

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektrostatická separace zemědělských plodin**

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

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ŠULA**  
Osobní číslo: **E15N0122P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Elektrostatická separace zemědělských plodin**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vysvětlete fyzikální princip elektrostatické separace a proveďte průzkum v současnosti využívaných separátorů. Akcentujte využití v zemědělství.
2. Navrhněte zařízení pro elektrostatickou separaci zemědělských plodin.
3. Experimentálně ověřte možnosti elektrostatického rozdělování zemědělských plodin.
4. Komplexně zhodnoťte zkoumanou technologii z hlediska vhodnosti jejího využití v zemědělství (účinnost, vhodnost pro konkrétní druhy plodin, technologická náročnost, ekonomické aspekty, atd.).



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MACH, F., ADAM, L., KACEROVSKÝ, J., KARBAN, P., DOLEŽEL, I. Evolutionary algorithm-based multi-criteria optimization of triboelectrostatic separator. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014, roč. 270, č. 9583, s. 134-142. ISSN: 0377-0427
2. ABDEL-SALAM, M., AHMED, A., EL-KISHKY, H. Seeds sorting by electrostatic separation: An experimental study. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2004. CEIDP'04. 2004 Annual Report Conference on. IEEE, 2004. p. 377-380.
3. POGELIENE, A., et al. Utilization of strong electric field for special cleaning buckwheat seeds. *Agronomy research*, 2008, 6: 291-298.
4. HARMOND, Jesse Edward, et al. Seed cleaning by electrostatic separation. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers, 1960.
5. Další bude předána při konzultaci.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

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



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na ověření možnosti použití elektrostatické separace pro třídění zemědělských plodin. Zejména je orientována na možnost aplikace principů elektrostatické separace pro čištění zrn základní kultury od nežádoucích příměsí v podobě nečistot a semen plevelných rostlin. Práce poskytuje přehled různých známých druhů separátorů společně s vysvětlením jejich fyzikálních principů. Na základě znalosti těchto principů byl proveden návrh a následné sestavení experimentálního zařízení pro ověření separovatelnosti směsí rostlinného charakteru. Experimenty byly prováděny na řadě směsí zemědělských kulturních plodin s různými materiály představujícími nečistoty v obilné mase.

## **Klíčová slova**

Separace, Elektrostatická separace, Separátor, Semena rostlin, zemědělské plodiny, plevy

## Abstract

The presented thesis is focused on the verifying the possibility of using electrostatic separation for a separation of crops. Especially, The thesis verifies possibilities of applications of the principles of the electrostatic separation during cleaning grains of major seed culture from impurities. The impurities consist of dirt, weed seeds, and others plant and non-plant materials. The thesis provides an summary of various discovered types of separators and explanations of their physical principles. A proposal of an experimental device was based on the knowledge of these principles. After that, the elektrostatic separator has been constructed for verification separability mixture of agricultural crops. Experiments has been performed for mixtures of several types of agricultural crops with different materials representing impurities in the grains.

## **Key words**

Separation, electrostatic separation, separators, Plant seed, crops, chaff

## **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 11.5. 2017

Bc. Martin Šula

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POUŽÍVANÉ SEPARÁTORY V PRŮMYSLU</b> .....	<b>12</b>
SEPARACE ODPADŮ .....	12
GRANULÁTY PLASTŮ .....	12
<i>Zbytky kabelů a elektronický odpad</i> .....	13
PRŮMYSLOVÉ POUŽITÍ .....	14
<i>Odlučování tuhých emisí</i> .....	14
<i>Separace rud a užitečných nerostů</i> .....	14
SEPARÁTORY V ZEMĚDĚLSTVÍ .....	15
<b>2 PROBLEMATIKA SEPARACE V ZEMĚDĚLSTVÍ</b> .....	<b>16</b>
ZNEČIŠTĚNÍ .....	16
<i>Příměsi</i> .....	16
<i>Nečistoty</i> .....	16
VLHKOST OBILNÉ MASY .....	17
ZPŮSOBY ODDĚLOVÁNÍ PŘÍMĚSÍ A NEČISTOT .....	18
<i>Magnetické třídění</i> .....	18
<i>Sítové třídění</i> .....	18
<i>Čištění podle aerodynamických vlastností</i> .....	19
<i>Oddělování krátkých a dlouhých příměsí</i> .....	19
<b>3 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ELEKTROSTATICKÉ SEPARACE</b> .....	<b>21</b>
VÁLCOVÝ SEPARÁTOR .....	21
DESKOVÝ SEPARÁTOR .....	23
SESYPNÉ USPOŘÁDÁNÍ ELEKTROSTATICKÉHO.....	24
GRAVITAČNÍ FREE-FALL SEPARÁTOR.....	25
<i>Trubicový free-fall separátor</i> .....	25
<i>Gravitační free-fall separátor s válcovými elektrodami</i> .....	26
<b>4 NABÍJENÍ ČÁSTIC</b> .....	<b>28</b>
TRIBOELEKTRICKÉ NABÍJENÍ.....	28
<i>Triboelektrická řada</i> .....	29
<i>Triboelektrické nabíjení pomocí média</i> .....	30
KONTAKTNÍ NABÍJENÍ .....	31
KORONUJÍCÍ ELEKTRODA.....	32
<b>5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>33</b>
VÁLCOVÝ SEPARÁTOR .....	34
<i>Souřadnicový systém elektrod</i> .....	35
DESKOVÝ SEPARÁTOR .....	36
<i>Souřadný systém elektrod</i> .....	37
<b>6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ</b> .....	<b>38</b>
VÁLCOVÝ SEPARÁTOR .....	39
<i>Ověření správné funkce separátoru</i> .....	39

<i>Stanovení správné úrovně napětí na koronující elektrodě</i> .....	41
<i>Separace směsí</i> .....	42
<i>Pšenice a zlomky zrn pšenice</i> .....	43
<i>Pšenice a plevy pšenice</i> .....	44
<i>Oves a semena trav</i> .....	44
<i>Pšenice a merlík čilský</i> .....	45
<i>Oves loupáný a neloupáný</i> .....	46
<i>Suchý oves a vlhčený oves</i> .....	46
DESKOVÝ SEPARÁTOR .....	46
<i>Ověření správné funkce separátoru</i> .....	47
<i>Pšenice a zlomky zrn pšenice</i> .....	47
<i>Pšenice a plevy pšenice</i> .....	48
<i>Ječmen a semena trav</i> .....	48
<i>Pšenice a merlík čilský</i> .....	49
<i>Oves loupáný a neloupáný</i> .....	49
<i>Suchý oves a vlhčený oves</i> .....	50
FREE-FALL SEPARÁTOR .....	50
POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	51
<b>7 KOMPLEXNÍ ZHODNOCENÍ ZKOUMANÉ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>52</b>
<b>8 ZÁVĚR</b> .....	<b>55</b>
<b>9 POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>56</b>
<b>10 PŘÍLOHY</b> .....	<b>59</b>
VÁLCOVÝ SEPARÁTOR .....	59
<i>Geometrie</i> .....	59
<i>Pšenice a zlomky zrn pšenice</i> .....	60
<i>Pšenice a plevy</i> .....	60
<i>Oves a semena trav</i> .....	61
<i>Pšenice a merlík čilský</i> .....	61
<i>Oves loupáný a oves neloupáný</i> .....	61
<i>Oves suchý a vlhčený</i> .....	62
DESKOVÝ SEPARÁTOR .....	63
<i>Geometrie</i> .....	63
<i>Granulát ABS a Cu</i> .....	63
<i>Pšenice a zlomky</i> .....	64
<i>Pšenice a plevy</i> .....	64
<i>Ječmen a semena trav</i> .....	65
<i>Pšenice a merlík čilský</i> .....	65
<i>Oves loupáný a oves neloupáný</i> .....	66
<i>Oves suchý a vlhčený</i> .....	66
GRAFY FREE-FALL SEPARÁTOR .....	67
SEMENA ROSTLI POUŽITÁ PŘI EXPERIMENTECH .....	68



## Seznam použitých zkratk

$\varepsilon$ (F/m)	Permitivita
$\varphi$ (V)	Elektrický potenciál
$m$ (kg)	Hmotnost
$Q$ (C)	Náboj
$v$ (m/s)	Rychlost
$s$ (m)	Dráha
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Hustota
$c$ (-)	Koeficient tření
$S$ (m <sup>2</sup> )	Průřez
$F_a$ (N)	Aerodynamická síla
$F_g$ (N)	Gravitační síla
$F_e$ (N)	Elektrostatická síla
$F_c$ (N)	Odstředivá síla
$F_i$ (N)	Síla působící na částici
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
$\eta$ (%)	Účinnost separace
$p$ (%)	Čistota separace

## Seznam obrázků

OBR. 1 RECYKLAČNÍ LINKA [2] .....	12
OBR. 2 ELEKTROSTATICKÝ SEPARÁTOR ROZDRČENÝCH KABELŮ [16].....	14
OBR. 3 ZLOMKY ZRN [8].....	16
OBR. 4 SCVRKLÁ ZRNA A SE ZMĚNĚNOU BARVOU KLÍČKU [8] .....	16
OBR. 5 POROSTLÁ ZRNA [8].....	16
OBR. 6 SEMENA OSTATNÍCH ROSTLIN [8] .....	17
OBR. 7 SEMENA NAPADENÁ HOUBOVÝMI CHOROBAMI [8].....	17
OBR. 8 CIZÍ LÁTKY [8].....	17
OBR. 9 TRIÉR – DVOUSTUPŇOVÉ ODDĚLOVÁNÍ KRÁTKÝCH A DLOUHÝCH ZRN [8] .....	20
OBR. 10 VÁLCOVÝ SEPARÁTOR (ROLL-TYPE) [16].....	21
OBR. 11 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA ČÁSTICE .....	23
OBR. 12 DESKOVÝ SEPARÁTOR PLATE-TYPE [3] .....	24
OBR. 13 SESYPNÉ USPOŘÁDÁNÍ ELEKTROSTATICKÉHO SEPARÁTORU [10].....	24
OBR. 14 USPOŘÁDÁNÍ GRAVITAČNÍHO FREE-FALL SEPARÁTORU .....	25
OBR. 15 TRUBICOVÝ FREE-FALL SEPARÁTOR [11] .....	26
OBR. 16 ELEKTROSTATICKÝ FREE-FALL SEPARÁTOR S VÁLCOVÝMI ELEKTRODAMI [12].....	27
OBR. 17 NABÍJENÍ POMOCÍ TRIBOELEKTRICKÉHO KANÁLU [10] .....	29
OBR. 18 ELEKTROSTATICKÉ ODDĚLOVÁNÍ DVOU A VÍCESLOŽKOVÉ SMĚSI [2].....	31
OBR. 19 INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE V OKOLÍ KORONUJÍCÍ ELEKTRODY .....	32
OBR. 20 VÁLCOVÝ – STŘEDNÍ DÍL TVOŘEN VÁLCEM .....	33
OBR. 21 DESKOVÝ – STŘEDNÍ DÍL TVOŘEN DESKOU .....	33
OBR. 22 VÁLCOVÝ TYP SEPARÁTORU .....	35

OBR. 23 SOUŘADNÝ SYSTÉM ELEKTROD VÁLCOVÉHO SEPARÁTORU .....	36
OBR. 24 DESKOVÝ TYP SEPARÁTORU .....	37
OBR. 25 SOUŘADNÝ SYSTÉM PRO DESKOVÝ SEPARÁTOR.....	37
OBR. 26 ZRNA PŠENICE A ZLOMKY PO 1. CYKLU .....	43
OBR. 27 ZRNA PŠENICE A ZLOMKY PO 3. CYKLU .....	43
OBR. 28 ZRNA PŠENICE A MERLÍKU ČILSKÉHO PO 1. CYKLU.....	45
OBR. 29 ZRNA PŠENICE A MERLÍKU ČILSKÉHO PO 3. CYKLU.....	45
OBR. 30 POHLED Z BOKU NA KOMPLETNÍ SESTAVU VÁLCOVÉHO SEPARÁTORU .....	59
OBR. 31 ELEKTRODOVÝ SYSTÉM VÁLCOVÉHO SEPARÁTORU .....	59
OBR. 32 ELEKTRODOVÝ SYSTÉM DESKOVÉHO SEPARÁTORU .....	63
OBR. 33 JEČMEN SETÝ .....	68
OBR. 34 OVES SETÝ LOUPANÝ .....	68
OBR. 35 OVES SETÝ NELOUPANÝ .....	68
OBR. 36 PLEVY PŠENICE .....	68
OBR. 37 PŠENICE SETÁ .....	68
OBR. 38 MERLÍK ČILSKÝ .....	68
OBR. 39 ŘEPKA OLEJKA.....	69
OBR. 40 SEMENA TRAV.....	69
OBR. 41 OVES VLNĚNÝ.....	69
OBR. 42 ZLOMKY ZRN PŠENICE.....	69
OBR. 43 ŽITO SETÉ .....	69
OBR. 44 REÁLNÉ NEČISTOTY - PŠENICE .....	69
OBR. 45 REÁLNÉ NEČISTOTY - ŽITO .....	70
OBR. 46 REÁLNÉ ZLOMKY ZRN - PŠENICE .....	70

## Úvod

Diplomová práce je zaměřena na separaci zemědělských plodin. Separace v zemědělství znamená proces oddělování zrn od nečistot. Pro účely této práce budeme uvažovat směsi tvořené zrny základní kultury obohacené o nečistoty, tedy zrna s odlišnými vlastnostmi. V závislosti na charakteru takových nečistot je možné rozdělit směs přímo na jednotlivé složky, nebo pokud nemají dostatečně rozdílné vlastnosti, je nutné využít kombinace separačních metod a proces několikrát opakovat, aby bylo dosaženo požadované čistoty.

Motivací k separování zemědělských plodin elektrostaticky je zejména úspora v oblasti vzduchového hospodářství. Při použití současné technologie dochází k profukování proudem vzduchu pro odstranění prachu a jemných nečistot. Tím dochází k znečištění velkého množství vzduchu, který nemůže být bez vyčištění vyfukován do ovzduší. Pomocí elektrostatických separátorů by rovněž šlo odloučit od zrn kovové nemagnetické nečistoty, jež se mohou do obilné masy dostat během procesu zpracování či skladování a nemohou být odstraněny konvenčními magnetickými odlučovači.

Počátečních kapitoly se zabývají pojmem separace a je v nich podán přehled v současnosti využívaných elektrostatických separátorů. Poté je popsána problematika separace v zemědělství. Těžištěm práce je návrh separátoru pro elektrostatické rozdužování zemědělských plodin a experimenty provedené na tomto zařízení.

Separace nebo jinak též oddělování nebo rozdužování je proces, při kterém dochází k odlučování jednotlivých frakcí původní směsi. Děje se tak na základě rozdílných chemických fyzikálních nebo elektrických vlastností jako jsou například hustota, velikost částic, tvar, aerodynamické vlastnosti a podobně. Separace má za cíl oddělit příměsi od základní kultury a zajistit tak potřebnou kvalitu před zpracováním jelikož téměř žádné materiály se v přírodě nevyskytují v čištěném stavu.

# 1 Používané separátory v průmyslu

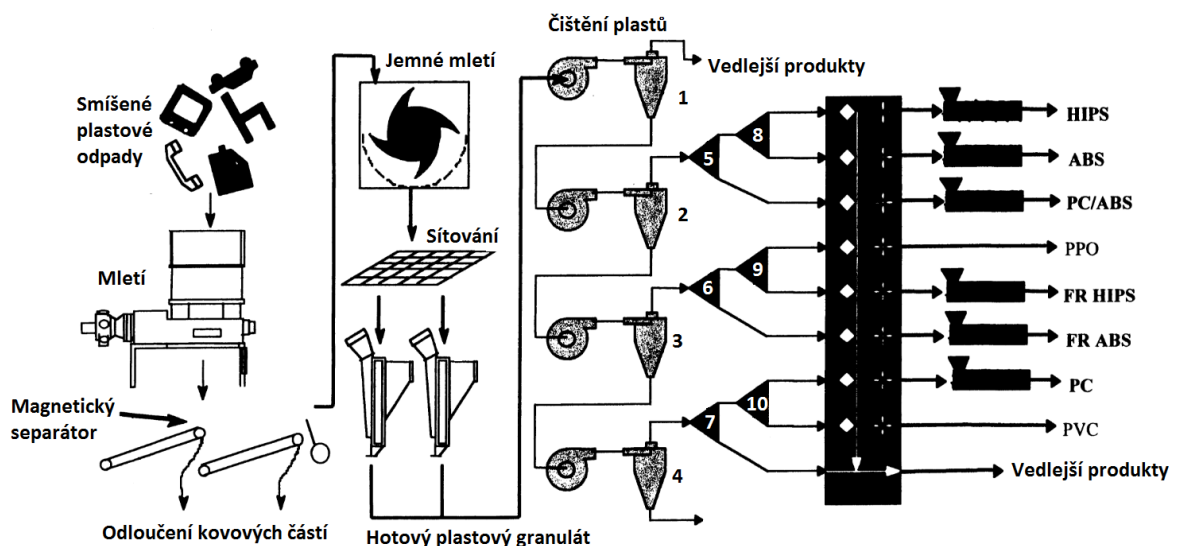
Výhodou elektrostatické separace je, že se jedná o takzvanou suchou metodu separace, tudíž takováto metoda nezpůsobuje znečištění odpadních vod, což je velmi výhodné například při separaci minerálních látek na bázi solí. Zároveň při použití elektrostatických separátorů nedochází ani ke znečištění vzduchu unášenými prachovými částicemi a podobně.

## Separace odpadů

V současné době je velmi často diskutovaným tématem problematika využití elektrostatických separátorů při zpracování odpadů. Pro dobré fungování procesu recyklace plastů je nezbytné správné třídění odpadu již na úrovni domácností, neboť z hlediska zpracovatelnosti nemá cenu třídít vše, co je plastové, ale jen to co lze účinně recyklovat. Z celkového množství tříděného plastového odpadu je ve skutečnosti možné zpracovat jen část takto vybraného odpadu. Čím větší je počet druhů plastů tím je technologicky náročnější jej vytřídit. S tím souvisí samozřejmě i cena takto získaného recyklátu [1].

## Granuláty plastů

Elektrostatické separátory v konstrukčním pojetí jak je uvedeno níže se využívají podle [2] při zpracování plastového odpadu na recyklační lince kde dochází k přepracování vstupního směsného plastového odpadu do granulátů jednodruhových plastů.



Obr. 1 Recyklační linka [2]

Cílem takovéto recyklační linky je rozdělit vstupní odpad na jednotlivé druhy plastů nebo na jejich směsi. Po rozemletí a odstranění kovových částí pomocí magnetického separátoru je čištění prováděno následujícím způsobem. V gravitačních koncentrátorech (č. 1, 2, 3, 4 na obr. 1) dochází k hrubé separaci na základě hustoty materiálu. Výstup z těchto separátorů je následně přiveden na elektrostatické separátory prvního stupně (č. 5, 6, 7 na obr. 1), které odloučí některé frakce, zatímco zbytky jsou přivedeny do separátorů druhého stupně tj. (č. 8, 9, 10, na obr. 1), kde jsou separovány na jednotlivé druhy plastů a jsou následně peletizovány [2].

### **Zbytky kabelů a elektronický odpad**

Dalším uplatněním elektrostatických separátorů při zpracování odpadů je oddělování vodivých nemagnetických od nevodivých částic rozdrčených kabelů a elektronického odpadu. Podle [3] je v průměru počítač složen z 30 % plastu, 29 % magneticky oddělitelných kovů, 14 % neželezných kovů, jako měď hliník olovo nebo kadmium, dále ze skla a keramiky. Vstupní suroviny, tedy kabely nebo desky plošných spojů, musí být nejprve rozdrčeny na granulát o velikosti 0,5 až 2 mm. Tento granulát je posléze pomocí separátoru rozdělován podle svých elektrických vlastností. Pro tyto účely je nejvhodnější použití deskového nebo válcového separátoru jak je vidět na obr. 2. Rozdrčené částice jsou pomocí sesypného ústrojí přiváděny na rotující válec, kde jsou nabíjeny ionizovaným vzduchem při průchodu pod koronující elektrodou. Posléze při průchodu kolem vychylovací elektrody jsou vodivé částice přitahovány a odpadávají do příslušné výsypky. Naopak částice se špatnou vodivostí ztrácejí náboj velmi pomalu a ulpívají tak na válci. K jejich odpadnutí dochází buďto samovolně nebo musí být odstraněny pomocí kartáče. Na obr. 2 je toto zařízení zachyceno v reálných podmínkách, tak jak bylo uvedeno do provozu v USA. Jedná se o válcový separátor a jeho schématické znázornění najdeme na obr. 10.



