

**Oponentní posudek  
na disertační práci  
Ing. Jana Kacerovského**

Předložená disertační práce má charakter výstupu aplikačního výzkumu. Je rozdělena do 8 kapitol. V úvodu je zdůvodněna potřeba vývoje separátorů různých typů. V dnešní době, kdy je svět doslova zamořen plastovými odpady představuje ekologická likvidace skutečně aktuální problém. Součástí tohoto procesu je i separace dnes již obrovského množství různých druhů plastů. Při zadání klíčových slov separace nebo free-fall separátor do různých vyhledávačů, vrátí tyto skutečně velké množství odkazů. Před Ing. Kacerovským tedy stál úkol prostudovat stávající typy separátorů a posunout poznatky z této oblasti dál, především k jejich návrhu s využitím numerických metod řešení elektrostatického pole. Princip elektrické separace není neznámý, přínosem může být jak konkrétní návrh originálního typu separátoru, tak i, v tomto případě především, návrh metodiky výpočtu a optimalizace geometrických a elektrických parametrů zařízení tohoto typu.

Na základě těchto premis si autor stanovil cíle disertační práce, a to především definovat a numericky řešit matematický model elektrostatického pole a problém vychylování trajektorie elektricky nabitých plastových částic. Cíle jsou zřejmě ovlivněny praktickými požadavky projektu, který zastřešoval práci kolektivu FEL Plzeň na vývoji separátoru spolu s firmou Puruplast. Z toho logicky vyplývá i požadavek experimentálního ověření navrženého separátoru. Cíle souhrnně uvedené na straně 3 lze podle mne formálně redukovat do čtyř bodů.

Kapitola 3 je v podstatě rešerší současných poznatků o plastech a jejich separaci. Kapitola 4 si dává za úkol formulaci problému. Formulace problému z hlediska řešení elektrického pole zde má velké rezervy. O formulaci optimalizačního problému to platí ještě ve větší míře.

Kapitola 5 obsahuje několik všeobecně známých vztahů a vysvětlení matematických principů MKP, často bez poukázání na souvislosti s touto disertační prací. Podle mého názoru by se mělo jednat o stěženi část práce, velmi úzce svázanou s řešením konkrétních elektrostatických okrajových problémů navrhovaných separátorů. Z popisu numerického řešení separátorů není zřejmé, zda jde pouze o aplikační použití software nebo autor sám zasáhl např. do programu Agros2D. Není tedy zřejmé, zda se jednalo o rutinní využití těchto programů nebo se jedná i o autorův přínos do rozvíjení výpočetních programů, které v této kapitole popisuje.

Nejdelší kapitola 6 obsahuje výsledky konkrétního návrhu jednostupňového separátoru. Je zde popsán jeho tvar a rozložení elektrického pole. Kapitola obsahuje i popis experimentálního ověření separátoru a tabulky účinnosti a čistoty separace. Náplň kapitoly 7 je podobná, týká se ale dvoustupňového separátoru. Opět se jedná o aplikační záležitost s minimem matematických úvah.

*a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor*

Disertační práce nijak výrazně neobohacuje teoretické poznatky z oboru teoretická elektrotechnika ani oboru energetika. Spíše než o jejich rozvinutí se jedná o aplikaci výpočetních programů v oblasti elektrostatiky. Pokud se jedná o problematiku třídění

dielektrických materiálů, nepřináší disertační práce žádné překvapivé závěry, závislosti účinnosti separace na změně různých parametrů se zhruba dají předpokládat. Autor tyto předpoklady v disertační práci verifikuje.

*b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle*

Některé jevy by zasluhovaly podrobnější upřesnění, jedná se například o tyto problémy: jak je zajištěno rovnoměrné nabití všech částic v nabíječi (13<sub>10</sub>), jak se projeví případné nerovnoměrnosti v jejich nabíjení, kolik částic může být nabíjeno současně, tj. jaký objem nabíječe může být zaplněn za jednotku času (120 sec), je nabíječ plněn po dávkách nebo kontinuálně, je hmotnost částic stejná – jaký to může mít vliv na separaci. Způsob optimalizace a volby tvaru separátoru před optimalizací by také zasluhoval podrobnější rozbor, stejně jako konkrétní způsob aplikace optimalizačních metod. Postrádám podrobnější srovnání různých typů separátorů na základě konkrétních srovnatelných vybraných parametrů.

