti vnější hranice od osy separátoru na energii a umístění částice

Dle výsledků konvergence postačí vnější (fiktivní) hranici definiční oblasti umístit ve vzdálenosti 2 metrů při zachování podmínek odvozených z výpočetní složitosti. Energie ani výsledná poloha se s vyšší vzdáleností definiční oblasti výrazně nemění. Výsledek by již neměl být ovlivněn zvolenými podmínkami modelu.

## 4.2 Řešení numerického modelu

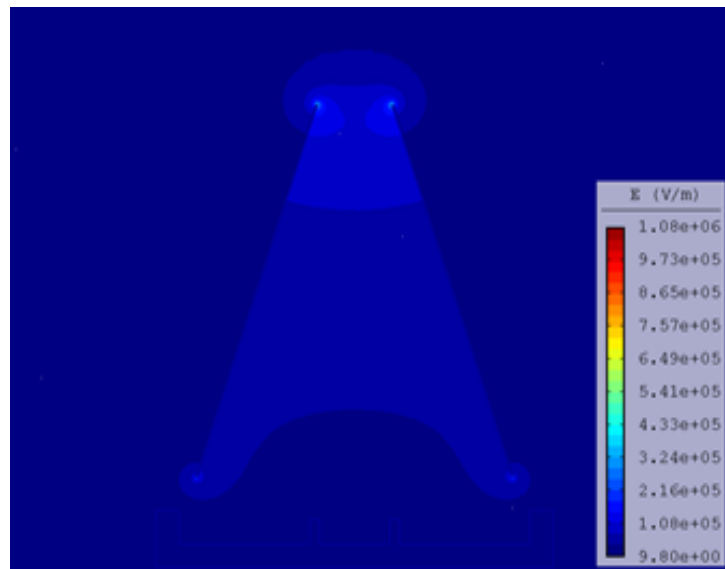
Numerickým vyřešením daného problému je v první řadě získán určitý náhled na poměry v elektrostatickém poli. Jedním ze základních ukazatelů jsou rozložení elektrostatického potenciálu (obr. 5) a intenzity elektrického pole v celé definiční oblasti (obr. 6).



Obr. 5 Rozložení elektrického potenciálu v separátoru

Z obr. 5, na kterém jsou vykresleny ekvipotenciály (místa se stejným elektrickým potenciálem) a vektory znázorňující gradient pole je patrné, že k nejzásadnějším změnám v potenciálu dochází uvnitř zařízení, v důsledku čehož je zde vyšší intenzita elektrického pole.

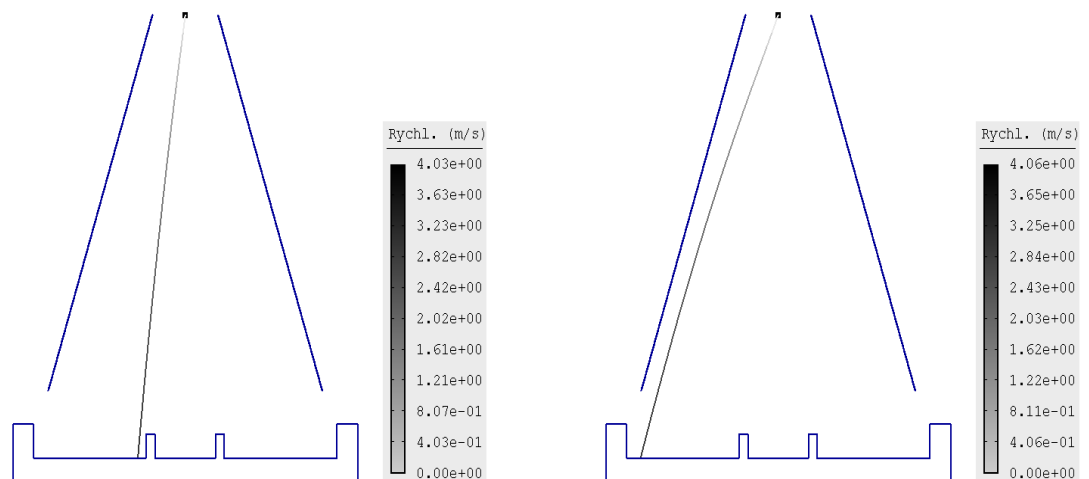
Rozložení intenzity elektrického pole je zobrazeno na obr. 6, ze kterého je zřejmé, že téměř veškerá energie pole je soustředěna uvnitř zařízení, což je správným předpokladem pro účinné vychylování částic.