Obr. 2 Elektrostatický separátor rozdrčených kabelů [16]

## Průmyslové použití

### Odlučování tuhých emisí

Nejčastějším využitím elektrostatických separátorů v současnosti je nejspíše odlučování tuhých látek tedy popílku po procesu spalování. Dosahuje se tak dostatečně nízké hodnoty úletu tuhých znečišťujících látek do ovzduší. Technologie elektrostatického odlučování proto nejčastěji nachází uplatnění v segmentech, jako jsou elektrárny, spalovny komunálních a průmyslových odpadů nebo v cementárnách pro odprášení rotačních pecí při výrobě cementu či vápna a v hutích pro odstranění prachu a spalin. Hlavní princip elektrostatického odlučování spočívá ve využití přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi prachu a opačně nabitou srážecí elektrodou. Tyto odlučovače dosahují v provozu nejvyšší účinnosti, minimálně 98 % zachyceného exhalátu. Jejich provozní stabilitu zajišťuje zdroj vysokého napětí, umístěvaný v blízkosti odlučovací komory. Napájení těchto zdrojů je realizováno z běžných sítí nízkého napětí. Maximální hodnoty výstupního napětí se pohybují v rozmezí 92 kV až 150 kV a výstupní stejnosměrný proud je v těchto případech 150 mA až 2 A [4].

### Separace rud a užitkových nerostů

Využití dobývaných nerostů nebo hornin je velice rozličné. Většina surových rud uhlí a ostatních nerostných surovin se v přírodě vyskytuje ve stavu, který většinou neodpovídá potřebám pro zpracování vzhledem k tomu, že v posledních letech vstoupají nároky na jakost prakticky všech nerostných surovin. Proto je nutné tyto materiály nejprve upravovat.

Zjednodušeně lze tento proces popsat v několika následujících bodech. Jako první je nezbytné vytěženou horninu zdrobnit na granulaci s požadovanými rozměry, to je prováděno nejprve drcením a mletím. Následně při dosažení potřebných parametrů jako je suchost materiálu, je možné přistoupit k samotné separaci, jejímž cílem je oddělit užitečnou frakci upravované suroviny od jalových příměsí a převést ji tak do koncentráту [5]. V současnosti jsou stále nejrozšířenějšími separačními metodami suchá a mokrá třídění podle měrné hmotnosti. Lze uvést například separování na splavech, šroubovicové separátory, pneumatické separátory a separování v silovém magnetickém poli. Pro účely separace magnetických nerostů od nemagnetických se nejčastěji používají různé druhy magnetických separátorů jako magnetický odlučovač železa, indukční válcový odlučovač, pásový magnetický odlučovač [5].

Elektrostatické odlučovače jsou podle [5] při zpracování nerostů poměrně málo používané ovšem v řadě případů jako např. rozduřování kolektivního gravitačního koncentráту obsahujícího ilmenit, zirkon, rutil nebo monazit má elektrostatické odlučování mimořádný význam. Nachází uplatnění při konečné úpravě diamantových koncentrátů a některých dalších surovin jako azbestu nebo oddělování pyritu od sfaleritu, nebo při úpravě formovacích sklářských písků. U zařízení pro tyto účely je využíváno uspořádání uvedené na obr. 10 zařízení s korunující elektrodou a vodivým uzemněným válcem.

### **Separátory v zemědělství**

První elektrostatický separátor s uplatněním v zemědělství byl vyvinut v 19. století, patentoval jej Thomasem B. Osborne, a to již v roce 1880 ve Spojených státech. Tento separátor byl navržen pro odstraňování plev a podobných lehkých příměsí z mletého obilí. Náboj byl v tomto přístroji získáván pomocí tření tvrdého pryžového válce, ke kterému byl následně lehký materiál přitahován. Tento způsob získávání elektrického náboje byl využíván většinou prvních separátorů. Od té doby bylo zaregistrováno mnoho patentů v oblasti elektrostatických separátorů, ovšem žádný z nich nebyl zaměřen přímo na použití v zemědělství nebo potravinářství [6]. Lze nalézt několik studií zabývajících se problematikou elektrostatické separace v zemědělství jako je například [7], zaměřená na separaci mechanicky poškozených či pomletých zrn, nebo [6] zabývajících se separací zrn některých kulturních rostlin a vlivem vystavení elektrickému poli na klíčivost. Ovšem během přípravy této diplomové práce se nepodařilo najít zmínky o existenci funkčního elektrostatického separátoru použitého v zemědělství.

## 2 Problematika separace v zemědělství

### Znečištění

Při příjmu obilí začíná důležitý dekontaminační proces. V příjmové lince se začínají odstraňovat různé příměsi, které se do obilné masy dostaly při pěstování přímo na poli, při sklizni nebo během skladování či přepravy. Kategorie příměsí a nečistot pro potravinářskou pšenici stanovuje norma ČSN 46 1100-2 a lze je tak rozdělit do dvou základních skupin. Jsou to příměsi a nečistoty.

### Příměsi

- Zlomky zrn definované jako zrna mechanicky poškozená, zrna s obnaženým endospermem nebo zrna bez klíčku [8].
- Zrnové příměsi, mezi které patří sem scvrklá zrna, zrna jiných obilovin, zrna poškozená škůdci, zrna se změněnou barvou klíčku a tepelně poškozená zrna, zrna poškozená mrazem a zelená zrna [8].
- Porostlá zrna mají viditelný kořínek nebo klíček nebo jsou na nich jinak charakteristické známy růstu [8].



Obr. 3 Zlomky zrn [8]



Obr. 4 Scvrklá zrna a se změněnou barvou klíčku [8]



Obr. 5 Porostlá zrna [8]

### Nečistoty

Do této kategorie patří:



- Cizí semena - škodlivé nečistoty a semena všech kulturních a planě rostoucích rostlin kromě zrn jiných obilovin [8].
- Zrna napadená hnilobou, poškozená bakteriálními a houbovými chorobami [8].
- Cizí látky jsou definovány jako anorganické a organické nečistoty, které nepatří do jiných kategorií, jako jsou plevy, části stébel, kamínky, mrtvý škůdci, živočichové apod. [8].



**Obr. 6 semena ostatních rostlin [8]**



**Obr. 7 Semena napadená houbovými chorobami [8]**



**Obr. 8 Cizí látky [8]**

Pro účely této diplomové práce byly, jako výše uvedené druhy nečistot, použity některé běžně dostupné materiály s podobnými tvarovými, mechanickými a rozměrovými vlastnostmi. Jelikož tyto nečistoty se nachází v obilné masě pouze v relativně malém procentuálním zastoupení a není tudíž možné získat dostatečné množství takového materiálu s dostatečnou čistotou k uskutečnění reálného pokusu. Proto z důvodu průkaznosti a opakovatelnosti experimentů bylo rozhodnuto o použití těchto materiálů. Jako semena plevelných rostlin byl použit merlík čilský a travní semeno, které jsou běžně dostupné v obchodě. Jako mechanicky poškozená zrna byla nahrazena částečně pomletými zrny. Plevy byly použity skutečné plevy získané ze vzorků nečistot.

### **Vlhkost obilné masy**

Po sklizni je nezbytné obilnou masu takzvaně předčistit, tím se rozumí odstranění co největšího podílu plevelných semen, zelených částí rostlin, zlomků zrn i dalších nečistot. Tyto frakce mají obvykle i po sušení vyšší vlhkost, takže škůdci a choroby, především plísně a bakterie nachází v nevyčištěné masě zrnin optimální podmínky pro šíření. Požadavky na fyzikální a chemické vlastnosti zrna uvádí ČSN a také stanovuje metody zkoušení těchto

vlastností. Konkrétně vlhkost řeší norma ČSN ISO 712. Stanovuje se na základě vážení vzorků nebo pomocí speciálních přístrojů, které měří elektrický odpor. Zjednodušeně lze normu ČSN ISO 712 chápat tak, že skladovatelnost předčištěného obilí je možná jen při vlhkosti 15,0 % a nižší. Nižší hodnoty (10 %) platí pro semena obsahující větší podíl tuku (olejninu, řepka, oves) a pro plodiny často trpící zaplísněním (pohanka, proso, amarant). Přičemž teplota při sušení nesmí přesáhnout 45 – 50 °C [9].

Pro účely této diplomové práce proto budeme uvažovat pouze dobře vysušené obilí s vlhkostí přibližně 15 %. Toho se dosahuje sušením obilí před každým experimentem při 45 °C po dobu 120 min. Tímto sušením se lze dostat na hodnotu vlhkosti 15 % pouze přibližně, tudíž nelze dosáhnout přesné ani ideální hodnoty vlhkosti. Ovšem pro opakovatelnost a průkaznost pokusů je důležité, že se dosáhne pokaždé stejné vlhkosti, aby se zabránilo rozdílnému chování při různých vlhkostech.

### **Způsoby oddělování příměsí a nečistot**

V současnosti se při oddělování příměsí využívá rozdílných fyzikálních vlastností od zrn základní kultury. Čím jsou rozdíly v takových vlastnostech větší, tím je oddělování účinnější [8]. V následujících odstavcích jsou podrobněji popsány technologické kroky při přípravě obilné masy před zpracováním v potravinářském průmyslu.

### **Magnetické třídění**

Kovové nečistoty se do obilné masy obvykle dostávají zcela náhodně, především se jedná o uvolněné části strojů a zařízení působících během procesu zpracování jak jsou matice, šrouby, hřebíky a další. Obilná masa při svém pohybu obrušuje kovové části strojů, tím pádem se v obilné mase vyskytuje i podíl kovového prachu. Takovéto nežádoucí příměsí je nutné odstranit zejména před zpracováním vysokootáčkovými stroji. Odstraňování kovových částic se provádí pomocí permanentních magnetů nebo elektromagnetů [8].

### **Sítové třídění**

Sítové třídění odstraňuje z obilné masy nečistoty podle velikosti, to je především podle rozměrů zrna. Sítový třídič se skládá z minimálně dvou nad sebou uspořádaných sít, z nichž horní má větší otvory než je rozměr zrn základní kultury a spodní naopak menší otvory. Tyto otvory se liší podle druhu čištěné plodiny a zjednodušeně lze říci, že prvním sítím zrna

základní kultury projít musí a druhým nesmí. Síta jsou šikmo nakloněná a obilí se po nich pohybuje vibračním pohybem stroje. Obilí tak prochází přes první síto, které má větší otvory a obilí jím propadává. Materiál, který nepropadne sítem, se nazývá přepad a je tvořen hrubými nečistotami jako částmi rostlin a částmi klasů. Poté se obilí dostane na druhé jemnější síto, přes které přepadne. Propadem tohoto síta jsou menší částice jako písek nebo kamínky a nevyvinutá nebo scvrklá zrna [8].

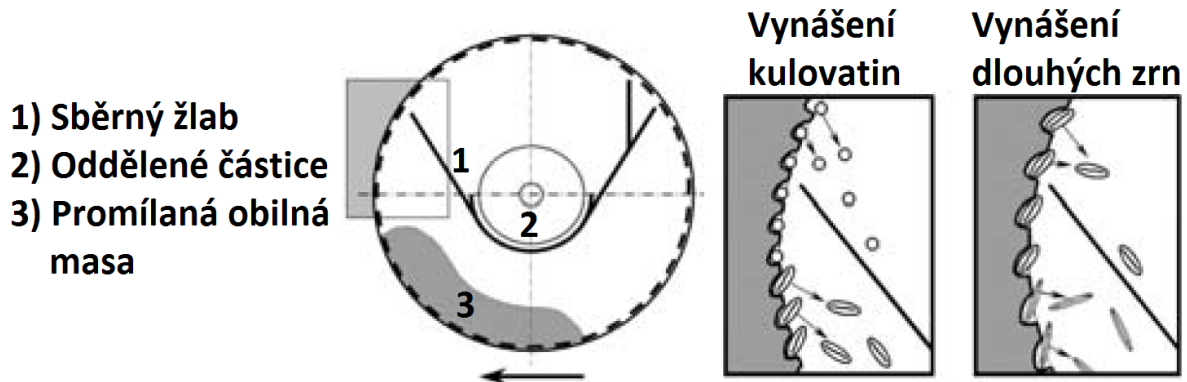
### **Čištění podle aerodynamických vlastností**

Při vypadávání ze síťového třídiče je obilí profukováno proudem vzduchu. Tento způsob čištění patří stejně jako síťové čištění mezi nejstarší a dosud nejpoužívanější frakční principy. Jedná se o rozdílné aerodynamické vlastnosti základní kultury a příměsí závisí na jejich velikosti, hmotnosti, tvaru, stavu povrchu a podobně. Základními ukazateli jsou v tomto případě vektory gravitační síly a vektory proudového pole vzduchu. Z tohoto předpokladu vycházejí dva základní principy podle směru proudění vzduchu vzhledem k padající obilné mase. Jsou to separátory s vertikálním nebo horizontálním prouděním. Při vertikálním prouděním vzduchu proti padající obilné mase mají vektory gravitační síly a aerodynamické síly opačný směr čímž dochází k tomu, že jsou částice buďto unášeny proudem vzduchu anebo padají proti tomuto proudu. To je vhodné pro odstranění velmi jemných částic jako prach nebo mikroorganismy. Při horizontálním prouděním dochází k profukování padající obilné masy v kolmém směru a výsledné trajektorie padajících zrn jsou dány výslednicemi působení gravitačních a aerodynamických sil. Obilná masa se tak rozdělí právě podle aerodynamických vlastností na více frakcí, která lze následně jímat v samostatných výsypkách. Takto jsou unášeny nečistoty s odlišnými aerodynamickými vlastnostmi. Jde o pluchy (zbytky obalů semen), osiny, plevelná a poškozená semena [8].

### **Oddělování krátkých a dlouhých příměsí**

Výše uvedené metody čištění jsou efektivní a dosahují velké úspěšnosti vybrání, nedokáží ovšem rozdělit zrna podle délky. Jelikož na sítích se mohou zrna libovolně točit či postavit a mohou tak projít i dlouhá zrna menšími otvory v sítích. Při vysokých požadavcích na čistotu jako zejména u potravinářské pšenice nebo sladovnického ječmene je nutné do procesu zařadit také přístroj na separaci podle délky zrna. Tento krok lze realizovat pomocí takzvaných triérů tato zařízení dokáží oddělit částice kratší než je zrno (koukol, zlomky zrn, svízel) a částice delší než je zrno základní kultury (semena trav). Zařízení je tvořeno dvěma za

sebou uspořádanými mírně nakloněnými válci. Do těchto válců je sypáno obilí, rotací válců je obilí promíláno a naklonění válců zajišťuje určitou dopravní rychlost. Plášť válce je vyroben z ořezavzdorného plechu s důlky a uvnitř rotujícího válce je sběrný žlab s vynášecím šnekem.



Obr. 9 Triér – dvoustupňové oddělování krátkých a dlouhých zrn [8]

V prvním stupni má vnitřní stěna válce důlky menší, v nichž se déle udrží částice kratší, než jsou zrna základní kultury. Kratší zrna pak přes nastavenou hranu žlabu vypadávají a jsou tak odděleny. Ve druhém stupni je obilí přivedeno na válce, kde jsou důlky stejně velké, jako jsou zrna základní kultury. Tím dochází k vybrání zrn základní kultury a semena, která jsou delší, a nevejdou se do těchto důlků, jsou válcem postupně vyloučena. Otáčky těchto válců nelze zvyšovat nad kritické, protože by odstředivá síla překonala gravitační a zrna by v horní části nevypadávala. Tím je dána pracovní rychlost stroje, která je relativně pomalá, tudíž by se mohlo vyplatit takováto zařízení nahrazovat elektrostatickými separátory [8].

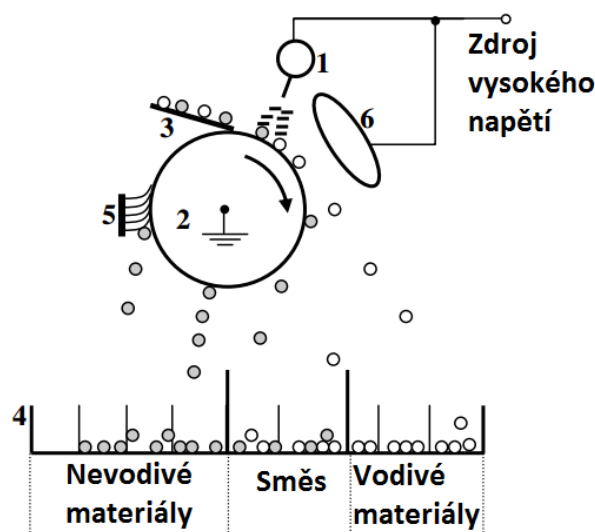
### 3 Fyzikální princip elektrostatické separace

V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé druhy používaných elektrostatických separátorů. Liší se uspořádáním, způsobem nabíjení nebo charakterem separovaného materiálu. Lze říci, že první dva druhy separátorů, tedy válcový a deskový separátor, se hodí spíše k oddělování vodivých a nevodivých částic, kdežto různé modifikace gravitačních free-fall separátorů jsou vhodné k oddělování izolantů lišících se svými triboelektrickými vlastnostmi.

Obecně platí že, separované látky mají schopnost různě rychle nabývat nebo ztrácet elektrický náboj. Princip elektrostatické separace zrnitých materiálů je tedy založen na rozdílném chování částic lišících se chemickým složením i elektrickými vlastnostmi, zejména vnitřní a povrchovou vodivostí [10]. Výsledné silové působení je důsledek Coulombových sil působících na náboje v elektrickém poli.

#### Válcový separátor

Válcový separátor na obr. 10 je vybaven korunující elektrodou 1, která je připojena ke zdroji vysokého napětí. Toto napětí je stejnosměrné a musí být kladné vzhledem k tomu, že válcová elektroda je uzemněna. V okolí této elektrody v silně nehomogenním elektrickém poli dochází ke vzniku korony a částice dopravované válcem se nabíjejí ionizovaným vzduchem. V průběhu transportu pak částice úměrně své vodivosti, postupně ztrácejí získaný elektrický náboj a odpadávají do jednotlivých výsypek. Nejdéle tedy zůstanou zachyceny na válci částice s nízkou elektrickou vodivostí [10].



Obr. 10 Válcový separátor (roll-type) [16]

Vliv všech činitelů vystupujících v separačním procesu je nejlépe ukázán na obr. 11. Na tomto fyzikálním modelu jsou vidět síly působící na částice rozložené do jednotlivých složek. Pokud zavedeme zjednodušující předpoklady tak, že částice nahradíme kuličkami o poloměru  $r$  o relativní permitivitě  $\epsilon_r$  a budeme předpokládat konstantní intenzitu elektrického pole ve vzduchu na povrchu válce od úhlu  $\alpha = 80^\circ$  do  $\alpha = 45^\circ$  a zároveň budeme předpokládat, že od  $\alpha = 45^\circ$  do  $\alpha = 0^\circ$  bude intenzita elektrického pole lineárně klesat. Každá částice unášená válcem v elektrickém poli je podrobena těmto silám [3]:

Elektrostatická síla

$$F_e = Q_s \cdot E \quad (3.1)$$

Síla působící na částici

$$F_i = \frac{Q_s^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot (2r)^2} \quad (3.2)$$

Odstředivá síla

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (3.3)$$

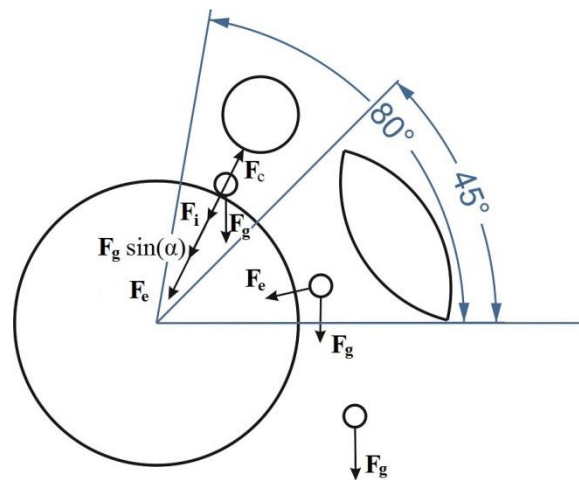
Gravitační síla

$$F_g = m \cdot g. \quad (3.4)$$

Všechny ostatní síly lze předpokládat tak malé, že je můžeme oproti uvedeným silám zanedbat.