Zmínku by zasloužil také způsob vyřešení bezpečnosti práce se separátorem (až 45 kV).

*c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce*

Praktický výpočet a návrh separátorů, včetně jejich experimentálního ověření je dílem pana Ing. Kacerovského. Přínos autora v teoretických pasážích není zřejmý. Otázkou je, jak dalece se podílel na modifikaci programu Agros2D vzhledem k výpočtu parametrů separátorů. Uvítal bych konkrétnější popis úvah, které ho vedly k nastavení parametrů ve výpočetním programu. Autor ovšem prokázal především dobrou zručnost při použití těchto programů.

*d) Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce*

Formální úprava je na výborné úrovni. Práce je přehledná a dobře strukturovaná. Možná by bylo vhodné vložit kapitulu „Model elektrického pole“ na jiné místo. Odkaz [5] do seznamu literatury nepatří.

*e) Vyjádření k publikacím studenta*

V seznamu vlastní literatury je uvedeno 17 publikací, které svědčí o dostatečném prezentování problematiky řešené v disertační práci vědecké veřejnosti. Bohužel, pouze jedna z nich je uveřejněna v zahraničním časopisu s impact factorem. Podle údajů na Web of Science (3 položky) nebyla žádná z těchto publikací citována.

*Další připomínky:*

(4.1) a (4.2) není vysvětleno, jak se v praxi liší hodnoty  $m_c$  a  $m_k$  a čím je způsoben jejich rozdíl

14<sub>11</sub> „... představuje poměrně komplikovaný optimalizační problém...“ zasloužil by si tedy podrobnější popis

14<sub>3</sub> překlep ...“částic a zdrojem napětí.“

20<sub>7</sub> chybí bližší popis, jak byla určena „dostatečná vzdálenost od zařízení“ pro Neumannovu podmínku



obr. 6.9 rozložení intenzity elektrického pole příliš nekoresponduje s obr. 6.10, podobné je to u obr. 7.7 a 7.8; u obr. 6.10 doporučuji orientovat osy v souladu se šipkou v obr. 6.9

obr. 6.12 prosím o podrobnější komentář při prezentaci

tab. 6.1 podobná tabulka by měla být provedena pro částice náležející do dalších košů

*Otázky k obhajobě:*

Na str. 10<sub>11</sub> píšete: „ ... získají vodivé částice elektrostatickou indukci náboj opačné polarity...“ na str. 11<sub>9</sub> „... jsou nabity na základě vodivostní indukce...“. Prosím, upřesněte fyzikálně tyto jevy z hlediska existence a přemísťování nábojů v systému.

Lze využít průběhy z obr. 6.10 a 7.8 k posouzení rozdílu mezi funkčním použitím obou typů separátoru?

*f) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě*

Autor pan Ing. Jan Kacerovský v této disertační práci dokázal, že se na potřebné úrovni orientuje ve vědním oboru teoretická elektrotechnika. Je schopen vytěžit z dostupné literatury patřičné podklady pro další využití ve vědecké práci. Tato disertační práce je zaměřena především na praktické využití elektrostatických jevů a podle mého názoru by teoretické pasáže měly tyto praktické závěry více podporovat. Po přečtení disertační práce jsem přesvědčen, že se její autor orientuje i v teoretické části výpočtu elektrických polí, přestože se zde zaměřil především na praktickou aplikaci. Byl bych rád, aby mu bylo umožněno zabývat se při prezentování disertační práce teoretickými východisky návrhu separátoru do větší hloubky a proto

**doporučuji**

tuto disertační práci k obhajobě.



Doc. Ing. Lubomír Ivánek, CSc.

Oponentský posudek na disertační práci Ing. Jana Kacerovského:

### **Elektrostatický separátor plastových materiálů**

Oponentský posudek je vypracován dle pokynů v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. a čl. 107 odst. 1 a 2 Studijního a zkušebního řádu ZČU.