Obr. 6 Rozložení elektrického intenzity v separátoru

Výsledkem numerického řešení jsou teoretické trajektorie částic zkoumané pro určitý elektrický náboj, který je předem nastaven v podmínkách formulovaného problému. Na základě těchto trajektorií je určena přibližná hodnota náboje, který je nutný ke správnému vychýlení definovaného materiálu (HDPE).

Na základě těchto výpočtů byl potřebný náboj stanoven v intervalu 350 – 1000 pC. V tomto rozmezí se tok částic usměřňuje do náležitých kolektorů. Situace je patrná na obr. 7.



Obr. 7 Výsledné trajektorie získané vyřešením numerického modelu

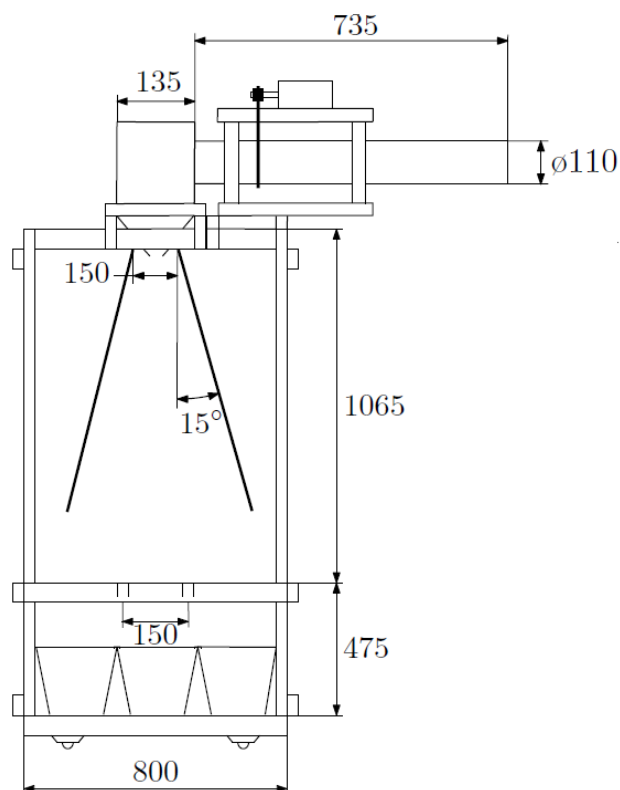
## 5 Experimentální ověření

Principem experimentu bylo ověření teoretických předpokladů získaných na základě numerického modelu. Bylo pracováno se 100 gramy částic HDPE ( $\rho = 960 \text{ g/cm}^3$ ), napětí na elektrodách bylo 20 kV.

### 5.1 Experimentální zařízení

Formulovaný model a jeho numerické řešení bylo prakticky realizováno na experimentálním separátoru, který byl v rámci práce postaven. Skládá se z několika základních částí. Nabíjecího zařízení, separátoru, zdroje napětí a sběrných kolektorů.

Celkové rozměry a konstrukční řešení zařízení jsou patrné z obr. 8, kde je vyobrazeno nastavení elektrod a čelní pohled nosné konstrukce s nabíjecím zařízením.



Obr. 8 Rozměry a konstrukce experimentálního zařízení [mm]

#### 5.1.1 Nabíjecí zařízení

Zařízení je vyrobeno z tvrdé, rotující polyvinylchloridové (obch. název Novodur) trubice, která je upevněna v nosné dřevěné konstrukci. Z jedné strany trubice jsou přiváděny nenabitě (neutrální) částice ve formě granulátu, které se uvnitř nabíjí a opustí zařízení. Trubice je

rozdělena přepážkami na segmenty. Na výrobu těchto přepážek byl využit kompozitní nevodivý materiál vytvořený ze skleněné tkaniny zalité epoxidovou pryskyřicí (skloepoxidový laminát), který se mimo jiné používá například i pro výrobu desek plošných spojů v elektronice. Tyto přepážky zpomalují průchod částic zařízením. Předčasné opuštění trubice by mělo za následek nedostatečné nabití částic.