Podmínky pro uvolnění částice z kotouče lze vyjádřit jako:

$$F_c > F_i + F_e + F_g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.5)$$



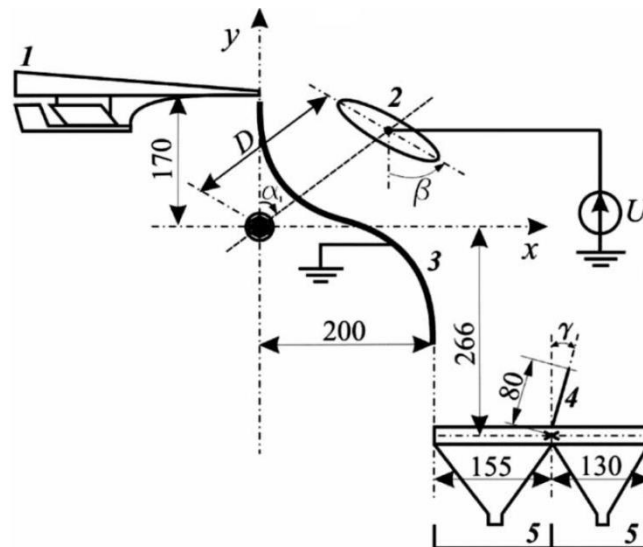
Obr. 11 Síly působící na částice

### Deskový separátor

V případě deskového separátoru na obr. 12 je elektrické pole vytvářeno mezi uzemněnou kovovou deskou a oválnou vychylovací elektrodou (2), na níž je připojen zdroj vysokého napětí. Separovaný materiál je pomocí vibračního podavače sypán na šikmou deskovou elektrodu, po které klouže okolo oválné vychylovací elektrody. Částice se špatnou vodivostí takto sklouznou, aniž by byly významným způsobem ovlivněny elektrickým polem, stejně jako náboj získaný triboelektricky je v těchto případech zanedbatelný. Tyto částice se tudíž zachytávají v levém kontejneru. Naopak vodivé částice jsou nabíjeny elektrickou indukcí při kontaktu s uzemněnou vodivou elektrodou, a proto jsou přitahovány k oválné vychylovací elektrodě, čímž dochází ke změně jejich trajektorie. Vodivé částice jsou tak zachycovány v pravém kontejneru.

Toto uspořádání nachází časté uplatnění v průmyslu, neboť je velice jednoduché změnit parametry jako trajektorie, množství a zároveň čistota vybrání jednotlivých příměsí. Takovéto

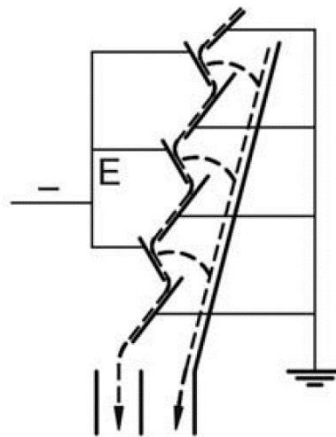
úpravy lze dosáhnout prostřednictvím pouhé změny napětí nebo pohybem dělicí clony mezi zásobníky [3].



Obr. 12 Deskový separátor plate-type [3]

### Sesypné uspořádání elektrostatického

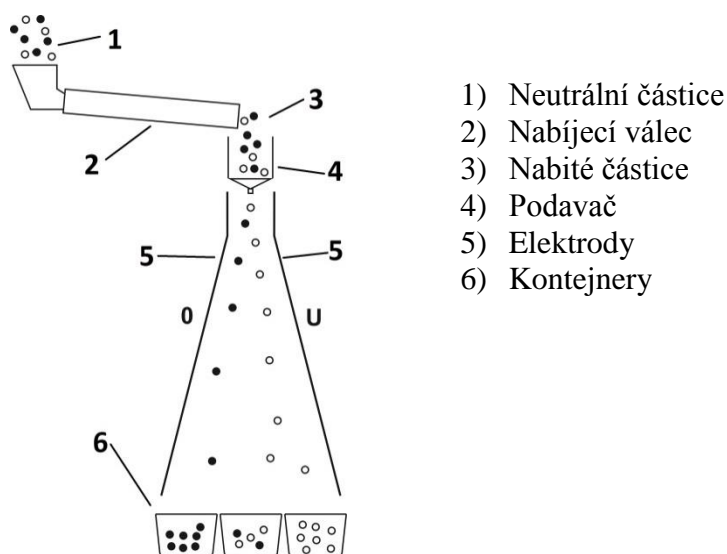
Sesypné uspořádání je speciální případ elektrostatického separátoru. Lze jej použít pro oddělování velmi lehkých příměsí. Příčné elektrody E zajišťují rychlé nabití vodivých částic, které jsou vystřelovány mimo sesypnou oblast a jsou tak odděleny [10].



Obr. 13 Sesypné uspořádání elektrostatického separátoru [10]



## Gravitační free-fall separátor



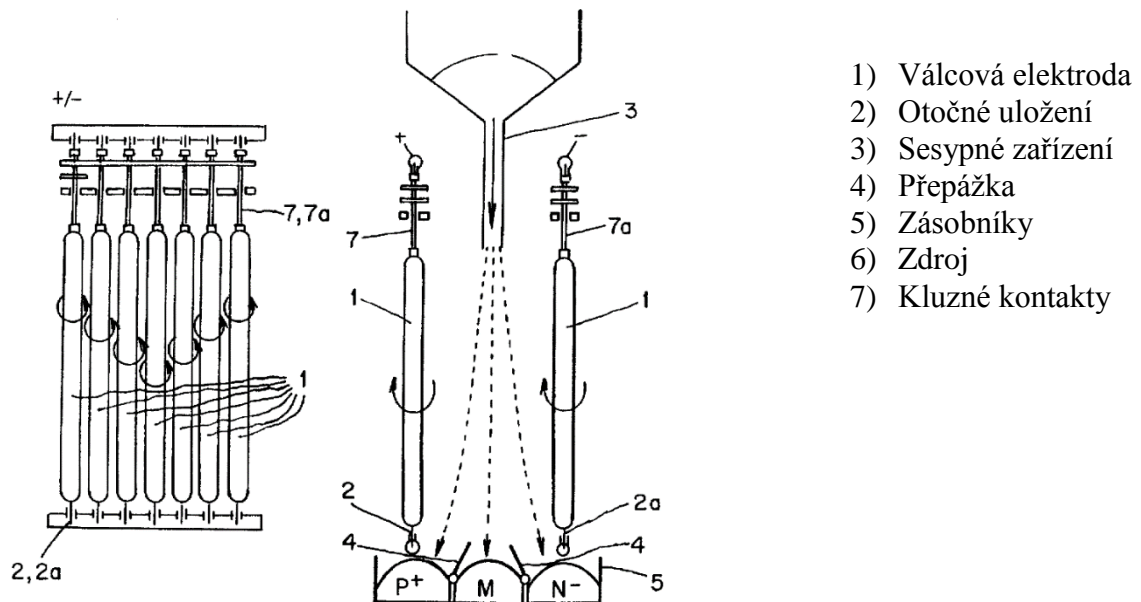
Obr. 14 Uspořádání gravitačního free-fall separátoru

Gravitační free-fall separátor byl vyvinut pro elektrostatické oddělování částic směsi plastů. Jeho princip je založen na Coulombových silách působících na padající nabitě částice. Plastové částice, jsou na začátku procesu neutrální a musejí být nabíjeny v nabíjecím válci. Nabíjecí válec je rotující plastová trubka, do níž jsou vsypávány částice a prostřednictvím tření o stěny dochází k jejich nabíjení. Částice z různých materiálů přijímají různé množství náboje s různou polaritou. Charakter náboje závisí na poloze daného materiálu v triboelektrické řadě. Po určitém čase, kdy jsou částice uvnitř rotujícího válce, se nabitě částice vysypou do podavače. Podavač je nádoba zajišťující rovnoměrné sypání materiálu do prostoru mezi elektrody. Následně částice padají volným pádem do elektrostatického pole v separační komoře. Elektrostatické pole je vytvořeno mezi dvěma deskovými elektrodami jak je vidět na obr. 14. Napětí na elektrodách je v rozmezí 30 až 50 kV. Během pádu jsou částice přitahovány ke kladné nebo záporné elektrodě a směr jejich vychýlení závisí na polaritě získaného náboje. Po průletu elektrickým polem v separační komoře jsou částice zachytávány v jednom ze třech kontejnerů. Vertikální poloha deskových elektrod má tu výhodu, že poskytuje delší reakční dobu elektrického pole na prolétávající částici, tím se účinek elektrického pole zlepšuje. Ovšem nevýhodou jsou větší rozměry zařízení [17].

## Trubicový free-fall separátor

Trubicový free-fall separátor je svým principem velmi podobný klasickému free-fall separátoru. Ovšem namísto deskových elektrod se elektrodotový systém skládá ze dvou řad za

sebou uspořádaných trubic vyrobených z vodivého materiálu, které jsou uloženy buď jako otočné kolem své vlastní osy nebo mohou být uloženy pevně. Toto uspořádání je podle [11] výhodnější a přináší lepší výsledky separace hlavně z hlediska srážek částic s elektrodami a jejich následný odskok do nežádoucího prostoru. Tyto trubice jsou vodivě pospojovány a na každou z těchto řad trubic je připojen jeden z pólů stejnosměrného napětí [11].



- 1) Válcová elektroda
- 2) Otočné uložení
- 3) Sesypné zařízení
- 4) Přepážka
- 5) Zásobníky
- 6) Zdroj
- 7) Kluzné kontakty

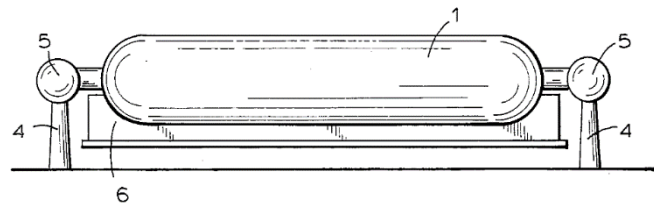
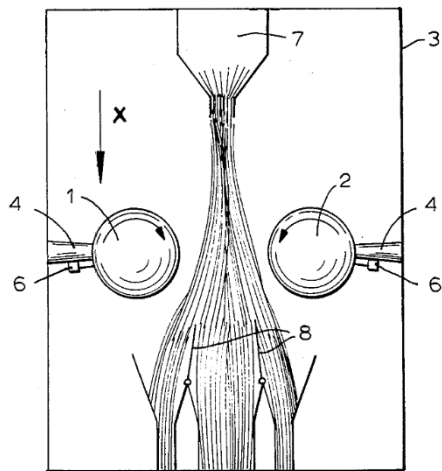
Obr. 15 Trubicový free-fall separátor [11]

### Gravitační free-fall separátor s válcovými elektrodami

Toto zařízení je konstrukčním vylepšením klasického deskového uspořádání free-fall separátoru, kde vyvstává problém sulpíváním jemných částic děleného materiálu na elektrodách, čímž dochází ke snížení intenzity elektrického pole a nakonec i ke zhoršení účinnosti separátoru. Tento nedostatek je řešen pomocí otočných válcových elektrod, které se pomalu otáčejí a pomocí kartáčů jsou z jejich povrchu odstraňovány usazené nečistoty [12].

Vzdálenost elektrod je možné snižovat nejvýše do vzdálenosti rovnající se průměru elektrody, protože čím větší je poměr mezi poloměrem elektrod a jejich vzdáleností tím větší je intenzita elektrického pole a může tedy dojít k přeskoku. Takto je možné dosáhnout podle [12] intenzity el. pole až 14 kV/cm, to je zhruba trojnásobek intenzity dosahované při deskovém uspořádání. Proto může být snížena výška zařízení bez snížení oddělovacích účinků separátoru. S tím ovšem souvisí problematika vzniku korony na okrajových částech elektrod, z tohoto důvodu je nezbytné, aby byly elektrody a všechny konstrukční prvky zaobleného

tvaru, jak je vidět na obr. 16, pro snížení gradientu elektrického pole a dosažení maximálně homogenního elektrického pole.



- 1) Válcová elektroda
- 2) Válcová elektroda
- 3) Rám
- 4) Nosná konstrukce
- 5) Otočné uložení
- 6) Kartáče
- 7) Sesypné zařízení
- 8) Clony

Obr. 16 Elektrostatický free-fall separátor s válcovými elektrodami [12]

## 4 Nabíjení částic

Obecně lze říci, že libovolné těleso je schopné se nabít, pokud se na něm akumulují nabitě částice nebo molekuly. Přítomnost elektrického náboje lze dosáhnout těmito metodami, jak je podrobně uvedeno v normě [13].

- Indukcí v elektrickém poli
- Kontaktem a třením
- Přenosem náboje
- Ionizací a absorpcí iontů
- Polarizací
- Pyroelektrickým jevem
- Piezoelektrickým jevem
- Fotoelektrickým jevem
- Elektrochemickými procesy

Vodivá tělesa jsou schopná získávat elektrický náboj prostřednictvím elektrické indukce, nacházejí-li se ve vnějším elektrickém poli. V reálném prostředí je ovšem nejčastějším způsobem získávání náboje kontakt a tření čímž dochází k triboelektrickému nabíjení. To spočívá v přenosu náboje při kontaktu mezi dvěma původně nenabitými částicemi nebo tělesy. Při oddělení takovýchto těles dochází k tomu, že každé z těles získává stejný náboj ovšem s opačnou polaritou.

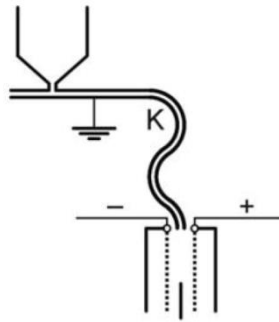
Třením získávají částice náboj při vzájemném relativním pohybu nebo třením o vhodně upravenou část separátoru. Platí pravidlo, že látka s větší dielektrickou konstantou nabývá kladného náboje, látka s nižší konstantou náboje záporného [10].

### Triboelektrické nabíjení

K triboelektrickému nabití dochází při kontaktu dvou těles z různých materiálů. Budeme-li uvažovat tato tělesa, jako nenabitá potom při kontaktu těchto těles dojde k přenosu náboje. Po oddělení těles zůstává na jednom z nich kladný náboj a na druhém záporný. To je způsobeno materiálovými vlastnostmi těchto těles, neboť některé materiály jsou schopné přijímat volné nosiče náboje a jiné materiály je naopak ochotně uvolňují. Množství takto získaného náboje závisí na kontaktním tlaku a na velikosti kontaktních ploch.

Provedení na obr. 17 představuje systém, kde částice získávají náboj třením při průchodu nabíjecím kanálem K. Nabíjecí kanál je vyroben z materiálu, jehož dielektrická konstanta je

v oblasti mezi dielektrickými konstantami separovaných částic. Tím dojde k jejich opačnému nabití a následnému oddělení při průchodu mezi elektrodami na konci nabíjecího kanálu [10].



Obr. 17 nabíjení pomocí triboelektrického kanálu [10]

### Triboelektrická řada

Množství a polarita triboelektricky získaného náboje je charakterizována polohou materiálu v takzvané triboelektrické řadě viz tab. 1. Lze očekávat, že částice materiálu se nabijí kladně oproti materiálům umístěným níže v tabulce, a naopak záporně oproti materiálům uvedeným výše v tabulce. Přijdou-li tedy do kontaktu materiály z opačných konců triboelektrické řady lze předpokládat, že dojde k přenosu relativně velkého náboje. Zařazení materiálu do triboelektrické řady je přibližné a velmi záleží na zkušebních podmínkách. Pokud například bude docházet ke tření stejného materiálu, rovněž může dojít k velice silnému nabití [13]. Příklad triboelektrické řady je uveden v normě ČSN IEC/TR 61340-1 [13].

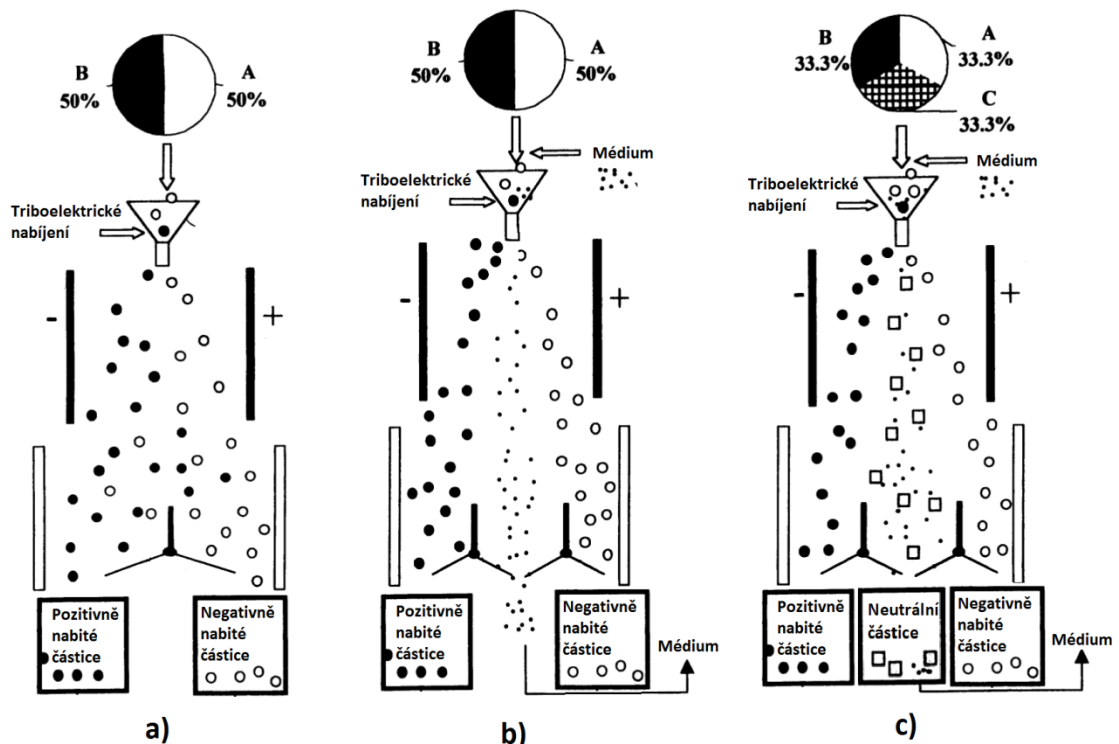
Králičí kožešina	
Sklo	
Lidské vlasy	
Polyamid	
Vlna	
Kožešina	
Hedvábí	+
Hliník	
Papír	
Bavlna	
Ocel	
Dřevo	
<hr/>	
Pryž	
Acetátové hedvábí	
Polyetylen	
Polypropylen	
PET	-
PVC	
Polyuretan	
PTFE	

Tabulka 1 Triboelektrická řada [13]

### Triboelektrické nabíjení pomocí média

Triboelektrické nabíjení je založeno na náhodném dotyku mezi jednotlivými částicemi. Velikost takto přeneseného náboje může být různá a existuje možnost, že určitý počet částic se nenabije nebo bude zneutralizován. Tento problém se významněji projeví při separaci plastových směsí složené z více, než dvou složek to má za následek neefektivní oddělení. Předvídatelnost a účinnost separace lze v těchto případech zvýšit přidáním triboelektrického média jak je ukázáno na obr. 18. Médium je tak přidáváno přímo do směsi kde působí v průběhu nabíjení, následně je odseparováno a připraveno k opětovnému použití. Triboelektrické médium je v tomto případě neznečišťující a může být opakovaně používáno.