Autor se v práci zabývá elektrostatickou separací směsného průmyslového plastového odpadu. Přestože princip elektrostatické separace byl popsán již v 19. století, může aktuálně najít nová průmyslová uplatnění. Zároveň některé fyzikální procesy nebyly doposud zcela vysvětleny a popsány (např. jev triboelektrického nabíjení). Autor k problematice přistupuje s využitím soudobých metod vědecké práce (návrh zařízení na základě počítačových simulací s využitím metody konečných prvků, následné zpřesnění modelu, reverzní identifikace klíčových fyzikálních parametrů konfrontací výsledků experimentů a simulací), čímž posunuje hranice současného stavu poznání v oblasti elektrostatické separace materiálů. Práce je významným přínosem pro obor teoretická elektrotechnika, jelikož skloubením simulací a experimentů s praktickým a ekonomicky přínosným uplatněním poukazuje na užitečnost a možnou budoucnost tohoto oboru.

Práce popisuje detailní model elektrostatické separace volně padajících částic, modelované procesy jsou zároveň experimentálně ověřeny. Výsledky práce lze využít jako určitý návod, jak vhodně nastavit proces (uspořádání elektrod, vstupní napětí, velikost a rychlost částic, okolní podmínky jako teplota a vlhkost atd.) tak, aby bylo možné elektrostaticky separovat konkrétní směsi plastů. Hlavní přínos předkladatele práce je zřejmý a má podstatný dopad pro využití průmyslovou praxí. V práci zdokumentované experimenty a simulace mohou zároveň napomoci k lepšímu pochopení podstaty triboelektrického jevu.

Autor matematicky modeluje proces vychylování částic ve 2D. Vzhledem ke geometrii uvažovaného separátoru a fyzikálním jevům, které jsou simulovány, považují použití 2D modelu za postačující, autor zároveň publikuje velmi dobrou shodu modelů s provedenými experimenty. Dalším vhodným krokem do problematiky by nicméně mohl být 3D model pro studium chování částic v třetí rozměru a jeho konfrontace s experimentálními daty.

Formální úprava práce je nadprůměrná, kapitoly jsou členěny přehledně a logicky, jednotlivé pasáže jsou vhodně doplněny vypovídající obrazovou dokumentací, provedené experimenty jsou zdokumentovány řadou fotografií. Drobnou výhradu mám ke kapitole 5.2, kterou považuji za zbytečně rozsáhlou, teorii numerických řešičů lze dohledat v literatuře, zde by stačilo ocitovat a zdůraznit návaznost na řešený problém. Vzhledem k tomu, že práce vznikla na pracovišti teoretická elektrotechnika, nicméně zařazení kapitoly chápou.

Autor se v průběhu doktorského studia podílel na vzniku 17 výstupů VaV včetně publikace článku v impaktovaném časopise a realizace funkčního vzorku. U 11 z těchto výsledků je Ing. Kacerovský hlavním autorem a publikuje v úzkém kolektivu (výsledky mají 1 až 5 autorů), což poukazuje na zřejmý přímý podíl autora na těchto výsledcích. Publikáční činnost autora považuji za nadstandardní.

**Disertační práci Ing. Jana Kacerovského doporučuji k obhajobě.**

V rámci obhajoby doporučuji v případě dostatku času následující otázky/témata k diskusi:

- Proč jste pro numerické řešení pohybu částic zvolil právě metodu Runge-Kutta-Fehlberg a ne metody Runge-Kutta-Cash-Karp nebo Runge-Kutta-Dormand-Prince, jak zmiňujete na s. 18?