Rotace trubice je zajištěna stejnosměrným motorem se jmenovitým napětím 18V, napájeným z regulovatelného zdroje napětí, spojeným přes gumový řemen s trubicí. Pomocí napájecího napětí a měřiče otáček jsme schopni operativně měnit rychlost otáčení trubice. Takto sestavené nabíjecí zařízení bylo umístěno na separátor.

### **5.1.2 Separátor**

Nosná konstrukce samotného zařízení byla vyrobena z dřevěných latí nařezaných na patřičné rozměry. Byly vyvrtány konstrukční otvory, otvory pro upevnění stěn, které byly vytvořeny z PMMA (polymethylmethakrylát) desek, a dále otvory umožňující změnu základních parametrů (vzdálenost elektrod, posun nabíjecího zařízení atd.).

#### **5.1.2.1 Podavač**

První součástí, která přijde do kontaktu s nabitými částicemi je tzv. podavač (angl. feeder), který je nedílnou součástí separátoru. Slouží k usměrnění toku částic z nabíjecího zařízení. Je bezpodmínečně nutné, abychom zajistili co nejnižší elektrickou vodivost použitého materiálu, proto byl podavač slepen z nařezaných destiček skloepoxidového laminátu. Jelikož je třeba centralizovat materiál do středu působícího pole, je nutné vytvořit takový tvar dna (trychtýřovitý), který umožňuje přirozené sesunutí materiálu do vytvořeného otvoru uprostřed podavače.

#### **5.1.2.2 Elektrody**

Základní částí separátoru jsou dvě pohyblivé elektrody, mezi kterými je vytvořeno elektrostatické pole. Jsou vyrobeny z hliníkových plátů o tloušťce 1 mm a mají rozměry 800x300 mm. Spodní hrana elektrod je zavěšena na provázkách, které jsou upevněny v otvorech na bočních PMMA stranách separátoru. Díky tomu je možné měnit úhel mezi elektrodami.

### 5.1.2.3 Sběrné kolektory

Nabité částice se po prolétnutí prostorem mezi deskami dostávají ke sběrným kolektorům, které jsou nedílnou součástí každého podobného zařízení. Jsou tvořeny tkaninami, které usměřují částice do předpřipravených plastových krabic, ve kterých se separovaný materiál shromažďuje.

### 5.1.3 Zdroj napětí

Rozdíl elektrických potenciálů, který elektrostatické pole vytváří, je třeba produkovat vysokonapěťovým zdrojem. Jednou z jednodušších a zde používaných metod je využití Wimshurstova generátoru. Ten pracuje na principu otočných protichůdných kotoučů, ze kterých se sbírají náboje opačných polarit do kondenzátorů. Vytváří opačné potenciály, tudíž po připojení vývodů kondenzátorů k elektrodám separátoru vzniká mezi elektrodami elektrostatické pole.

Wimshurstův generátor jako takový neumožňuje kontrolovat velikost vytvářeného napětí. Jelikož toto napětí bývá velmi vysoké (v řádu kV), není snadné jeho velikost měnit. K tomuto účelu může velmi dobře posloužit elektrostatický kV – metr. Principem je vychýlení zrcátka elektrostatickým polem. Na základě vychýlení se přes něj odrazí světlo ze světelného zdroje na určité místo na stupnici cejchovanou v kV.

## 5.2 Vlastní experiment

Nejprve je nutné stanovit účinnost zařízení na základě správně vychýlených částic (do správného koše) a dále porovnání trajektorií získaných z numerického modelu a experimentu. Samotné experimenty byly několikrát opakovány, vždy s podobným výsledkem.

### 5.2.1 Postup měření účinnosti

Stanovený granulát HDPE o celkové hmotnosti 100 gramů, byl vsypán do nabíjecí soustavy a následně vpouštěn do separátoru. Cílem experimentu bylo potvrdit funkčnost celého zařízení a změřit vliv různé délky nabíjení při různých rychlostech otáčení nabíjecí trubice na účinnost umístění jednotlivých částic do správných kolektorů. Díky stanovené hmotnosti vzorku 100 gramů je účinnost vyjádřena jako hmotnost částic, které jsou umístěny do správného koše.