Je to polymerní materiál, který je odlišný od separovaných složek svými triboelektrickými vlastnostmi [2].



Obr. 18 Elektrostatické oddělování dvou a vícesložkové směsi [2]

Na obrázku je znázorněn proces separace s použitím triboelektrických médií. Na obr. 18 a) je vidět separační proces dvousložkové směsi bez použití triboelektrického média. Naopak na obr. 18 b) a c) je vidět proces při separaci dvou a tříložkové směsi s použitím triboelektrického média.

### Kontaktní nabíjení

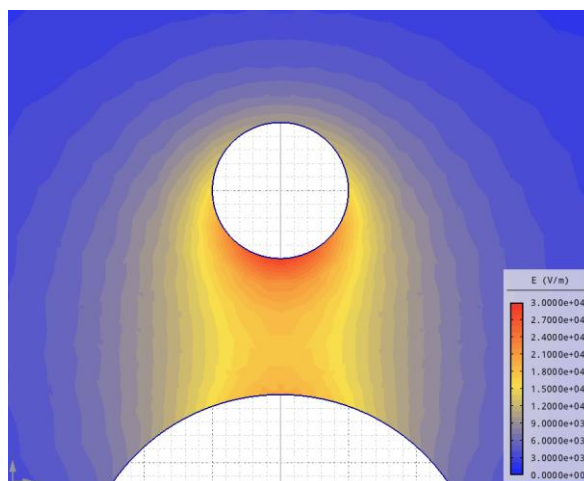
Kontaktní nabíjení je možné pozorovat na rozhraních pevných látek, kapalin i mezi kapalinami a pevnými látkami. Ke kontaktnímu nabíjení ovšem nemůže docházet při kontaktu s plynem. Pouze pokud je tento plyn obohacen o pevné nebo kapalné částice, nesoucí elektrický náboj ve formě aerosolu, je možné přenos náboje v plynu uvažovat [13].

Zařízení využívající tohoto principu umožňuje nabíjení částic pomocí kontaktu s vodivou elektrodou uvedenou na určitý elektrický potenciál. Nejčastěji se jedná o provedení, kdy elektroda je uzemněna a částice jsou tak záporně nabitě vzhledem ke kladné elektrodě.

Částice jsou pomocí vibračního podavače sypány na šikmou kovovou desku, po které sklouzávají. Při průchodu elektrickým polem se začne lišit chování těchto částic podle jejich vodivosti. Částice se špatnou vodivostí získávají obtížně elektrický náboj, tudíž na ně působí slabá elektrostatická síla a průchod elektrickým polem tak dokončí s nezměněnou trajektorií. Naopak na částice s dobrou vodivostí působí větší elektrostatická síla a jsou tak ze svých původních drah vychylovány [3].

### Koronující elektroda

Metoda nabíjení pomocí koronující elektrody je založena na jevu kdy v silně nehomogenním elektrickém poli začne vznikat korona. To je způsobeno zakřivením koronující elektrody. Nejsilnější elektrické pole je v blízkosti povrchu koronující elektrody směrem k elektrodě s opačným potenciálem jak je vidět na obr. 19. Intenzita tohoto elektrického pole je závislá na tvaru elektrody tedy na jejím poloměru, na polaritě i na vzdálenosti elektrod. Důsledkem korony je rozklad plynu vlivem ionizace na volné elektrony a kladné ionty volné elektrony se šíří směrem ke kladné elektrodě a v prostoru zůstávají kladné ionty to má za následek vznik prostorového kladného náboje v okolí koronující elektrody [13]. Metodu koronující elektrody lze aplikovat na různé druhy částic materiálů. Elektrický náboj částice získají průchodem ionizovaným vzduchem v blízkosti této elektrody. Získaný elektrický náboj pak závisí na elektrické vodivosti částic, pokud je částice vodivá potom dojde k jejímu nabití na záporný náboj vlivem elektrické indukce. Naopak pokud je částice nevodivá potom získává průchodem ionizovaného vzduchu kladný náboj. Takto získané náboje poté částice ztrácejí v závislosti na velikosti své vodivosti. Dobře vodivé materiály tedy ztrácejí náboj rychle, a tudíž se nenabíjí, naopak materiály s relativně špatnou vodivostí si náboj udrží déle [3].



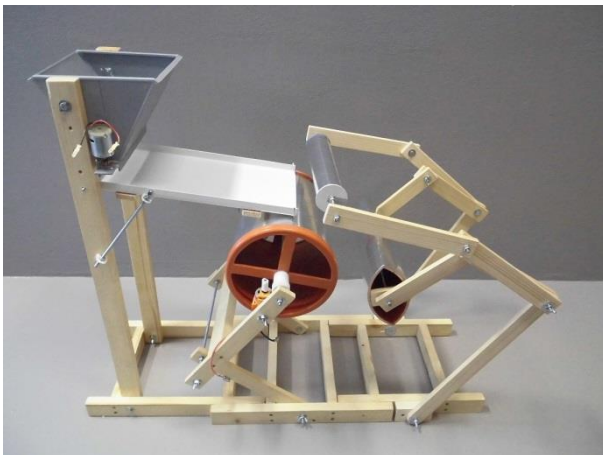
Obr. 19 Intenzita elektrického pole v okolí koronující elektrody



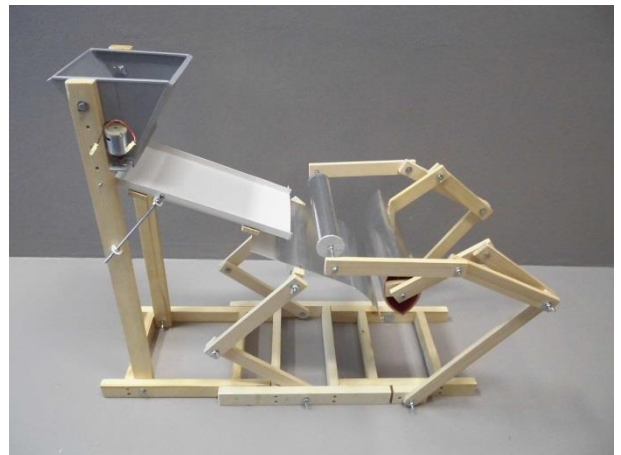
## 5 Návrh zařízení

Na základě výše uvedených skutečností bylo rozhodnuto o experimentálním ověření tří základních druhů elektrostatických separátorů pro separace zemědělských plodin. Jedná se o válcový typ separátoru, deskový typ separátoru a porovnání při experimentu na free-fall separátoru. Proto bylo navrženo experimentálního zařízení na principu válcového separátoru s možností jeho snadné přeměny na deskový separátor pro možnost jejich vzájemného porovnání.

Byly vyrobeny čtyři segmenty, které díky konstrukci podstavy umožňují snadnou výměnu středního dílu. Hranoly podstavy lze do sebe libovolně zasouvat a je možné takto nastavit vzdálenost jednotlivých dílů i celkovou délku sestavy. Sestava představující jeden ze dvou druhů separátorů je tvořena vždy třemi díly. Na obrázcích 20 a 21 jsou, pro názornost zachyceny sestavy bez krytu a bez sběrných kontejnerů.



**Obr. 20 Válcový – střední díl tvořen válcem**



**Obr. 21 Deskový – střední díl tvořen deskou**

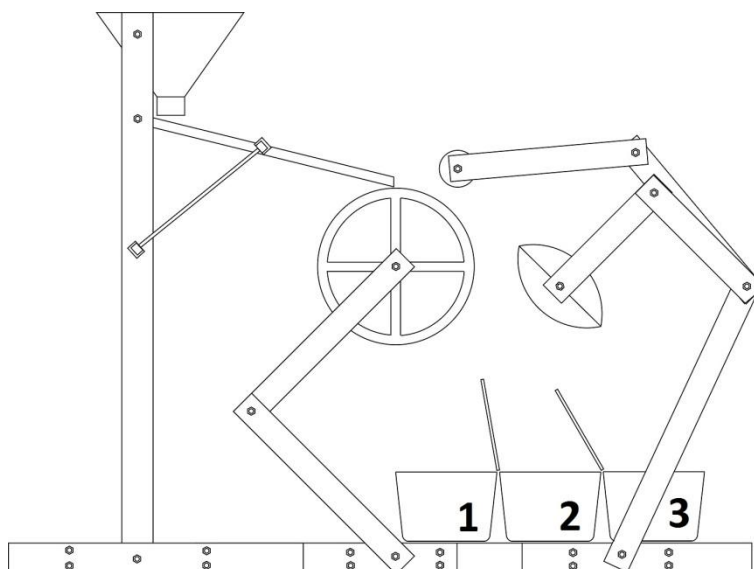
Díl v levé části obrázků je výsypka, která umožňuje rovnoměrné sypání směsi na šikmou plošinu, po které se směs dostává pomocí vibračního mechanismu na válec nebo desku. Výsypka je na dně opatřena soustavou tří destiček s otvory, jejichž překrytím je možné regulovat hmotnostní průtok materiálu a zároveň prostřední destička s otvory vykonává kmitavý pohyb a umožňuje tak rovnoměrné sypání materiálu. Kmitání destičky je realizováno pomocí stejnosměrného elektromotoru a pružně uloženého excentru. Toto pružné uložení je provedeno pomocí gumiček a je důležité z důvodu zanášení otvorů materiálem během vyprazdňování. Při zaseknutí zrna v otvoru tak nedochází k zastavení motoru a otvor je v dalším kmitu destičky opět uvolněn.

Střední díl separátoru je tvořen buďto válcem nebo deskou. Válec i deska jsou umístěny na rozměrově shodných ramenech umožňujících široký rozsah nastavení jejich polohy.

Třetí tedy koncový díl v pravé části obrázků slouží pro umístění systému elektrod. Je tvořen soustavou ramen poskytujících rovněž dostatečný rozsah pro nastavení jejich polohy. Na tomto koncovém stupni jsou zároveň umístěny sběrné kontejnery na dopadající částice. Po zkušenostech při prvních pokusech bylo potřeba tento díl doplnit o plastový kryt, z bílého plastu, ve kterém jsou umístěny sběrné kontejnery. Tento kryt zabraňuje odlétávání odražených částic a umožňuje zachycení téměř všech částic separované směsi v kontejnerech. To má za následek zanedbatelnou ztrátu během pokusů, celkově čistší proces a lepší efektivitu. Dále jsou v krytu umístěny dvě nastavitelné clony, kterými lze nastavit množství dopadajícího materiálu do jednotlivých kontejnerů.

### **Válcový separátor**

Tento typ je vytvořen za použití středního dílu s válcem. Celá sestava válcového separátoru je znázorněna na situačním náčrtku sestavy na obr. 22. Náčrtek představuje pohled na sestavu z boku. Zcela vlevo je vidět výsyпка se šikmou plochou, po níž je materiál rovnoměrně sypán na válec. Nad válcem je umístěna menší válcová elektroda, která je elektrodou korunující a slouží k nabíjení částic při průchodu ionizovaným vzduchem. Je umístěna společně s vychylovací čočkovou elektrodou na koncovém dílu sestavy. Vychylovací elektroda způsobuje vychylování proudu padajících částic. Ve spodní části koncového dílu jsou znázorněny tři kontejnery. Proud padajících částic do těchto kontejnerů je usměrňován clonami, jejichž úhlem lze nastavit množství materiálu zachyceného v jednotlivých kontejnerech. Úhly natočení clon označované jako  $\delta$  a  $\varepsilon$  lze odečítat pomocí ukazovátka na krytu. Tyto úhly jsou důležitým parametrem pro opakovatelnost pokusu.



Obr. 22 Válcový typ separátoru

Válec je vyroben z plastové trubky o vnějším průměru 170 mm a na vnější stěně je pokoven jedním kusem samolepicí hliníkové folie. Je nezbytné, aby pokovení bylo provedeno právě jedním kusem této folie, aby byla zajištěna její vodivost v celé ploše. Pokud by bylo pokovení provedeno jednotlivými kusy fólie, bylo by nutné tyto kusy s sebou vodivě propojit například nýty, což by narušilo hladký tvar povrchu válce. To by mohlo nepříznivě ovlivňovat charakter elektrického pole v blízkosti takto řešené elektrody. Vodivý povrch válce je kluzně spojen s hřídelí pomocí kartáče. Hřídel je přes uzemňovací svorku ve spodní části ramene připojena k zemnicí svorce vysokonapěťového zdroje. Válec je poháněn, prostřednictvím šnekového soukolí, stejnosměrným motorem napájeným z regulovatelného zdroje. Pomocí napětí je možné plynule regulovat otáčky, jak je naznačeno v tabulce.

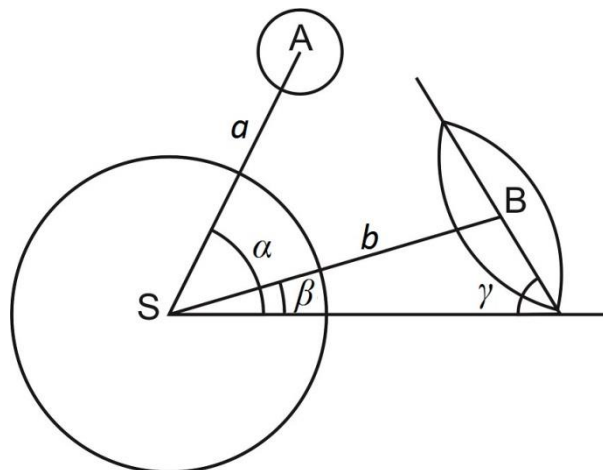
Napětí (U)	9	10	12	14	16	18	20
Otáčky (ot/min)	45	55	70	86	102	117	133

Tabulka 2 Hodnoty otáček v závislosti na napětí

### Souřadnicový systém elektrod

Z důvodu opakovatelnosti pokusů bylo nezbytné stanovit nějaký souřadný systém, který by byl schopen zajistit jednoznačné určení polohy a vzájemné nastavení elektrod. Tento souřadný systém má jako počátek souřadného systému střed válce, od něhož je možné stanovit vzdálenosti a úhly svírající s horizontálou. Celá konfigurace elektrod je tedy dána pěti parametry.

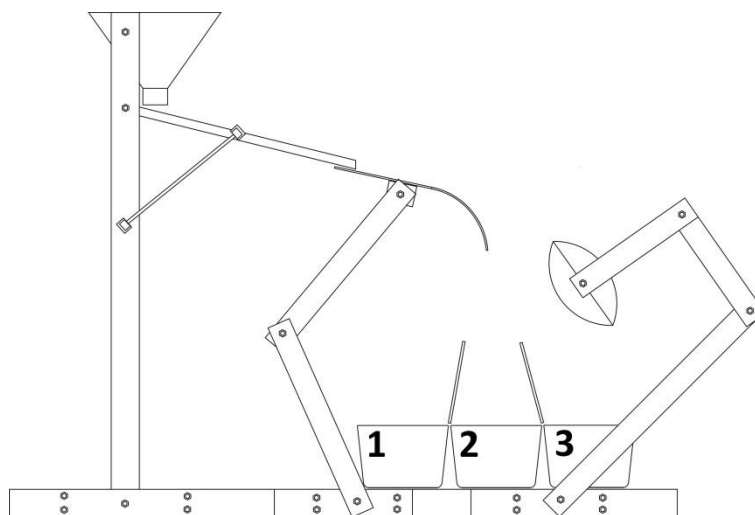
- $a$  (cm) vzdálenost středu souřadného systému a středu koronující elektrody,  
 $\alpha$  ( $^{\circ}$ ) úhel svírající úsečka  $a$  s horizontálou,  
 $b$  (cm) vzdálenost středu souřadného systému a středu vychylovací elektrody,  
 $\beta$  ( $^{\circ}$ ) úhel svírající úsečka  $b$  s horizontálou,  
 $\gamma$  ( $^{\circ}$ ) úhel svírající osa vychylovací elektrody s horizontálou.



Obr. 23 Souřadný systém elektrod válcového separátoru

### Deskový separátor

Dalším typem je deskový separátor. Jeho uspořádání je podobné jako u předchozího typu ovšem jeho princip je poněkud odlišný. Především nedochází k nabíjení částic a náboj tak získávají částice pouze důsledkem elektrické indukce v elektrickém poli při kontaktu s uzemněnou elektrodou po, které sklouzávají. Získaný náboj pak závisí na elektrické vodivosti částic. V případě, že bychom dělili směs pouze vodivých částic a izolantů, vodivé částice podle principu elektrické indukce v blízkosti vychylující elektrody by získávaly záporný náboj a byly by následně po opuštění desky přitahovány k vychylovací elektrodě. Naopak nevodivé částice nemohou být tímto způsobem nabity a vychylovací elektroda na ně tudíž nemůže působit.



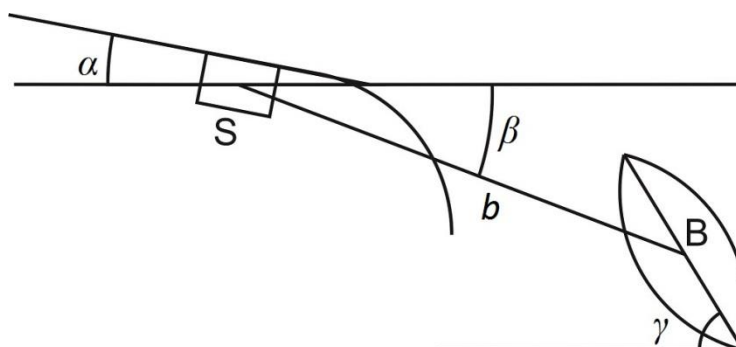
Obr. 24 Deskový typ separátoru

### Souřadný systém elektrod

Stejně jako u válcového typu separátoru tak i u deskového typu bylo nezbytné stanovit jednoznačný souřadný systém vzájemná poloha elektrod je tak dána těmito čtyřmi parametry.

- $\alpha$  (°) úhel svírající plocha desky a s horizontálou,
- $b$  (cm) vzdálenost osy desky a středu vychylovací elektrody,
- $\beta$  (°) úhel svírající úsečka  $b$  s horizontálou,
- $\gamma$  (°) úhel svírající osa vychylovací elektrody s horizontálou.

Střed souřadného systému  $S$  je v tomto případě dán osou uchycení desky. Úhel  $\alpha$  představuje úhel mezi horizontálou a plochou desky po které částice sklouzávají. Vzdálenost  $b$  představuje vzdálenost mezi středem souřadného systému a osou vychylovací elektrody. Úhel  $\beta$  nalezneme mezi horizontálou a spojnicí počátku souřadné soustavy a středu vychylovací elektrody. Úhel  $\gamma$  představuje natočení vychylovací elektrody, nalezneme jej mezi horizontálou a příčnou osou vychylovací elektrody.



Obr. 25 Souřadný systém pro deskový separátor

## 6 Experimentální ověření

Experimenty byly prováděny s řadou vzorků semen zemědělských kulturních plodin a ostatních rostlin představujících příměsi v obilné mase. Vzorky představují jakési reprezentativní zástupce nejběžnějších druhů obilovin. Základem pro tento postup bylo získání vzorků nečistot přímo z provozu čističky obilí. Vzorky poskytla firma AGRO-B spol. s r.o. Kardašova Řečice, která se zabývá mimo jiné i posklizňovou úpravou obilovin. Vzorky představují propad a přepad síty při síťovém třídění a úlet jemnějších částic během profukování vzduchem. Takto se podařilo získat vzorky pěti základních zemědělských plodin tedy pšenice seté, žita setého, ječmene setého, ovsa setého a řepky olejky. Pro zkoumání nečistot bylo důležité, že se podařilo získat vzorky nejen jako čistá jednodruhová zrna základní kultury ale k nim i nečistoty extrahované přímo z jejich příslušné obilné masy. Při zkoumání nečistot bylo zjištěno, že nebude možné experimenty provádět přímo se skutečnými nečistotami. Jelikož vzorky nečistot představují nehomogenní směs tvořenou prachem, semeny plevelů trav, a zbytky klasů. Proto z důvodu opakovatelnosti pokusů, průkaznosti ale zároveň i prašnosti v laboratorních podmínkách bylo rozhodnuto o nahrazení takovýchto nečistot vždy jednou reprezentativní příměsí, se kterou bude experiment proveden.