- Jak konkrétně byly výsledky počítačové simulace využity pro konstrukci experimentálního zařízení?
- Jak byl při experimentech zjišťován střední průměr částic? Jak je možné v praxi definovat střední poměr částic v separované drti?
- Jak doba nabíjení částic ovlivňovala výsledky experimentů a proč byla stanovena zrovna na 120 s, jak uvádíte na s. 46?
- Použitá kamera vysokorychlostní kamera Basler umožňuje pouze černobílý záznam. Jak jste z černobílých fotografií (např. s. 46, obr. 6.16) poznal, které částice patří kterému plastu?
- Uvádíte, že při experimentu byl 1 g směsi ztracen (s. 47). Upřesněte. Má tento 1 g vliv na naměřené hodnoty čistoty a účinnosti?
- Na s. 47 píšete, že vlhkost okolního prostředí během studie vlivu vlhkosti na účinnost a čistotu separace byla uměle navyšována. Jak k tomu přesně docházelo?
- Při experimentech se měnila rychlost nabíjecí trubky (300 ot./min a 100 ot./min), poté 200 ot./min, jaký jste měl důvod a jak rychlost nabíjení ovlivňovala výsledky experimentů?
- Při simulacích a prvotních experimentech byly elektrody napájeny napětím 20 kV s konstatováním (s. 48), že je toto relativně nízké napětí dostatečné. Následně byly některé experimenty prováděny s napětím 45 kV (např. s. 57). Jaký byl důvod?
- Na s. 56 jste určil kritickou rychlost  $v_{\text{crit}} = 2.5 \text{ m/s}$  Vašimi slovy „podrobnou analýzou“. Přibližte prosím použitý postup.
- Využití kaskádní separace vedlo ke zvýšení čistoty výsledných separátů a v některých případech k poklesu účinnosti separace. Kdy je pro konečného uživatele důležitější čistota výsledného produktu a kdy účinnost separačního procesu?

V Plzni, 15.11.2018

Petr Polcar





**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**

**ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA**  
KATEDRA TEORETICKEJ ELEKTROTECHNIKY A  
BIOMEDICÍNSKEHO INŽINIERSTVA  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina



## **POSUDOK**

**na doktorandskú dizertačnú prácu:**

**Ing. Jan Kacerovský**

**„ELEKTROSTATICKÝ SEPARÁTOR PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ“**

**odbor: „Elektrotechnika“**

**školiteľ: prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D., KTE, FEL, ZČU Plzeň**

### **Aktuálnosť zvolenej témy**

Predložená dizertačná práca pojednáva o **mimoriadne aktuálnej** problematike, ktorá má priamy súvis s plastovým hospodárstvom a recykláciou plastových materiálov.

Autor sa v práci zameria na numerické modelovanie, návrh, realizáciu a overenie charakteristík elektrostatického separátora plastových materiálov, v dvoch vyhotoveniach. Pre naplnenie stanovených cieľov práce autor využíva inovatívne prístupy spočívajúce v implementácii numerického riešenia a následného testovania na reálnom prototypu, v súčinnosti so spätnou optimalizáciou navrhnutého prototypu. V práci sú uvedené teoretické východiská pre samotné riešenie definovaného problému, jedinečná praktická realizácia, nasledovaná verifikáciou s využitím pokročilých numerických simulačných metód. Predkladateľ práce preukázal, že ovláda princípy tvorivej vedeckej práce. Téma práce je nosná a z hľadiska použitých metód a postupov **jednoznačne prínosná** pre odbor, vedu a najmä prax.

### **Splnenie cieľov dizertačnej práce**

Na str. 2 autor uvádza blokovo a následne na str. 3 explicitne, čiastkové ciele práce, ich celkový počet je 8. Jednotlivé ciele práce možno považovať za **splnené, bez výhrad**. Vzhľadom na tieto ciele možno konštatovať, že autor použil správny prístup aj metódy, ku riešeniu uvedeného problému.

### **Metódy spracovania, formálna a jazyková úprava práce**

Práca je napísaná v českom jazyku, na 75-tich stranách a je rozdelená do 8 kapitol. Autor čerpal zo 60-tich literárnych zdrojov, pričom uvádza vlastné publikácie v časopisoch a zborníkoch z medzinárodných konferencií v počte 10 (súvisiacich s odborom dizertácie, kde je prvenstvo autora = 7 publikácií) a 7 ostatných publikácií. Zároveň, jedna publikácia je uvedená v časopise s IF = 0.989, tzn. zákonná podmienka je splnená. Rozdelenie práce je logické a dobre štruktúrované. Práca pôsobí veľmi dobrou vyjadrovacou a prezentačnou formou, aj v pomerne náročných teoretických pasážach. Jej prehľadnosť zvyšuje uvedený zoznam symbolov a skratiek a register fyzikálnych veličín.