### 5.2.2 Výsledky měření

Proces nabíjení HDPE v navrženém zařízení je nepředvídatelný a je ovlivněn četnými srážkami samotných částic, ale i kontakty se stěnou nabíjecího ústrojí. Je více než jasné, že vliv rychlosti otáčení nabíječe a doba nabíjení nebudou zanedbatelné. Proto je nutné tyto skutečnosti brát v úvahu. V následující tabulce je vynesena výsledek pokusu při konstantních otáčkách nabíjecího zařízení, přičemž pro separaci je směrodatný obsah levého koše, do kterého dopadají korektně vychýlené částice HDPE.

Doba nabíjení[ <i>min</i> ]	Otáčky [ot. / <i>min</i> ]	Množství separátu [g]		
		Levý koš	Prostřední koš	Pravý koš
3	150	54,70	42,30	2,96
3	300	63,61	32,5	3,9
3	600	30,9	66,1	3

Tab. 3 Výsledek experimentu při konstantních otáčkách nabíjecího zařízení

Jak je patrné z výsledků experimentu, nejnižší počet částic byl správně umístěn při rychlosti 600 ot. /*min*.. Při této rychlosti se již velmi výrazně projevuje vliv odstředivé síly, v důsledku čehož ulpívá částice na stěně nabíjecí trubice. Následkem je menší tření částic, jak o sebe tak o nabíjecí trubici, což způsobuje menší účinnost nabíjení. Z tohoto měření byl vyvozen závěr, že ideální rychlost pro tento pokus se pohybuje okolo 300 otáček za minutu. Dále bylo pracováno s touto hodnotou.

Doba nabíjení[ <i>min</i> ]	Otáčky [ot. / <i>min</i> ]	Množství separátu [g]		
		Levý koš	Prostřední koš	Pravý koš
2	300	59,2	38,6	2,18
4	300	75,4	20,89	3,71

Tab. 4 Výsledek experimentu při konstantní době nabíjení

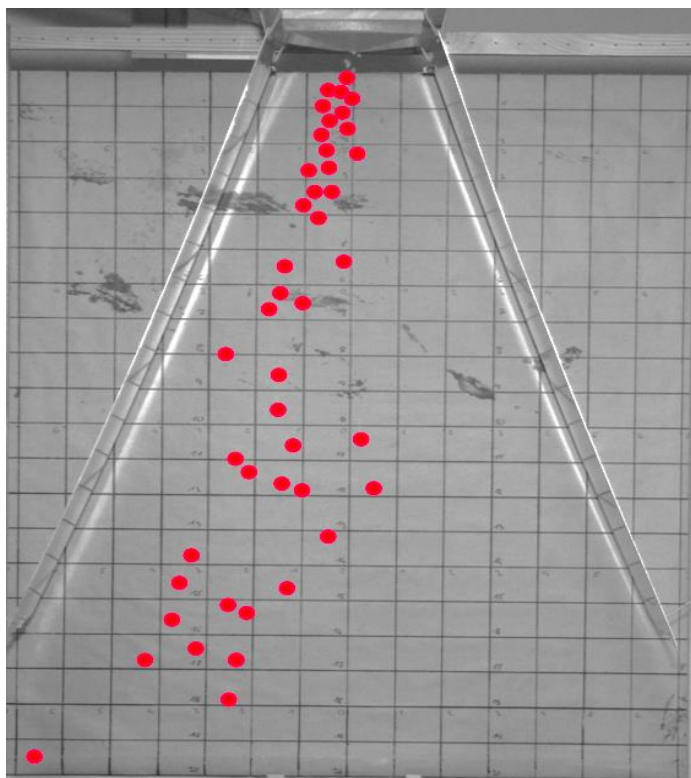
Tab. 4. demonstruje druhou část pokusu, kde jsme již měli stanovenou potřebnou rychlost rotace nabíjecí trubice. Byl měřen vliv délky nabíjení. Při příliš krátké době nabíjení se částice nebyli schopné nabít a tudíž dostatečně vychýlit. Z výše uvedené tabulky vyplývá, že největší účinnosti jsme dosáhli při rychlosti otáčení 300 ot. /*min* a době nabíjení 4 minuty.