Velký praktický význam by nemělo separovat od sebe jednotlivé druhy základních kulturních plodin jako například oves od pšenice, neboť ke smísení těchto kultur během sklizně ani skladování dojít nemůže. Proto byly pokusy zaměřeny na separování, které co možná nejvíce odpovídají skutečné nežádoucí příměsi. Pro účely laboratorních pokusů byly zvoleny následující příměsi.

- Mechanicky poškozená zrna nebo jinak takzvané zlomky zrn byly nahrazeny jemnými pšeničnými kroupami, což jsou částečně rozdrcená zrna zbavená obalů (otrub) a představují tak speciální případ mechanicky poškozených zrn.
- Semena trav a plevelů byla nahrazena směsí travních semen s obsahem semen jílku vytrvalého, kostřavy luční, kostřavy červené, bojínku lučního a lipnice luční. Zároveň byla při pokusech používána také semena merlíku čilského (quinoa) představující semena plevelů. Přesto, že se tato rostlina v Evropě běžně nevyskytuje, byla použita pro experimenty, neboť vykazuje zajímavé elektrické vlastnosti.

- Zbytky slupek zrn obilí tedy plevy byly v dostatečném množství a čistotě získány ze vzorků pocházejících z provozu čističky obilí a mohly být bez problémů použity. Jelikož tyto plevy pocházejí ze zrn pšenice, byly při pokusech použity právě ve směsi s pšenicí.
- Zrna, která během procesu mlácení nebyla zcela zbavena obalu, zůstávají ve slupce a přítomnost těchto zrn v obilné masě je také nežádoucí. Separace takovýchto zrn byla zkoušena na zrnech ovsa, z nichž jednu složku tvořil oves loupaný a druhou složku oves neloupaný jinak též pluchatý.
- Zvláštní skupinou při experimentech tvořily částice záměrně zvlhčené. Udává se [8], že zrna mechanicky poškozená nebo jiná plevelná semena dokáží více absorbovat vzdušnou vlhkost a vyznačují se tak vyšší vlhkostí a s tím spojenou i odlišnou vodivostí. Za tímto účelem byla zrna navlhčena a zároveň obarvena, aby tak bylo možné tato zrna následně rozpoznat a experiment vyhodnotit.

Je nutné uvést, že nebyly detailně zkoumány elektrické vlastnosti používaných semen. Pokud bychom uvažovali použití separátoru pro praktické použití v zemědělství, bylo by nezbytné jednoznačně definovat elektrické vlastnosti jednotlivých složek obilné masy. To by si vyžádalo další velmi rozsáhlý výzkum, jaký není předmětem této diplomové práce. Při experimentech byla pouze zkoumána možnost použití separátoru na semena rostlin a to s využitím možnosti změn konfigurace elektrodového systému a přikládaného napětí.

### **Válcový separátor**

První série experimentů byla provedena na, konstrukčně složitějším, válcovém separátoru. Detailní údaje z experimentů jako grafy zjištěných hodnot, nastavení elektrodového systému nebo fotodokumentaci jednotlivých druhů zrnitých materiálů je možné nalézt v příloze.

### **Ověření správné funkce separátoru**

Jelikož jsou zařízení tohoto typu používány primárně pro separaci vodivých částic od částic s horší vodivostí, bylo rozhodnuto o provedení experimentu za účelem ověření správného fungování zařízení. Experiment spočíval v separování směsi tvořené granulátem ABS a jemných měděných částic. Jako měděné částice bylo použito nastříhané měděné lanko na

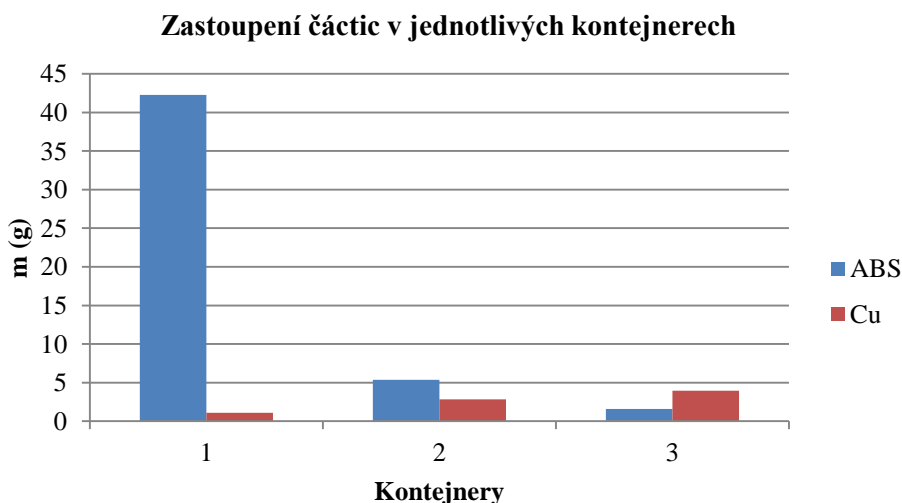
kusy o rozměrech zhruba 1,5 až 2 mm. Tato směs o podílech jednotlivých složek 10 g Cu a 50 g ABS byla následně podrobena separaci na válcovém separátoru.

V průběhu experimentu bylo zapotřebí snížit napětí na koronující elektrodě, protože procházející měděné částice mezi válcem a koronující elektrodou snižovaly izolační vzdálenost a způsobovali tak výboje. Odstranění tohoto nežádoucího jevu by bylo možné dosáhnout taktéž zvětšením izolační vzdálenosti mezi válcem a koronující elektrodou.

Výsledek byl poté jasně patrný. Vodivé částice byly po průchodu pod koronující elektrodou přitahovány k vychylovací elektrodě a následně dopadali do zadních dvou kontejnerů (2 a 3). Naopak granule ABS vzhledem ke svému taru a hmotnosti přímo neulpívaly na válci, ale bylo zřejmé, že na jejich pohyb nemá vychylovací elektroda téměř žádný vliv a dopadaly s nezměněnou trajektorií do kontejneru 1, tedy nejbližší válci. Výsledek separace je vidět z tabulky a z grafu.

Kontejner	1. cyklus			Účinnost	Čistota
	1	2	3		
ABS	42,25g	5,37g	1,58g	84,50%	88,67%
Cu	1,08g	2,84g	3,97g	68,10%	83,05%

Tabulka 3 Výsledky experimentu – směs ABS a Cu



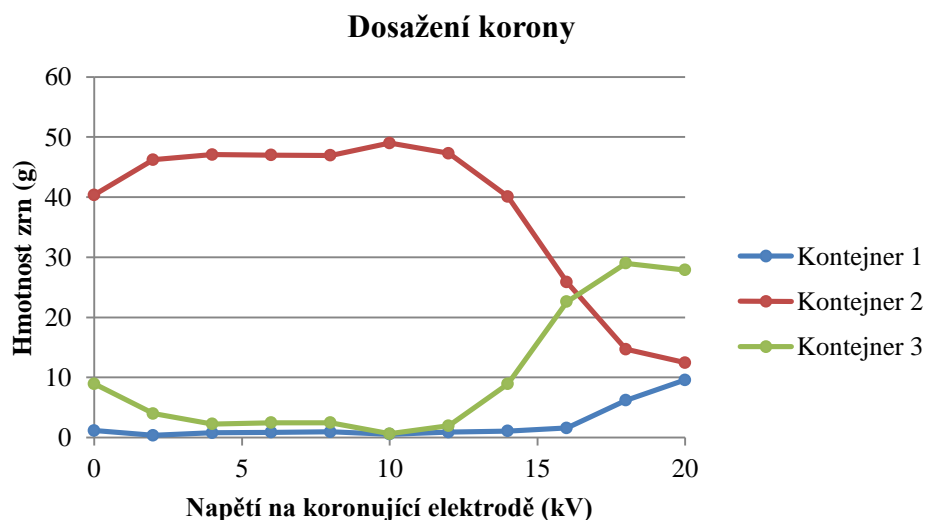
Graf 1 Výsledek experimentu pro ověření správné funkce separátoru



## Stanovení správné úrovně napětí na koronující elektrodě

Pro nabíjení částic prostřednictvím korony je nezbytné dosáhnou v okolí elektrody korony. Z tohoto důvodu byl proveden experiment za účelem stanovení správné úrovně napětí pro nabíjení. Pokus byl proveden s 50 gramy pšenice, která byla podrobena sérii měření při, kterých bylo postupně zvyšováno napětí od nuly až po 20 kV. Nad tuto hodnotu napětí již nebylo při dané konfiguraci možné pokračovat, protože při dalším zvýšení napětí již docházelo k přeskokům mezi válcem a koronující elektrodou. Výchozí pokus začal bez přiloženého napětí. Přitom byly seřizeny clony, tak aby hlavní proud částic padal do prostředního tedy 2. kontejneru a jakákoli výchylka tohoto proudu částic byla zaznamenána v podobě zvýšeného množství zachycených částic v jednom ze dvou okolních kontejnerů

Z grafu je vidět, jak při postupném zvyšování napětí po 2 kV je téměř celé množství částic zachytáváno ve 2. kontejneru. Naopak obsah okolních dvou kontejnerů je nízký a je způsoben pouze úletem daným seřizením clon. Ovšem při napětí 12 kV se začne v okolí koronující elektrody tvořit korona a částice se začínají nabíjet což má dopad na jejich trajektorie během průletu kolem vychylovací elektrody množství částic, které dříve dopadaly do kontejneru 2, se postupně začne přesouvat do kontejneru 3. Při napětích 18 a 20 kV je již vliv vychylující elektrody tak silný, že některé částice dopadají přímo na vychylovací elektrodu a odrážejí se od ní což má za následek rozptýlení částic i do kontejneru číslo 1, který by jinak zůstal téměř prázdný.



Graf 2 Obsah jednotlivých kontejnerů v závislosti na zvyšujícím se napětí

## Separace směsí

V následujících tabulkách jsou výsledky experimentálních separací provedených na řadě rozdílných směsí zemědělských kulturních plodin a materiálů představujících nečistoty v obilné mase. Experimenty byly prováděny tak, že nejprve bez přiloženého napětí byly seřizeny clony, aby proud padajících částic směřoval do prostředního kontejneru číslo dva tak aby mohla být zaznamenána jakékoli výchylka tohoto proudu zachytáváním vychylovaných částic do okolních dvou kontejnerů. To znamená, pokud je proud padajících částic přitahován k vychylovací elektrodě, změní se trajektorie částic, což bude zaznamenáno v podobě zachycení většího množství částic v kontejneru číslo tři, tedy blíže vychylovací elektrodě. Naopak pokud částice budou mít snahu ulpívat na válci jejich trajektorie, bude rovněž ovlivněna a větší množství částic tak bude zachyceno v kontejneru číslo jedna tedy nejbližší válci (viz obr. 22).

Pokusy byly prováděny vždy pro směsi dvou materiálů každý o hmotnosti 25 g, tedy celková hmotnost směsi činila 50 g. Pouze pro velmi lehký materiál byla tato hmotnost upravena, jak je uvedeno níže. V tabulce je vždy uveden jako první materiál základní kultury nějaké zemědělské plodiny například pšenice nebo oves a jako druhý materiál představující příměs, která má být odseparována. Pro možnost porovnání byly pokusy prováděny ve dvou krocích. Nejprve bylo provedeno vyhodnocení hned po prvním cyklu separace, takže materiál prošel procesem pouze jednou. Posléze byl pokus proveden ve třech cyklech tedy obsah prostředního kontejneru číslo dva, kam byl směřován hlavní proud padajících částic, byl po prvním cyklu znovu dvakrát vrácen na začátek do výsypky. Přičemž obsah okolních dvou kontejnerů byl ponechán. Takto došlo ke zvýšení účinnosti separace a lepší vypovídající hodnotě výsledků. Účinnost separace je v tabulkách vypočtena podle vztahu

$$\eta = \frac{m_z}{m_{celk}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

kde  $m_z$  je hmotnost částic zjišťované frakce zachycené v kontejneru ve kterém je toto zachycení žádoucí a  $m_{celk}$  je celková hmotnost zjišťované frakce.

Čistota separace je vypočtena jako

$$p = \frac{m_z}{(m_z + m_n)} \cdot 100 \quad (6.2)$$

kde  $m_z$  je hmotnost částic zjišťované frakce zachycené v kontejneru ve kterém je toto zachycení žádoucí a  $m_n$  je hmotnost částic nežádoucí frakce ve stejném kontejneru.

### Pšenice a zlomky zrn pšenice

První pokus byl proveden pro směs zrn pšenice a částečně pomletých zrn pšenice, které tak reprezentují, pro laboratorní pokusné účely, mechanicky poškozená zrna, vyskytující se jako nežádoucí složka v obilné masě. V prvním cyklu je u pšenice vidět účinnost separace 95,6% to není nijak překvapivé, protože účinnost je počítána pro 2. kontejner do kterého je směřován většinový proud padajících zrn a zbývající 4,4% jsou tvořeny pouze úletem do prvního a třetího kontejneru. Zajímavá je v tomto případě účinnost pro zlomky zrn, která je počítána pro 3. kontejner do kterého jsou vychylovány. Přesto, že se tato účinnost může jevit jako poměrně nízká, je tímto způsobem možné pozorovat vliv elektrostatického pole na padající zrna respektive jejich části. Obsah 3. kontejneru se rovněž vyznačuje vysokou čistotou. Tento jev je pak ještě více patrný po podrobení směsi třem cyklům separace, tzn., opětovnému vysypání druhého kontejneru do výsyvky. Přičemž výsledek po druhém cyklu separace nebyl v práci zkoumán a vliv vícenásobného opakování procesu separace pro obsah druhého kontejneru byl zkoumán až pro třetí cyklus. V následujících tabulkách i v grafech v příloze jsou vždy uvedeny hodnoty pouze pro první a třetí cyklus separace.



Obr. 26 Zrna pšenice a zlomky po 1. cyklu



Obr. 27 Zrna pšenice a zlomky po 3. cyklu

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	0,14 g	23,9 g	0,65 g	95,60%	60,95%	0,52 g	23,65 g	0,82 g	94,60%	76,81%
Zlomky	0,51 g	15,31 g	9,12 g	36,48%	93,35%	0,58 g	7,14 g	17,26 g	69,40%	95,46%

**Tabulka 4 Výsledky experimentu – pšenice a zlomky zrn**

### **Pšenice a plevy pšenice**

Při tomto pokusu byla zrna pšenice smíchána s jejich oddělenými slupkami tedy plevy. Problém spočíval ve skutečnosti, že jsou plevy mnohem lehčí než zrna proto bylo použito pouze 5 g plev a 20 g pšenice. Tak bylo dosaženo přibližně stejného objemu materiálu jako při ostatních pokusech. Pro stanovení výsledků pokusu nemá tato změna rozhodující význam, pouze je potřeba tento fakt zohlednit při výpočtu účinnosti respektive čistoty. V tomto případě se plevy nechovaly všechny stejně. Část plev ulpívala na válci a byla zachycena v prvním kontejneru a část byla přitahována k vychylovací elektrodě a padala do třetího kontejneru. Jelikož bylo množství zachycených plev větší v prvním kontejneru, je výpočet účinnosti proveden pro první kontejner. Rovněž platí, že není účinnost hned po prvním cyklu příliš vysoká, ale zato se vyznačuje vysokou čistotou.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	0,25 g	17,64 g	2,06 g	88,20%	57,12%	0g	17,24g	2,73g	86,20%	66,51%
Plevy	1,14 g	3,31 g	0,46 g	22,80%	94,80%	1,41g	2,17g	1,35g	28,20%	97,41%

**Tabulka 5 Výsledky experimentu – pšenice a plevy**

### **Oves a semena trav**

Při pokusu bylo použito 25 g loupaného ovsa a 25 g směsi semen trav. Semena trav zejména jílku vytrvalého, kostřavy luční a kostřavy červené se vyznačují velmi tenkými a protáhlými zrny, která potom vykazují velmi zajímavé chování při průchodu elektrickým polem. Proto bylo dosaženo poměrně dobré účinnosti i čistoty, a to již po prvním cyklu, ovšem silové působení vychylovací elektrody bylo při těchto pokusech natolik silné, že docházelo k narážení do vychylovací elektrody a následným odrazům do nežádoucích kontejnerů. Proto by bylo možné očekávat i lepší účinnosti při použití jinak tvarované elektrody.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Oves	0,2 g	23,72 g	0,99 g	94,88%	71,10%	0,11 g	23,3 g	1,55 g	93,20%	89,55%
Semena trav	0,3 g	9,64 g	15,06 g	60,24%	93,83%	0,46 g	2,72 g	21,74 g	86,96%	93,34%

Tabulka 6 Výsledky experimentu – oves a semena trav

### Pšenice a merlík čilský

Směs pšenice a merlíku čilského byla použita z důvodu velice zajímavých elektrických a zejména triboelektrických vlastností této plodiny. Merlík čilský se vyskytuje zejména v Jižní Americe a v Evropě je běžně k dostání v obchodech se zdravou výživou. Jeho semena se proto v obilné mase nevyskytují. Přesto byl do experimentu zařazen, neboť na jeho semenech byla pozorována výrazná schopnost se nabíjet. S tím souvisí i dosti patrný vliv vychylovací elektrody při průchodu elektrickým polem. U této směsi bylo dosaženo poměrně dobré účinnosti i čistoty.



Obr. 28 Zrna pšenice a merlíku čilského po 1. cyklu Obr. 29 Zrna pšenice a merlíku čilského po 3. cyklu

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	0 g	23,9 g	0,99 g	95,60%	64,09%	0,39g	22,89g	1,63g	91,56%	84,28%
Merlík čil.	0,43 g	13,39 g	11,1 g	44,40%	91,81%	0,79g	4,27g	19,77g	79,80%	92,38%

Tabulka 7 Výsledky experimentu – pšenice a merlík čilský

## Oves loupáný a neloupáný

Při tomto experimentu bylo smícháno 25 g loupáného ovsa tedy jader ovsa zbavených slupek a 25 g neloupáného ovsa tedy jader ovsa ve slupce. Ačkoli pokus s triboelektrickým nabíjením na free-fall separátoru ukázal, že se loupáný oves nabije záporně, zatímco neloupáný oves se téměř nenabije, pokus na válcovém separátoru již tak jednoznačný nebyl. Obě frakce se nabíjely téměř shodně, pouze u neloupáného ovsa bylo dosaženo zhruba o 2 g větší vychýlení do třetího kontejneru. Po třetím cyklu bylo odseparováno zhruba o 6 g neloupáného ovsa více. Vliv elektrického pole je tedy sice patrný, ale takto zvolená směs je podle svých elektrických vlastností na válcovém separátoru téměř nedělitelná.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Loupaný	0,26 g	20,42 g	4,23 g	81,68%	53,92%	1,39 g	17,93 g	5,56 g	71,72%	62,34%
Neloupaný	1,2 g	17,45 g	6,28 g	25,12%	59,75%	2,68 g	10,83 g	11,34 g	45,36%	67,10%

Tabulka 8 Výsledky experimentu – oves loupáný a oves neloupáný

## Suchý oves a vlhčený oves

Směs pro tento experiment tvoří 25 g suchého ovsa a 25 g ovsa, který byl záměrně navlhčen a zároveň obarven aby bylo možné jej ve směsi rozpoznat, stanovit jeho podíl a experiment vyhodnotit. Přestože se jedná o dvě složky tvořené totožným materiálem pouze s odlišnou vlhkostí, je vliv vlhkosti na chování částic jasně patrný. Částice se tak chovají přesně podle očekávání. Suché částice, vyznačující se nižší vodivostí, jsou vychylovány minimálně a naopak navlhle částice díky své zvýšené vodivosti jsou vychylovány více. To je patrné z tabulky kdy suchá zrna jsou zachycována v kontejneru číslo dva a většina navlhklých zrn je unášena a zachycována v kontejneru číslo tři.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Suchý	0,07g	18,85g	5,94g	75,40%	65,93%	0,18g	18,97g	5,77g	75,88%	87,82%
Vlhčený	0,06g	9,74g	15,19g	60,76%	71,89%	0,22g	2,63g	22,13g	88,52%	79,32%

Tabulka 9 Výsledky experimentu – oves suchý a oves vlhčený

## Deskový separátor

Pro další sérii experimentů byl vyměněn střední díl separátoru. Válec byl nahrazen deskou a separátor tak byl přeměněn na deskový typ. Deskový separátor využívá pro jednoznačné

určení vzájemné polohy elektrod poněkud odlišný souřadný systém (viz obr. 25). Souřadnice elektrod musely být pro každý druh zrnitého materiálu upravovány, aby bylo dosaženo lepšího výsledku separace. Tabulku s údaji o polohách elektrod při jednotlivých experimentech je možné najít v příloze.

Zároveň bylo nutné pro každý druh zrnitého materiálu upravovat i tvar desky tak, aby co nejvíce připomínal tvar trajektorie šikmo vrhaných částic. Pro toto uspořádání je nezbytné, aby sklouzávající částice po desce byly v co nejlepším kontaktu s uzemněnou deskou. Proto je potřeba zajistit, aby se částice od desky neodrážely a sklouzávaly po desce pokud možno kluzně. Pokud jsou částice sypány z výsypky na desku v nesprávném úhlu nebo pokud má deska špatný tvar dochází k tomu, že částice po několikanásobném odrazu spadnou do některého z kontejnerů, přičemž na ně vychylovací elektroda téměř nepůsobí.

### Ověření správné funkce separátoru

Podobně jako válcový separátor i tento typ je vhodný zejména k oddělování elektricky vodivých částic směsi od nevodivých proto na začátku experimentů bylo nejprve potřeba ověřit, zda zařízení funguje. Toto ověření bylo provedeno, stejně jako v případě válcového separátoru, se směsí jejíž chování je na tomto typu separátoru známé a je předvídatelné. Pro ověření byla tedy použita směs tvořená 10 g granulátu ABS a 10 g granulátu Cu. V průběhu experimentu bylo vidět, jak granulát ABS sklouzává po desce a následně prochází elektrickým polem bez viditelného vlivu vychylovací elektrody, zatímco částice mědi byly nejprve jakoby napřiměny nebo zorientovány ve směru působení elektrického pole a poté přitaženy k vychylovací elektrodě a tím odděleny. To odpovídá předpokladu, podle kterého jsou vodivé částice nabíjeny záporně pomocí elektrické indukce a následně přitahovány ke kladné vychylovací elektrodě.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
ABS	0,25g	9,66g	0,05g	96,60%	64,27%	0,14g	9,68g	0,13g	96,80%	91,75%
Cu	0,13g	5,37g	4,37g	43,70%	98,87%	0,15g	0,87g	8,87g	88,70%	98,56%

Tabulka 10 Výsledky experimentu – směs ABS a Cu

### Pšenice a zlomky zrn pšenice

Pokus se směsí pšenice a částečně pomletých zrn pšenice byl proveden pro směs 25 g pšenice a 25 g zlomků zrn. Hlavní proud padajících částic bez přiloženého napětí byl směřován do

prvního kontejneru a následně po přiložení napětí docházelo k vychylování částic do prostředního tedy druhého kontejneru. Po prvním cyklu je vidět že do druhého kontejneru se podařilo odseparovat více zlomků pšenice ovšem rozdíl mezi hmotností pšenice a zlomků je poměrně malý. Podobný výsledek lze pozorovat i po třech cyklech kdy se hmotnosti obsahu obou složek ve druhém kontejneru téměř zdvojnásobily, ovšem jejich poměr se nezměnil.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	19,30g	5,44g	0,23g	77,20%	55,80%	12,20g	11,64g	1,02g	48,80%	62,15%
Zlomky	15,29g	8,62g	1,05g	34,48%	61,31%	7,43g	16,95g	0,54g	67,80%	59,29%

**Tabulka 11 Výsledky experimentu – pšenice a zlomky zrn pšenice**

### Pšenice a plevy pšenice

Z důvodu malé hustoty plev vzhledem k ostatním materiálům byl tento pokus proveden pouze pro 10 g plev a 10 g pšenice. Jelikož jsou plevy velmi lehké, dal se na nich velmi dobře pozorovat vliv elektrického pole během průletu poblíž vychylovací elektrody. Zatímco mnohem těžší zrna pšenice prolétali elektrickým polem téměř beze změny trajektorie. Na plevách bylo vidět, jak jsou unášeny a přitahovány k vychylovací elektrodě. Tento jev se ovšem týkal jen zhruba poloviny plev. Zbytek také nebyl ovlivněn a průchod elektrickým polem dokončil společně se zrnky pšenice s nezměněnou trajektorií. Přitom nebyly zjištěny žádné rozdíly ve fyzikálních vlastnostech mezi plevami takto vychýlenými a plevami nevychýlenými. Nejpravděpodobnější možností vysvětlení tohoto jevu spočívá v tom, že při průchodu mezi elektrodami nebyly tyto plevy v dostatečném kontaktu s deskovou elektrodou. To mohlo být způsobeno odražením plev od desky nebo svezením se plev po zrnech nebo plevách samotných.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	8,26g	1,37g	0,32g	82,60%	62,48%	7,24g	2,18g	0,56g	72,40%	68,24%
Plevy	4,96g	4,78g	0,24g	47,80%	77,72%	3,37g	5,63g	0,98g	56,30%	72,09%

**Tabulka 12 Výsledky experimentu – Pšenice a plevy pšenice**

### Ječmen a semena trav

Na rozdíl od pokusu na válcovém separátoru byl použit ve směsi se semeny trav ječmen, aby tak byla ověřena i možnost separace nežádoucích složek i od zrn této plodiny. Na sladovnícký ječmen stejně jako na potravinářskou pšenici jsou kladeny velké nároky na čistotu. Proto je



zajímavé ověřit separovatelnost směsi se zastoupením právě této složky. Použitá semena trav mají podobnou délku, ovšem jsou poněkud tenčí a bylo proto zajímavé pozorovat chování těchto semen v elektrickém poli. Zatím co nastavení clon bylo provedeno tak, aby většina padajícího ječmene byla zachytávána v prvním kontejneru, chování travních semen by se dalo přirovnat k chování granulátu mědi použitému v úvodním pokusu. Travní semena byla při průchodu elektrickým polem napříměna a zorientována ve směru elektrického pole a následně přitahována k vychylovací elektrodě.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Ječmen	17,79g	7,57g	0,00g	71,16%	57,41%	16,79g	8,19g	0,00g	67,16%	66,68%
Semena trav	13,20g	12,79g	0,16g	51,16%	62,82%	8,39g	17,00g	0,66g	68,00%	67,49%

Tabulka 13 Výsledky experimentu – ječmen a semena trav

### Pšenice a merlík čilský

Jak již bylo zmíněno, merlík čilský se vyznačuje velice zajímavými elektrickými vlastnostmi. To bylo prokázáno i v pokusu na deskovém separátoru, kdy během jednoho průchodu směsi separátorem došlo k odseparování téměř dvou třetin merlíku čilského. Tento výsledek se ještě po třech cyklech mírně zlepšil, ovšem zvětšil se i podíl pšenice odnesené do druhého kontejneru. Výsledná čistota tím pádem klesla. Přesto se jedná o jeden z nejlepších výsledků separace dosažených na deskovém separátoru.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Pšenice	21,28g	3,32g	0,38g	85,12%	71,43%	17,00g	7,15g	0,79g	68,00%	71,01%
Merlík čil.	8,51g	15,67g	0,68g	62,86%	82,52%	6,94g	17,31g	0,73g	69,24%	70,77%

Tabulka 14 Výsledky experimentu – pšenice a merlík čilský

### Oves loupáný a neloupáný

Přestože při pokusu s touto směsí na válcovém separátoru nebylo dosaženo příliš přesvědčivého výsledku, pokus na deskovém separátoru přinesl poměrně zajímavý výsledek. Tento výsledek je velice podobný výsledku experimentu na free-fall separátoru. Podobnost obou pokusů spočívá v tom, že neloupáný oves na elektrické pole téměř nereaguje a nemění svůj směr během průletu elektrickým polem. Naopak loupáný oves je ovlivňován poměrně výrazně, jak je vidět na výsledcích v tabulce. Během jednoho průchodu směsi elektrickým polem došlo k odseparování téměř 50 % celkové hmotnosti loupáného ovsa, zatímco

v případě neloupaného ovsa došlo k zachycení většiny v první nádobě, tudíž bez výrazného vlivu elektrického pole.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Loupaný	10,12g	12,15g	2,71g	48,60%	76,08%	3,94g	17,80g	3,19g	71,20%	64,19%
Neloupaný	20,15g	3,82g	1,00g	80,60%	66,57%	13,75g	9,93g	1,28g	55,00%	77,73%

**Tabulka 15 Výsledky experimentu – oves loupáný a neloupáný**

### Suchý oves a vlhčený oves

Pokus se směsí suchého a vlhčeného ovsa opět potvrdil předpoklad založený na zvýšené vodivosti navlhých zrn. Tímto pokusem bylo prokázáno, že navlhá zrna vykazují charakter vodivých částic, lze je tudíž poměrně úspěšně separovat i pomocí deskového typu separátoru. Během průletu směsi elektrickým polem dochází k vychylování obou frakcí, u vlhčeného ovsa je tento efekt ale výraznější. Tomu je potřeba uzpůsobit polohu clony, aby při přiloženém napětí byla jedna ze složek stále zachytávána ve druhém kontejneru a vodivější tedy vlhčí složka unášena do třetího kontejneru.

Kontejner	1. cyklus					3. cyklus				
	1	2	3	Účinnost	Čistota	1	2	3	Účinnost	Čistota
Suchý	0,18g	18,87g	5,91g	75,48%	59,60%	0,23g	17,58g	7,15g	70,32%	68,06%
Vlhký	0,12g	12,79g	11,97g	47,88%	66,95%	0,16g	8,25g	16,51g	66,04%	48,43%

**Tabulka 16 Výsledky experimentu – Suchý a vlhčený oves**

### Free-fall separátor

Abychom získali možnost srovnání zkoumaných technologií, byl proveden experiment na free-fall separátoru. Tento separátor byl zkonstruován v předešlých letech na katedře teoretické elektrotechniky a dodnes slouží k pokusům se separací plastových granulátů.

Nabíjení probíhá v polypropylenové trubici na vnitřní straně opatřené lamelami. Tato trubice je před začátkem experimentu vysušena teplým vzduchem po dobu 2 min tím bylo dosaženo teploty okolo 40 °C a vlhkosti nepřesahující 15 %. Po skončení vysoušecího procesu byl do trubice nasypan materiál a trubice byla uzavřena zábranou. Poté začalo samotné nabíjení. Nabíjení probíhalo po dobu 2 min při rychlosti otáčení 200 ot/min. Následně byla odstraněna zábrana a materiál se mohl vysypat přes takzvaný podavač, který usměrňuje průchod částic

mezi desky separátoru. V průběhu pokusu bylo zřetelně vidět, jak se některé materiály přitahují ke kladné elektrodě a jak je jejich trajektorie ovlivňována. Nakonec byly zváženy obsahy zachycené v jednotlivých kontejnerech.

Experiment proběhl se šesti vzorky jednotlivých materiálů. Tyto vzorky byly zkoušeny každý druh jednotlivě. Výsledkem tedy je zjištění, na jakou polaritu a zda vůbec se dokáží zrna obilovin triboelektricky nabíjet. Při pokusu nebylo přistoupeno k separování směsí těchto obilovin, ovšem separovatelnost směsí lze stanovit z výsledků jednotlivých pokusů. Většina vzorků byla přitahována ke kladné elektrodě, tedy získávají záporný náboj. Pouze vzorek neloupaného ovsa zůstal téměř nenabit, proto byl zachycen v prostředním kontejneru. Materiály tak nevykazují dostatečně rozdílné triboelektrické vlastnosti a použití separátoru s triboelektrickým nabíjením, pro separaci zemědělských plodin, by bylo jen obtížné a málo účinné.

Podmínky měření: teplota 23,7 °C a vlhkost 28 %.

Plodina	Teplota °C	Vlhkost %	Levý kontejner g	Střední kontejner g	Pravý kontejner g
Pšenice	36,5	14,5	1,27	11,30	66,90
Plevy pšenice	37,8	14,8	0,53	1,58	10,19
Oves loupaný	37,2	15,0	4,77	14,66	59,70
Oves neloupaný	36,6	15,5	8,10	64,5	4,64
Řepka olejka	36,0	13,0	8,20	37,11	33,82
Merlík čilský	40,6	11,7	5,22	4,38	69,73

**Tabulka 17 Rozložení částic v kontejnerech**

## Použité přístroje

V tabule jsou uvedeny všechny přístroje použité při jednotlivých experimentech na všech výše uvedených typech separátorů.

	Název	Typ	Inventární číslo
Vysokonapěťový zdroj	TESLA ELM I	HT 55-I	214811
Regulovatelný zdroj napětí	STATRON	2225	
Digitální otáčkoměr	AMPROBE	TACH20	202585
Digitální váha	KERN	CPB 1000-2	

**Tabulka 18 Použité přístroje**

## 7 Komplexní zhodnocení zkoumané technologie

Zkoumaná technologie by v budoucnu mohla tvořit vhodnou alternativu ke konvenčním technologiím čištění obilí. Uplatnění by mohla nalézt v provozech, ve kterých jsou kladeny zvýšené nároky na čistotu obilí, jako je potravinářství nebo sladovnictví, kde by mohla nahradit technologicky náročné a pomalé triéry nebo optické třídače. Pokud bychom se zabývali otázkou použití této technologie v praxi při čištění obilí, bylo by nezbytné použít sestavu sériově řazených separátorů ať už deskových nebo válcových, z nichž by každý musel být navržen speciálně na určitý druh nečistot. Takto vzniklé zařízení by bylo velmi rozměrné a složité, vyznačovalo by se ovšem snadnou modifikovatelností na různé druhy zemědělských plodin. Při přechodu z jednoho druhu obilí na jiný by stačilo změnit pomocí servopohonů s předdefinovaným nastavením polohu clon popřípadě upravit napětí na elektrodách. Tyto změny pro jednotlivé druhy obilovin se na konvenčních zařízeních provádějí prostřednictvím změny síť nebo jiných součástí čističky to se samozřejmě neobejde bez zásahu obsluhy. Při použití elektrostatického separátoru by zcela odpadly problémy související se zanášením otvorů sít konvenčních čističek a s tím nutně související zásah obsluhy. Nejzásadnější přínos elektrostatických separátorů při použití v zemědělství by spočíval v úspoře vzduchu, jenž je používán k profukování padající obilné masy během čištění na sítích. Velké množství vzduchu tak musí být vyčištěno na textilních filtrech nejprve na vstupu při nasávání, ale zejména na výstupu kdy je vzduch obohacen o lehké částice a nemůže být vyfukován ven bez vyčištění. Jelikož je u elektrostatického separátoru silové působení proudu vzduchu nahrazeno elektrickým polem, zcela by odpadla problematika se vzduchovým hospodářstvím.

Z hlediska technologické náročnosti se v případě válcového i deskového typu separátoru jedná o velice jednoduché zařízení nicméně k jejich funkci je potřeba vysokonapěťový stejnosměrný regulovatelný zdroj. Cena těchto zdrojů se pohybuje kolem několika desítek tisíc korun, avšak závažný problém při použití vysokého napětí spočívá ve vysokých nárocích na bezpečnost a znalost obsluhy. Naopak příznivým faktorem je nízká spotřeba elektrické energie. Při experimentech bylo zjištěno, že při současném nabíjení korunou a přiloženém napětí na vychylovací elektrodu, byl protékající proud korunou zcela neměřitelný pod úrovní jednoho  $\mu\text{A}$ .

Různé druhy plodin se v elektrickém poli chovají téměř stejně, rozdíl spočívá v intenzitě takového působení. Výrazný rozdíl lze pozorovat na směsi loupaného a neloupaného ovsu,

který je při použití válcového separátoru téměř nedělitelný a naopak na deskovém separátoru bylo dosaženo poměrně dobré účinnosti i čistoty. Pokud bychom chtěli porovnat válcový a deskový separátor z hlediska použití v zemědělství, v tabulce jsou vypočítané průměrné hodnoty účinností pro jednotlivé druhy směsí pro oba dva typy separátorů, a to vždy pro první cyklus separace. Výpočty byly provedeny zprůměrováním účinností pro obě separované složky. Tabulka tedy nevyovídá příliš o účinnosti dosažené při jednotlivých pokusech, ale představuje jediný možný způsob jak porovnat oba druhy separátorů mezi sebou. Při porovnávání tedy hledáme optimum s maximální účinností.

	Účinnost	
	Válcový typ	Deskový typ
Cu a ABS	76,30%	70,15%
Pšenice a zlomky	66,04%	55,84%
Pšenice a merlík čilský	70,00%	73,90%
Pšenice a plevy pšenice	55,50%	65,20%
Oves loupaný neloupaný	53,40%	64,60%
Oves suchý vlhčený	68,80%	61,68%

**Tabulka 19**

Jak je vidět nejlepších výsledků bylo dosaženo pro směs ABS a Cu, ovšem co se týká separace rostlinných materiálů, nelze jednoznačně říci, který ze dvou typů separátorů by byl vhodnější. Válcový separátor je lepší pro směs pšenice a zloмок pšenice a pro směs suchého a vlhkého ovsa. Naopak deskový typ vychází příhodnější pro směsi pšenice a merlíku čilského, plev, loupaného a neloupaného ovsa. Ovšem je třeba zdůraznit, že takto získané hodnoty jsou velmi závislé na geometrii uspořádání a na použitém napětí. Při velmi malé změně některého z parametrů by pokus vůbec nemusel fungovat, a proto je nezbytné separátor nastavit každé směsi takřka na míru. Pokud bychom byly schopni dokonale nastavit potřebné parametry pro každou směs, tedy i parametry které nebyly v této práci podrobně zkoumány, jako například poloměr válce, optimalizace jeho rychlosti otáčení nebo tvary elektrod, dalo by se očekávat dosažení jistě mnohem lepších výsledků.

Pokud by zařízení mělo být schopno nahradit stávající technologie, muselo by dosahovat nejméně výkonů těchto zařízení při srovnatelné nebo nižší spotřebě elektrické energie. Pro orientaci lze uvést typické výkony a elektrické příkony konvenčních zařízení podle katalogu.

Zařízení pracující na principu elektrostatických separátorů by muselo být srovnatelné s bubnovými čističkami o výkonu 40 t/h při elektrickém příkonu 6,5 kW [14] nebo se síťovými čističkami o výkonu 50 t/h při příkonu 5,2 kW [15] obojí platí pro pšenici (0,75 t/m<sup>3</sup> a vlhkosti 16 %) na čistotu 98 %. Experimentální válcový separátor, který vznikl v rámci této diplomové práce, má příkon závislý na otáčkách válce a rychlosti kmitacího mechanismu ve výsypce. Je ovšem schopen zpracovat zhruba 50 g materiálu během 20 s což představuje 9 kg/h.

## 8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést průzkum v současnosti využívaných elektrostatických separátorů, navrhnout zařízení pro elektrostatickou separaci zemědělských plodin a uskutečnit experimenty rozdělování zemědělských plodin na sestaveném separátoru. Byl zkonstruován modifikovatelný separátor, který lze výměnou jednoho dílu proměňovat buďto na válcový nebo na deskový. Z výsledků provedených experimentů je vidět, že zkoumaná technologie nejen při separaci zemědělských plodin, ale i při dělení vodivých a nevodivých materiálů, skutečně funguje. Čistota a účinnost separace je do značné míry ovlivněna nastavením geometrie elektrodového systému a systému clon pro přesné zachytávání proudu částic. Tato práce přinesla přehled o možnostech využití elektrostatických separátorů při použití v zemědělství. Výsledky experimentů jasně dokazují vliv elektrického pole na pohyb zrnitých materiálů. Úřady směsí bylo dosaženo poměrně dobré čistoty a účinnosti separace, jak je vidět z tabulek získaných při pokusech včetně dopočtených čistot a účinností. Nejlépe jsou, však výsledky patrné z grafů uvedených v příloze, kde je velice zajímavé sledovat rozdíl v obsahu jednotlivých kontejnerů po podrobení směsi jednomu nebo třem cyklům separace.