### 5.2.3 Analýza pohybu částic a korekce výsledků

Výsledkem numerického řešení jsou teoretické trajektorie částic, které ohraničují oblast, ve které se vyskytují správně vychylované částice o stanoveném elektrickém náboji. K vizuálnímu porovnání, zda se částice v experimentálním zařízení při separaci v této oblasti nacházejí, bylo nutné stanovit jednotlivé polohy částic HDPE během jejich pohybu mezi elektrodami.

K tomuto účelu byl využíván fotoaparát s velmi vysokým rozlišením a manuálním nastavením expozice. Ten byl umístěn před čelní stranou separátoru a snímal prostor mezi elektrodami, za kterými byl umístěn papírový rastr, díky němuž byla posléze určena poloha částic z fotografií. Obr. 9 s vyznačenými polohami částic naznačuje, jak vypadají jednotlivé snímky, které jsou z měření získány.



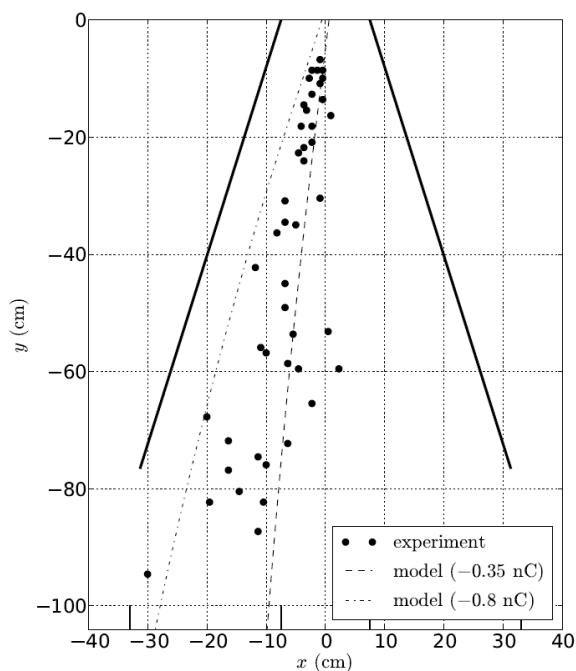
Obr. 9 Snímek z fotoaparátu s vyznačenými částicemi

Pro porovnání výsledků získaných použitým fotoaparátem s numerickým řešením bylo nutné snímky korigovat. Čím více jsou částice na snímku vzdáleny od osy, ve které byl umístěn fotoaparát, tím je vyšší nepřesnost odečtené polohy částice na snímku oproti skutečnosti. Situaci demonstruje obr. 10.



## 6 Diskuze výsledků

Výsledné snímky experimentu byly po provedené korekci společně s trajektoriemi reprezentující teoretické hranice elektrického nábojem umístěny do vytvořeného modelu separátoru v dvoudimenzionálních souřadnicích. Jejich vzájemným porovnáním (obr. 11) je funkčnost experimentálního zařízení potvrzena.



Obr. 11 Porovnání numerického řešení s experimentem

Bylo zjištěno, že většina částic, které se na tomto snímku vyskytují, se nacházejí v předem stanovené oblasti ohraničené hodnotami elektrického náboje, tudíž lze usoudit, že částice jsou nabitý požadovaným nábojem. Částice při prováděném experimentu nezískávají, tak velký náboj a je tedy zobrazena vypočtená trajektorie pro 0,8 nC.

Na upraveném zařízení byly v závěru práce provedeny také experimenty se separací směsi 50 g HDPE a 50g PMMA. Při době nabíjení 210 s a otáčkách nabíjecí trubice 300 ot./min. bylo dosaženo účinnosti separace 87 %. Výsledná čistota separátu byla 96 % pro HDPE a 97 % pro PMMA. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5.

Koš	Celková hmotnost [g]	Hmotnost HDPE [g]	Hmotnost PMMA [g]	Účinnost [%]
Levý	44,66	43,06	1,56	87
Pravý	45,39	1,3	44,07	

Tab. 5 Výsledky separace směsi HDPE a PMMA

## Závěr

Obsahem této práce byl teoretický rozbor a popis problematiky elektrostatické separace se zaměřením na třídění odpadových plastů před jejich recyklací. V práci byl formulován obecný matematický model triboelektrického separátoru typu free-fall. V rámci práce bylo sestaveno experimentální zařízení, pro které byla provedena numerická simulace vychylování částic HDPE. Výsledky byly následně experimentálně ověřeny. Část výsledků práce byla prezentována v rámci SVOČ (Studentská vědecká odborná činnost) na Fakultě elektrotechnické v Plzni [18].