V rámci diplomové práce vzniklo zařízení, které může být využito při dalších výzkumech v oblasti elektrostatické separace. Toto zařízení nemusí sloužit výhradně na separaci zemědělských plodin, ale je možné na něm experimentovat s různými materiály s různou elektrickou vodivostí. Široký prostor pro další výzkum na tomto zařízení je možný zejména v oblasti tvarové optimalizace elektrodového systému zahrnující rozměr válce u válcového separátoru, tvar vychylovací elektrody nebo zakřivení desky pro deskový separátor. Možné by bylo provádět napřevou optimalizaci v podobě rozměru a tvaru korunující elektrody, což přímo souvisí s úrovní potřebného napětí k dosažení korony.

## 9 Použitá literatura

- [1] Bude mít třídění plastu smysl? *TŘÍDĚNÍ ODPADU.CZ* [online]. Praha: Concept42, 2007 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/single-post/2017/01/14/smysltrideniplastu>
- [2] CHUANFU, Xiao a Allen LAURENCE. *Electrostatic separation enhanced by media addition*. 1999. USA. US6452126 B1. Uděleno 2002-9-17. Zapsáno 1999-12-22. Dostupné z: [google.ch/patents/US6452126?dq=hamos+electrostatic+separator&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwj4s3Wze7PAhVhDsAKHVVPAwoQ6AEIHDA](http://google.ch/patents/US6452126?dq=hamos+electrostatic+separator&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwj4s3Wze7PAhVhDsAKHVVPAwoQ6AEIHDA)
- [3] IUGA, Alexandru, Adrian SAMUILA, et al. Removal of Metallic Particles From Acrylonitrile Butadiene Styrene Wastes Using Electrostatic Separation Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2011, 47(1), 322-330 [cit. 2017-04-06]. DOI: 10.1109/TIA.2010.2091188. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5624581/>
- [4] VVN zdroje pro elektrostatické odlučovače. *ČKD Elektrotechnika* [online]. Praha: ČKD GROUP, 2011 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.ckde.cz/translate/cs/company-detail/ckd-elektrotechnika/ckd-elektrotechnika/vvn-zdroje-pro-elektrostaticke-odlucovace/185>
- [5] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Těžba lomařství a úpravnictví Modul M02: Úpravnictví nerostných surovin* [online]. Brno: VUT, 2005 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ53-Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20\(M\)/Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20-%20upravnictvi%20nerostnych%20surovin.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ53-Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20(M)/Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20-%20upravnictvi%20nerostnych%20surovin.pdf)
- [6] HARMOND, Jesse Edward, et al. *Seed cleaning by electrostatic separation*. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1960.
- [7] ABDEL-SALAM, M., AHMED, A., EL-KISHKY, H. *Seeds sorting by electrostatic separation: An experimental study*. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*,

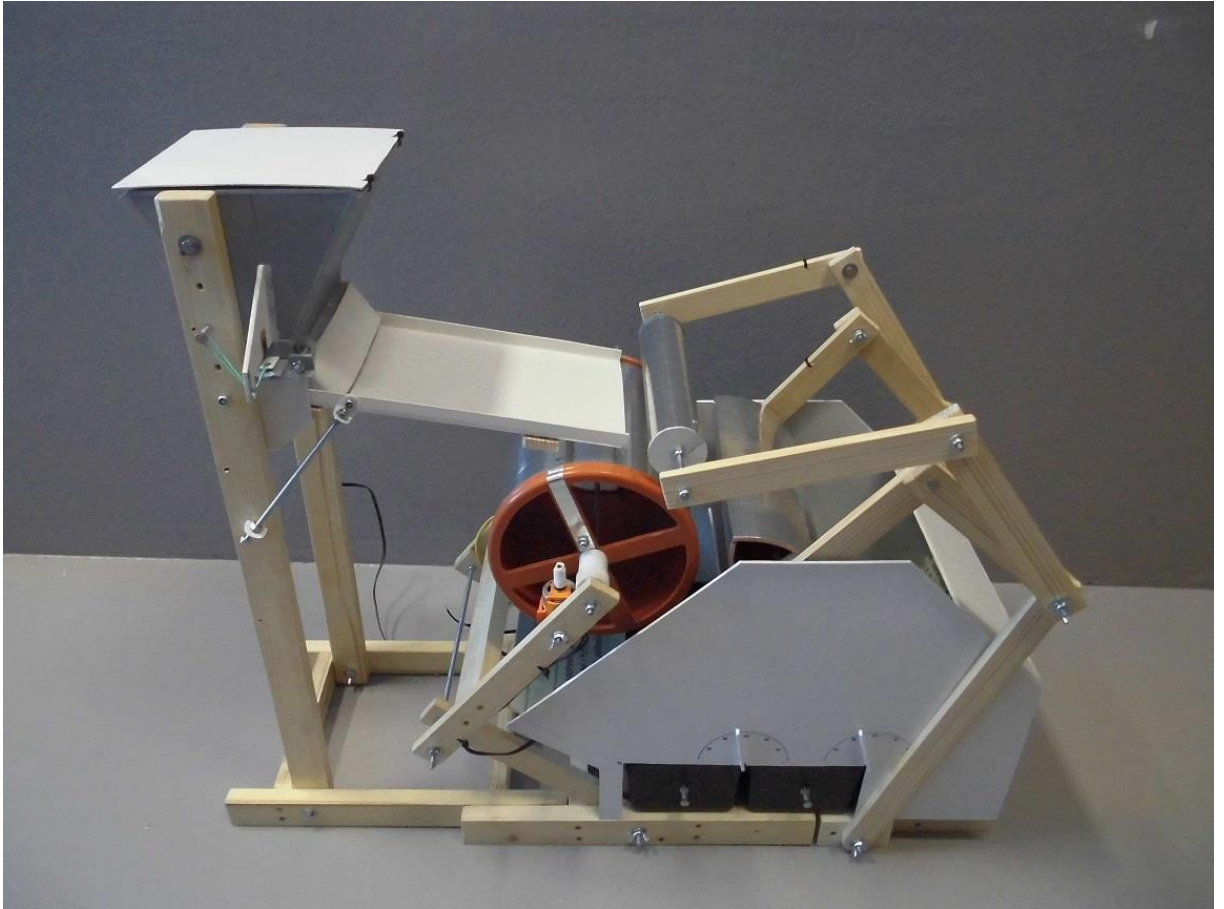


2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference on. IEEE, 2004. pp. 377-380.
- [8] PŘÍHODA, Josef a Marie HRUŠKOVÁ. *Hodnocení kvality: aplikace doporučených přístrojů, metod a interpretace výsledků pro praxi*. Praha: Svaz průmyslových mlýnů České republiky, 2007. Mlynářská technologie. ISBN 978-80-239-9475-9.
- [9] BUREŠOVÁ, Iva a Slavoj PALÍK. *Kvalita obilovin* [online]. Zemědělský výzkumný ústav Kroměříž, s.r.o. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: [www.agris.cz/clanek/139807](http://www.agris.cz/clanek/139807)
- [10] JIROUT, Tomáš. *Dělení směsí zrnitých materiálů* [online]. Praha: ČVUT, 2006 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz16\\_rv.pdf](http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz16_rv.pdf)
- [11] RASCHKA, Norbert a Ingo STAHL. *Tubular free-fall separator for separating plastic mixtures*. 1995. USA. US5687852 A. Uděleno 1997-11-18. Zapsáno 1995-10-27. Dostupné z: <http://www.google.ch/patents/US5687852?dq=Tubular+free-fall+separator&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwiipvbRh-zPAhXMCsAKHY5NAJ4Q6AEIHjAA%20cit.%2021.10.%202016>
- [12] KUPPERS, Helmut a Hans-Jurgen KNAUER. *Electrostatic free-fall separator*. 1983-9-12. USA. US4797201 A. Uděleno 1989-1-10. Zapsáno 1983-9-12. Dostupné z: <http://www.google.ch/patents/US4797201?dq=Plate+free-fall+separator&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjH7rChp-zPAhVICcAKHQ5ICosQ6AEIHDA%20cit%2021.10.2016>
- [13] ČSN IEC/TR 61340-1. *Elektrostatické jevy: Principy a měření*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [14] Kombinovaná čistička obilí KDC 4000 KONGSKILDE. *Zemědělské potřeby M+S* [online]. Hrdějovice: Attl, Sedlák, 2015 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.zemedelske-potreby.cz/kongskilde/kombinovana-cisticka-obili>
- [15] Sítové čističky obilí a zrnin. *SIAGRA Posklizňové linky* [online]. Zlín [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.siagra.cz/sitove-cisticky-obili-a-zrnin>

- [16] TILMATINE, Amar, Karim MEDLES, et al. Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. *Waste Management* [online]. 2009, 29(1), 228-232 [cit. 2017-04-06]. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X08001657>
- [17] KACEROVSKY, Jan, Jan BRABEC, Frantisek MACH a Pavel KARBAN. Experimental electrostatic separator for charged particles of plastic mixture. In: *2016 ELEKTRO* [online]. IEEE, 2016, s. 523-526 [cit. 2017-04-06]. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512131. ISBN 978-1-4673-8698-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7512131/>

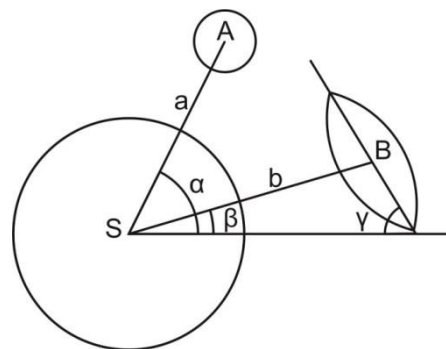
## 10 Přílohy

### Válcový separátor



Obr. 30 Pohled z boku na kompletní sestavu válcového separátoru

### Geometrie



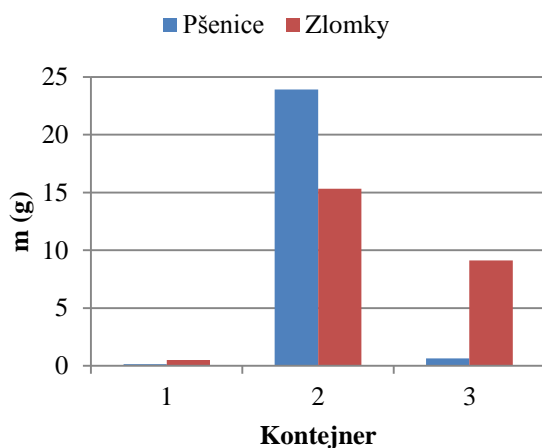
Obr. 31 Elektrodotový systém válcového separátoru

Směs	a (cm)	$\alpha$ (°)	b (cm)	$\beta$ (°)	$\gamma$ (°)	$\delta$ (°)	$\varepsilon$ (°)	U (kV)
ABS a Cu	14	60	25	7	45	87	56	10
Pšenice a zlomky zrn pšenice	12,5	66	14,7	16	43	90	47	10
Pšenice a plevy	12,5	66	14,7	16	43	82	47	10
Oves a semena trav	12,5	54	25,5	5	45	85	60	15
Pšenice a merlík čilský	12,2	66	14,7	16	43	90	47	10
Oves loupaný a neloupaný	12,5	54	25,5	5	45	83	60	15
Oves suchý a vlhčený	12,2	58	18,8	-16	55	75	47	10

Tabulka 20 Vzálenosti a úhly natočení elektrod

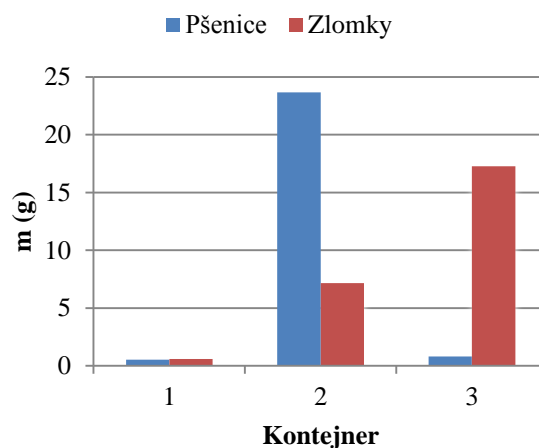
## Pšenice a zlomky zrn pšenice

## 1. cyklus



Graf 3

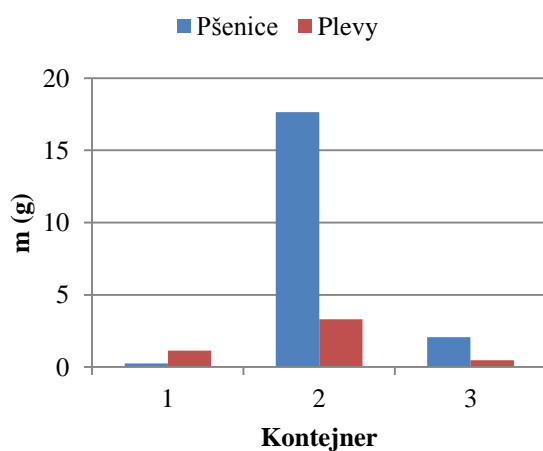
## 3. cyklus



Graf 4

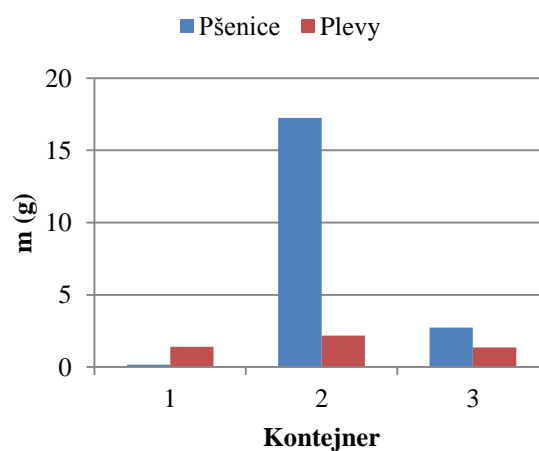
## Pšenice a plevy

## 1. cyklus

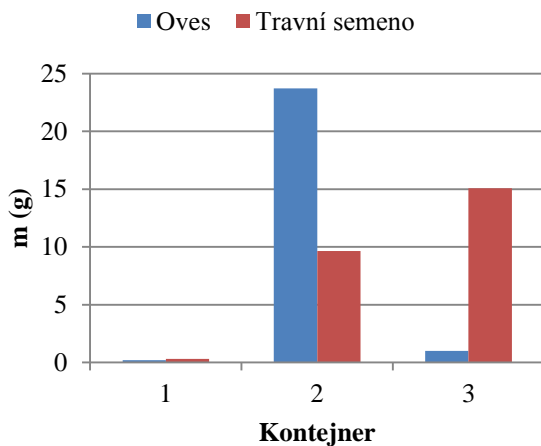


Graf 5

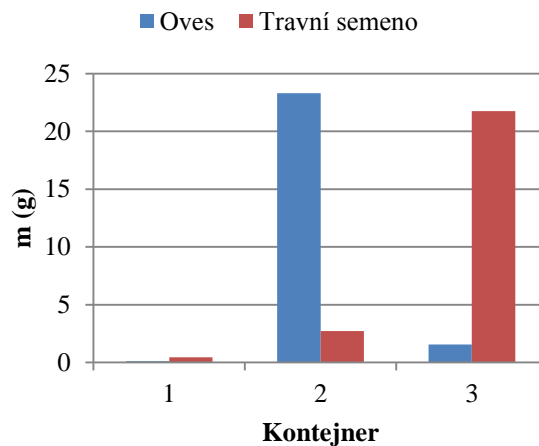
## 3. cyklus



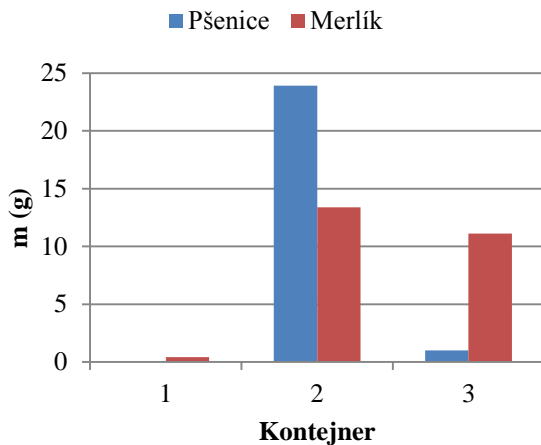
Graf 6

**Oves a semena trav****1. cyklus**

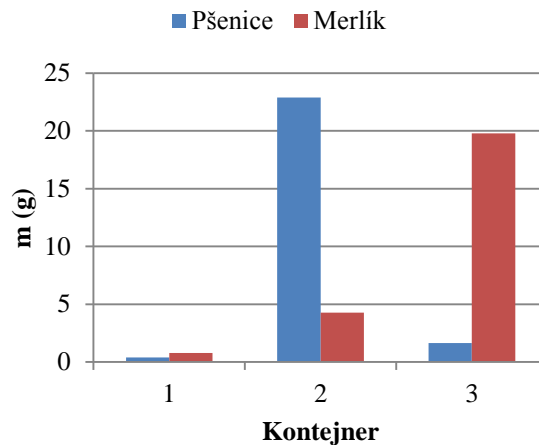
Graf 7

**3. cyklus**

Graf 8

**Pšenice a merlík čilský****1. cyklus**

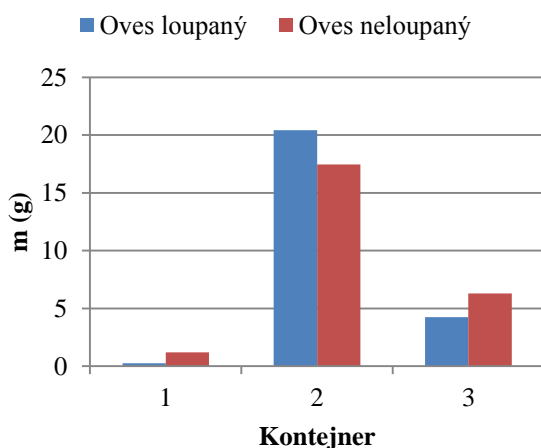
Graf 9

**3. cyklus**

Graf 10

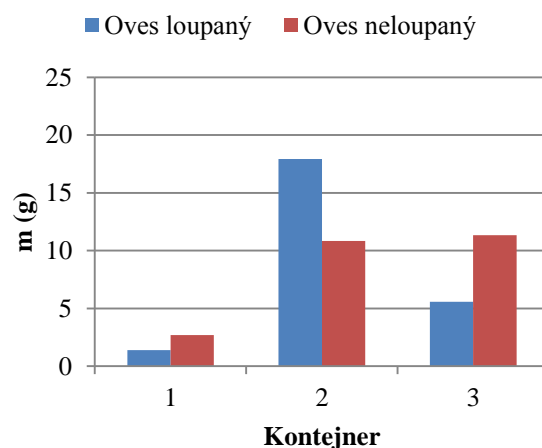
**Oves loupaný a oves neloupaný**

### 1. cyklus



Graf 11

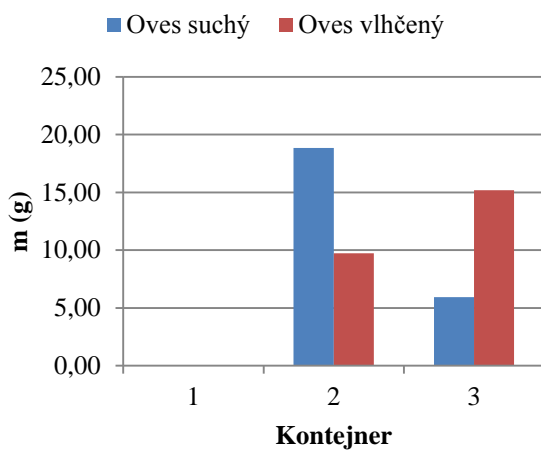
### 3. cyklus



Graf 12

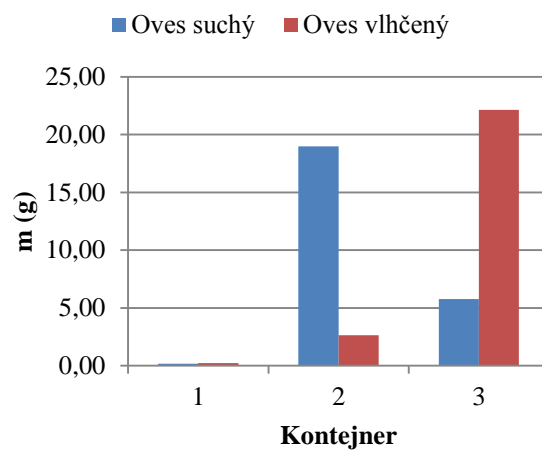
### Oves suchý a vlhčený

#### 1. cyklus



Graf 13

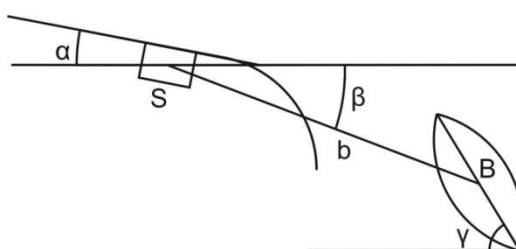
#### 3. cyklus



Graf 14

## Deskový separátor

### Geometrie



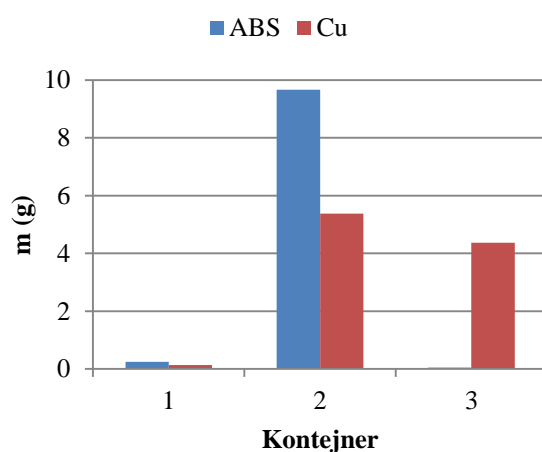
Obr. 32 Elektrodotový systém deskového separátoru