Práce byla pojata jako první přiblížení široké problematiky. Jejím úkolem bylo zejména ověřit funkčnost prvního návrhu experimentálního zařízení a to na vychylování částic HDPE. Na základě výsledků této práce bylo experimentální zařízení upraveno a vylepšeno. Experimenty provedené na upraveném zařízení ukazují, že při separaci granulátu HDPE a PMMA se dosahuje čistoty výsledných separátů až 97 % přičemž účinnost zařízení dosahuje takřka 90 % a to již při napětí elektrod 20 kV. Většina částic HDPE byla větších než 2 mm. Experimenty provedené s těmito částicemi ukazují, že při správné technice nabíjení lze dosáhnout vysoké účinnosti i s touto velikostí částic navzdory tomu, jak je uvedeno v [12].

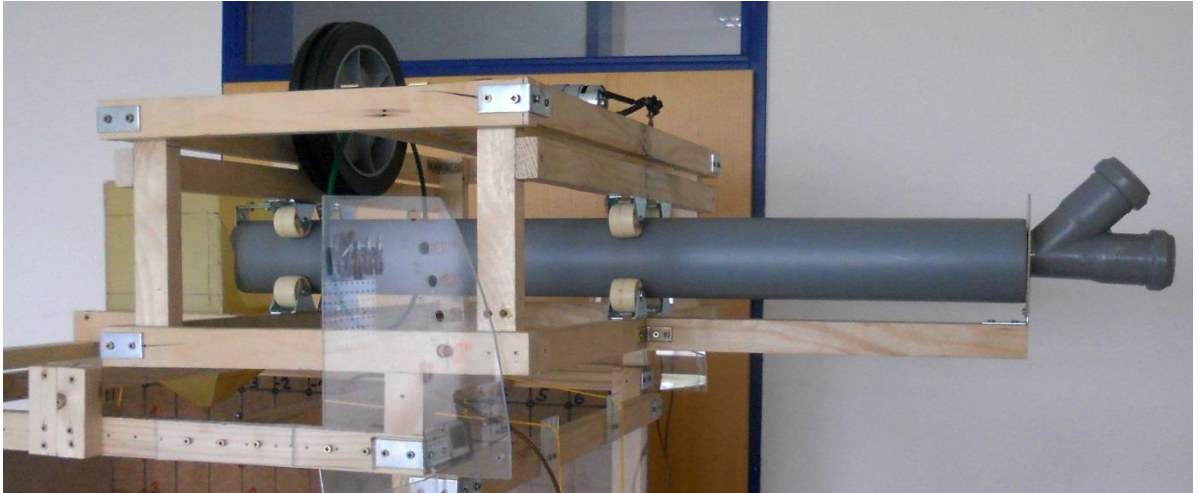
Další pokračování práce bude zaměřeno na experimenty s nejvíce zastoupenými plastovými materiály, mezi které patří PET (polyethylentereftalát), PS (polystyren), PE (polyethylen), PP (polypropylen) a PVC (polyvinylchlorid). Matematický model bude dále rozšířen o vzájemné interakce mezi částicemi. V rámci projektu budou také experimentálně zkoumány výsledky tvarové optimalizace elektrod a její vliv na účinnost separace zařízení [15].

## Seznam literatury a informačních zdrojů

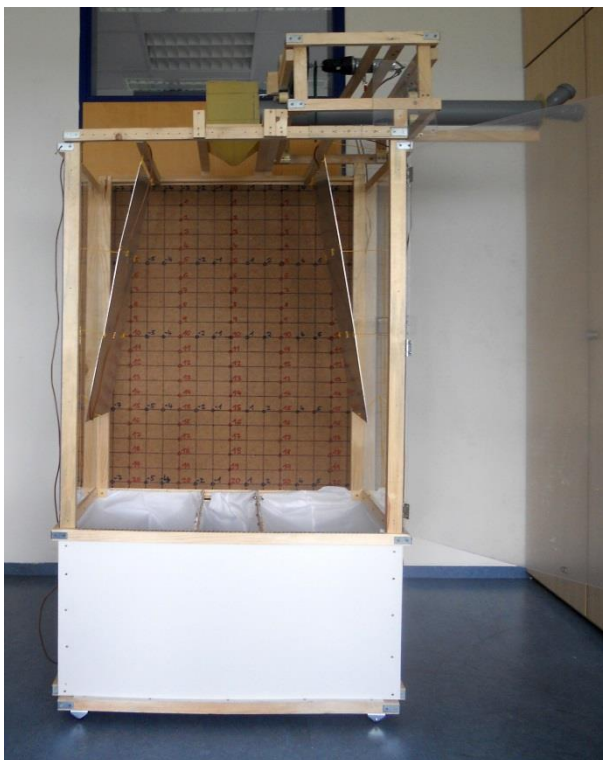
- [1] Lidstvo ročně vyprodukuje více než miliardu tun odpadu. Na samém vrcholu jsou američané[online]. Poslední změna 25.7.2012 [Cit. 2.3.2013]. Dostupné z: <http://zpravy.ihned.cz/c1-56727300-lidstvo-rocne-vyprodukuje-vice-nez-miliardu-tun-odpadu-na-samem-vrcholu-jsou-americane>
- [2] Umělohmotná recyklace [online]. [Cit. 2.3.2013]. Dostupné z: [http://www.trideniodpadu.cz/trideniodpadu.cz/Jak\\_se\\_recykluje/Entries/2011/11/17\\_Jak\\_se\\_recykluji\\_plasty.html](http://www.trideniodpadu.cz/trideniodpadu.cz/Jak_se_recykluje/Entries/2011/11/17_Jak_se_recykluji_plasty.html)
- [3] DODBIBA, G., et al. Progress in separating plastic materials for recycling. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2004, 13.3-4: 170-173 s.
- [4] SULOVSÝ, PETR Metody laboratorního výzkumu hornin a minerálů [prezentace]. Olomouc : Univerzita Palackého, [Cit. 2.3.2013]. Dostupné z: [http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab\\_metody/Metody2.pdf](http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab_metody/Metody2.pdf)
- [5] 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.
- [6] IUGA, AI, et al. Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals. *Journal of Electrostatics*, 1989, 23: 235-243 s.
- [7] INCULET, I. I.; CASTLE, G. S. P.; BROWN, J. D. Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics. In: *Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE*. IEEE, 1994. 1397-1399 s.
- [8] KWETKUS, B. A. Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process. *Particulate science and technology*, 1998, 16.1: 55-68 s.
- [9] DAVIES D.K.: Charge generation on dielectric surfaces, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 2, Issue 11, pp. 1533-1537, doi: 10.1088/0022-3727/2/11/307
- [10] DASCALESCU, Lucian, et al. Charges and forces on conductive particles in roll-type corona- electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31.5: 947-956.
- [11] INCULET, I. I.; CASTLE, G. S. P. Tribo-electrification of commercial plastic in air. *Inst. Phys. Conf., Ser. No. 118: Section 4, paper presented at Electrostatics '91 (1991)*, 217–222 s.
- [12] TILMATINE, Amar, et al. Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46.4: 1564-1569 s.
- [13] TILMATINE, A.; DASCALESCU, L. Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles. *International Journal of Environmental Studies*, 2010, 67.1: 27-40 s.
- [14] CALIN, Laur, et al. Controlling particle trajectory in free-fall electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44.4: 1038-1044.
- [15] MACH, F., et al. Optimized arrangement of device for electrostatic separation of plastic particles. In: *ELEKTRO, 2012. IEEE, 2012*. 431-434 s.
- [16] KARBAN, Pavel, et al. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D. *Computing*, 1-28.
- [17] SHEWCHUK, Jonathan Richard. Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. In: *Applied computational geometry towards geometric engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 1996., 203-222 s.
- [18] KAMINSKÝ, Tomáš: Numerický model a experimentální ověření pohybu elektricky nabitých částic v triboelektrostatickém separátoru. In : *Sborník SVOČ 2013. Plzeň, 2013*, 35 s.

## Přílohy

### Příloha A – Fotografie experimentálního zařízení



Nabíjecí zařízení



Celkový pohled na separátor, systém elektrod a za nimi umístěný rastr