Směs	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	b (cm)	$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	$\delta$ ( $^{\circ}$ )	$\varepsilon$ ( $^{\circ}$ )	U (kV)
ABS a Cu	20	10	6	36	82	90	8
Pšenice a zlomky zrn pšenice	18	21	18	35	73	90	10
Pšenice a plevy	17	23,5	6	45	75	90	10
Ječmen a semena trav	15	19,6	8	45	85	90	10
Pšenice a merlík čilský	18	21	18	35	73	90	10
Oves loupaný a neloupaný	18	20,2	40	40	60	90	10
Oves suchý a vlhčený	7	17,6	0	35	53	90	10

Tabulka 21 Vzálenosti a úhly natočení elektrod

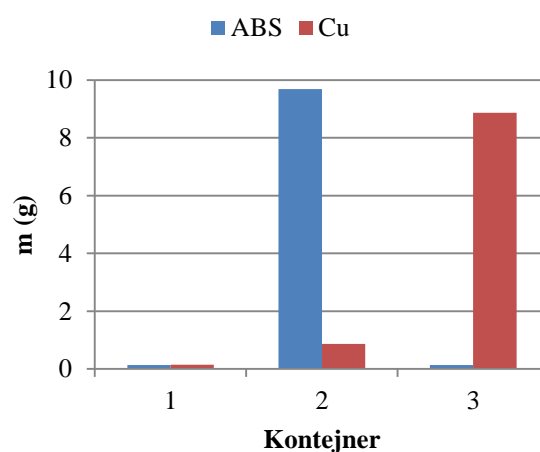
### Granulát ABS a Cu

#### 1. cyklus



Graf 15

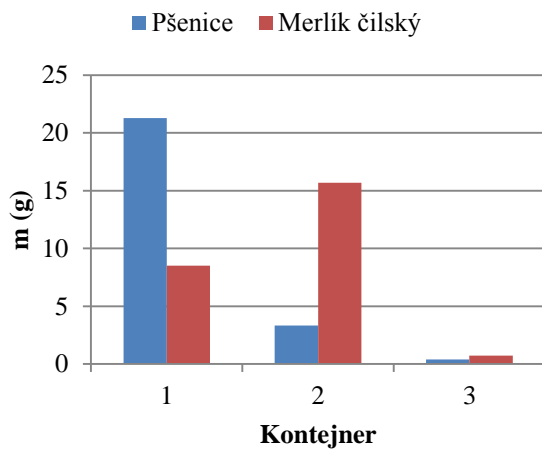
#### 3. cyklus



Graf 16

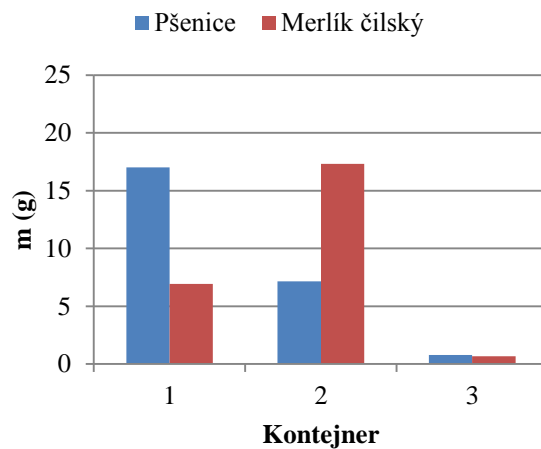
### Pšenice a zlomky

#### 1. cyklus



Graf 17

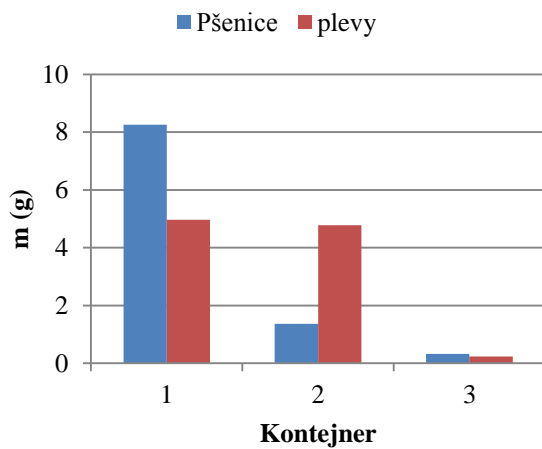
#### 3. cyklus



Graf 18

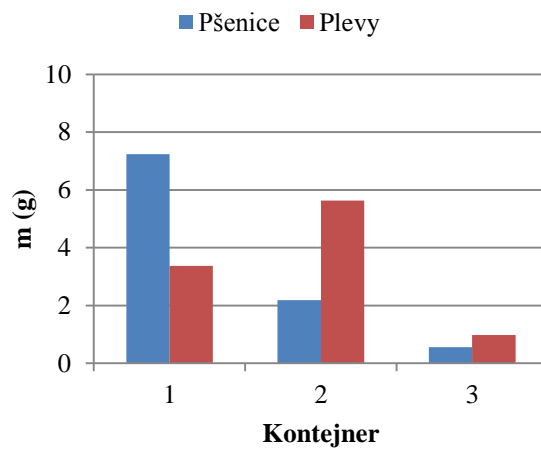
### Pšenice a plevy

#### 1. cyklus



Graf 19

#### 3. cyklus

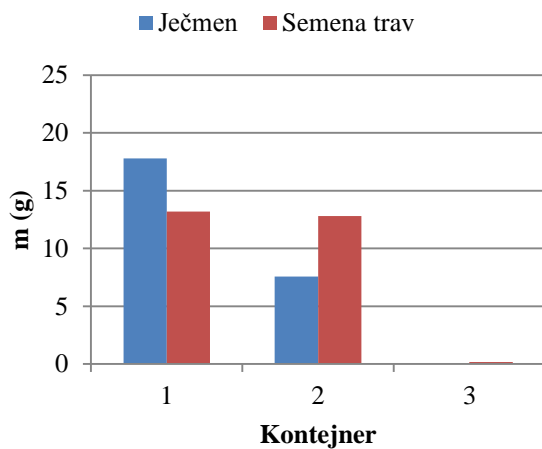


Graf 20



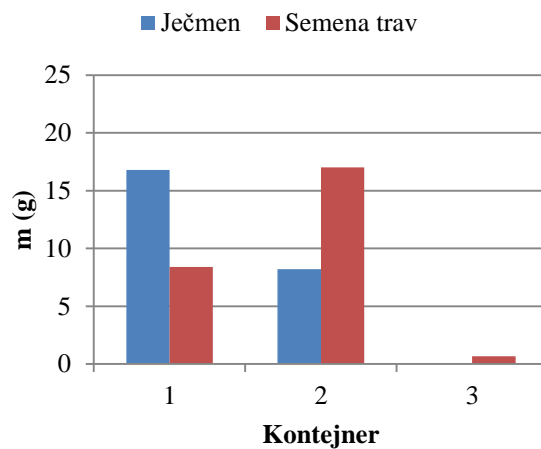
### Ječmen a semena trav

#### 1. cyklus



Graf 21

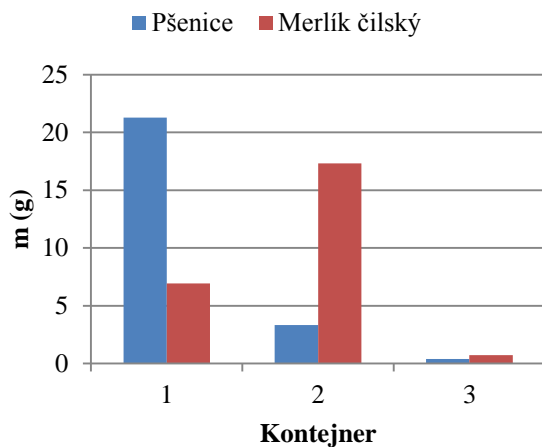
#### 3. cyklus



Graf 22

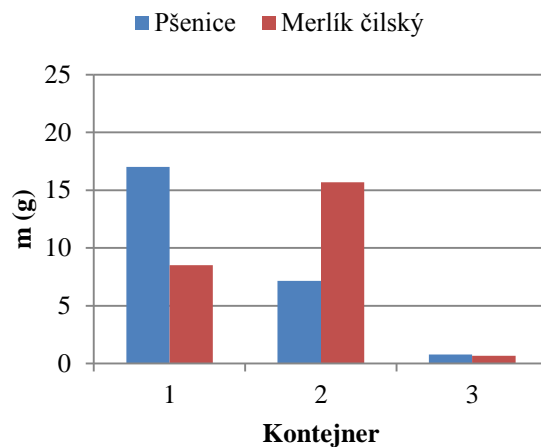
### Pšenice a merlík čilský

#### 1. cyklus



Graf 23

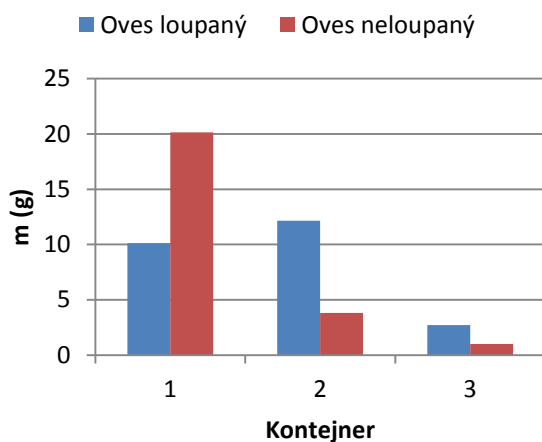
#### 3. cyklus



Graf 24

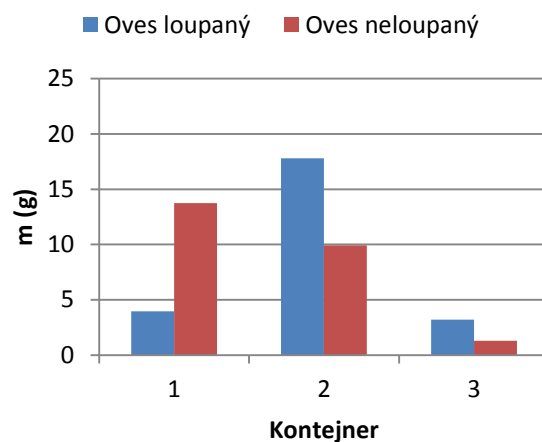
## Oves loupaný a oves neloupaný

### 1. cyklus



Graf 25

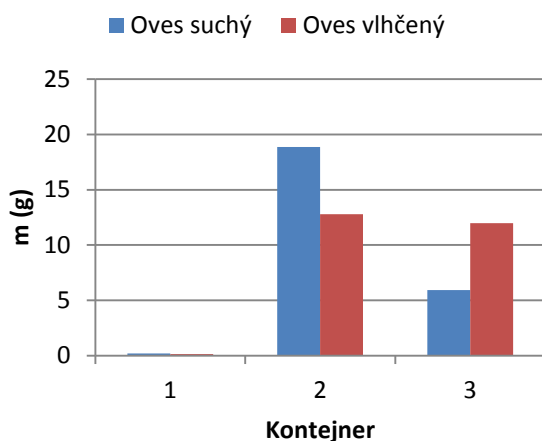
### 3. cyklus



Graf 26

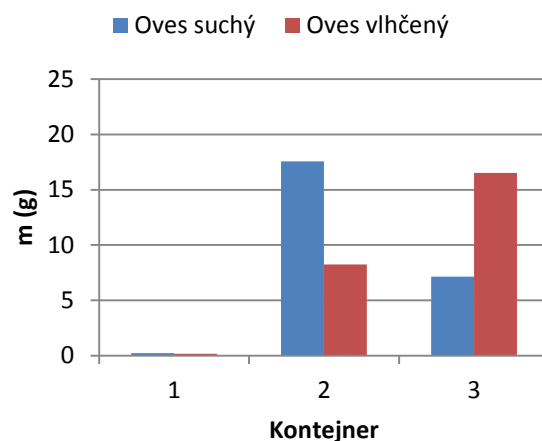
## Oves suchý a vlhčený

### 1. cyklus



Graf 27

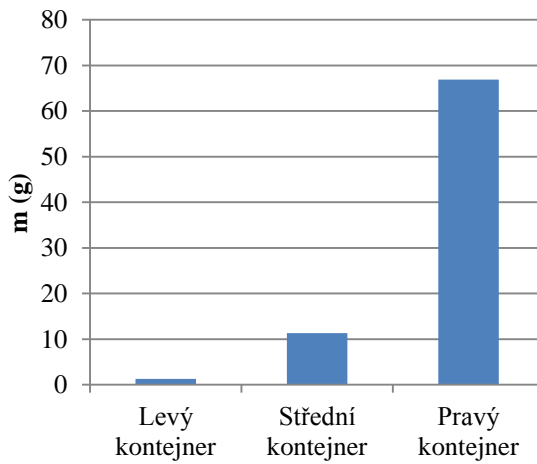
### 3. cyklus



Graf 28

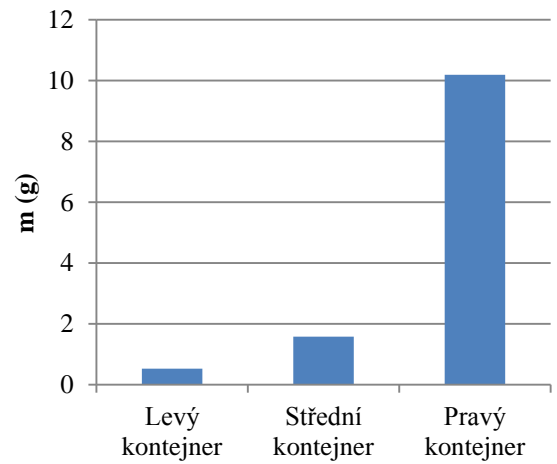
**Grafy free-fall separátor**

**Pšenice**



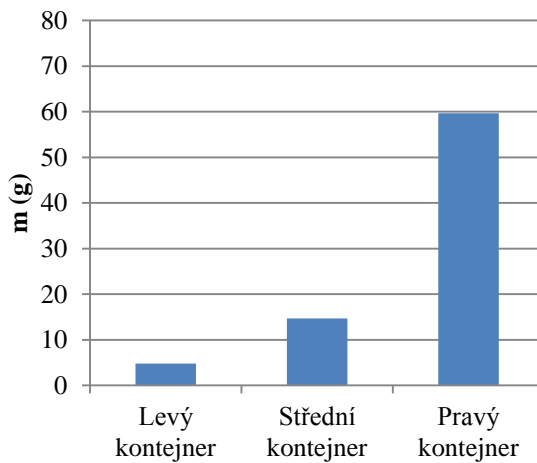
**Graf 29**

**Plevy pšenice**



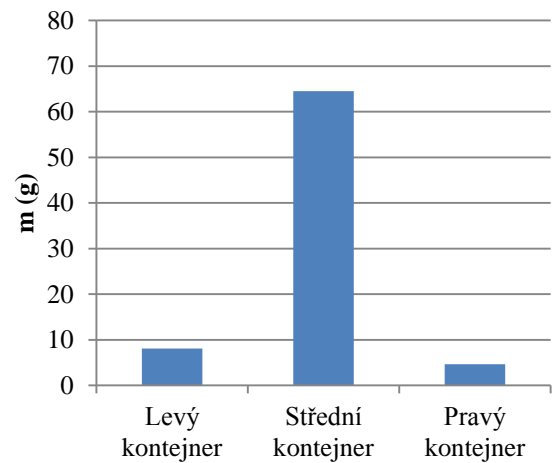
**Graf 30**

**Oves loupaný**



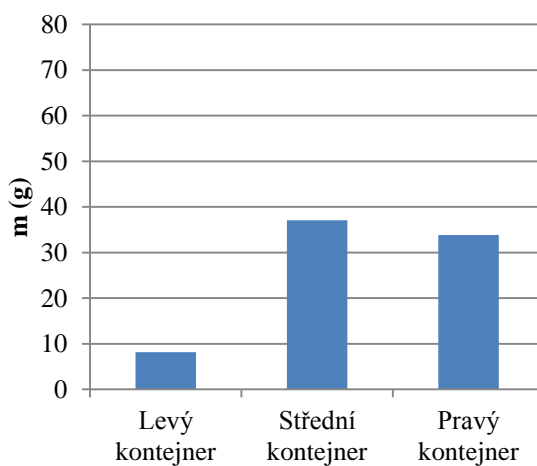
**Graf 31**

**Oves neloupaný**



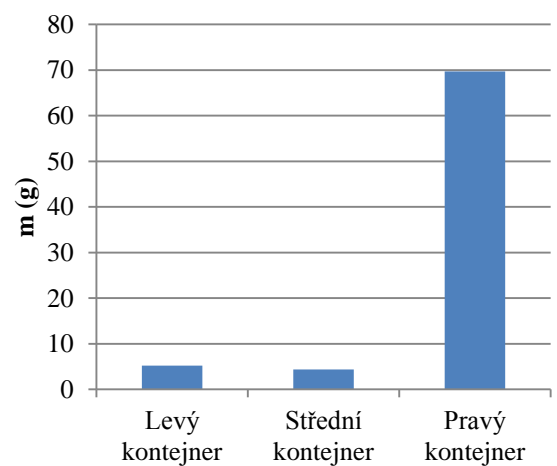
**Graf 32**

**Řepka olejka**



**Graf 33**

**Merlík čilský**



**Graf 34**

### Semena rostli použítá při experimentech



Obr. 33 Ječmen setý



Obr. 34 Oves setý loupáný



Obr. 35 Oves setý neloupáný



Obr. 36 Plevy pšenice



Obr. 37 Pšenice setá



Obr. 38 Merlík čilský



Obr. 39 Řepka olejka



Obr. 40 Semena trav



Obr. 41 Oves vlhčený



Obr. 42 Zlomky zrn pšenice



Obr. 43 Žito seté



Obr. 44 Reálné nečistoty - pšenice





**Obr. 45** Reálné nečistoty - žito



**Obr. 46** Reálné zlomky zrn - pšenice