V úvodnej časti práca oboznamuje čitateľa s problematikou súčasného stavu, týkajúceho sa plastového hospodárstva, spôsobov triedenia a následnej recyklácie plastov, v tesnom spojení s problematikou elektrostatických separátorov.

Formulácia problému je náplňou samostatnej kapitoly 4, i keď táto je predložená iba na dvoch stranách. Obsahom nasledujúcej kapitoly 5 je matematický model úlohy a jeho numerické riešenie. Kapitoly 6 a 7 predkladajú, komplexne: návrh, realizáciu a dosiahnuté výsledky jednostupňového a dvojstupňového elektrostatického free-fall separátora, jednotlivo. Po záverečnej kapitole 8, sú v práci uvedené zoznamy literatúry a publikácií, bez prílohovej časti. Za **ťažiskové** považujem kapitoly 5 ~ 7, nakoľko prezentujú jedinečné vlastné dosiahnuté výsledky vedeckej práce počas doktorandského štúdia.

### **Pripomienky k práci**

Odporúčam v práci uvádzať odbor dizertácie ako aj jej názov, na predných doskách.

V práci sa na veľmi málo miestach vyskytujú malé formálne nedostatky, resp. nevhodné formulácie, konkrétne:

- str. 20, str. 38, str.65: „Jedna elektroda je uzemněna a na druhé elektrodě je napětí  $\varphi = 20\text{kV}$ .“
- str. 21 Obr. 5.5 na obrázku je rozloženie el. skalárneho potenciálu, ale v popise grafu sa uvádza  $V$  [V], str. 40, obr. 6.8 detto, str. 67, obr. 7.6 detto.
- str. 23 – „zbavení se tedy druhé derivace“
- kapitola 4 – „Formulace problému“, vhodnejšie by bolo ju pridružiť na úvod nasledujúcej kapitoly.
- Str. 51, obr. 6.20 a pod.: v grafoch je potrebné uvádzať získané funkčné hodnoty, použité pre vykreslenie výsledných kriviek. Čitateľ potom získa predstavu, z koľkých



hodnôt bol graf skonštruovaný a teda do akej miery je výsledná grafická interpretácia „vyhladená“ a pod.

- V celej práci by bolo vhodné zjednotiť oddeľovače desatinných miest. Zároveň, v takomto type práce by som uvítal uvádzanie príslušných hodnôt veličín pomocou exponentov. (Např. str. 41, obr. 6.10, vertikálna os , str. 55, obr. 6.24 – hodnoty nábojov a pod.)

### **Výsledky dizertačnej práce, význam pre vedu a ďalší rozvoj**

Predložená dizertačná práca jednoznačne prináša nové výsledky a poznatky, ako dôsledok tvorivej vedeckej práce autora. Konkrétne sa jedná o opis a riešenie problému úlohy, vrátane matematického riešenia, s využitím výpočtového potenciálu vyvíjaného softvérového prostriedku Agros2D, ktorý umožňuje riešenie takéhoto druhu úloh. (Podľa môjho názoru použitý softvér vysoko prevyšuje možnosti súčasných porovnateľných komerčných produktov na trhu). V praktickej časti autor realizoval funkčné modely ELS separátora a výsledky meraní porovnal so simulovanými údajmi, pričom dosiahol veľmi dobrú koreláciu výsledkov. Zároveň výsledné hodnoty čistoty separácie, účinnosti procesu atď. sú veľmi sľubné, pre praktické zaradenie realizovaných prototypov do prevádzky. Autor ďalej skúmal vplyv teploty a vlhkosti ako vstupných premenných pre kvalitu separačného procesu. Závery celého riešenia tejto práce považujem za veľmi zaujímavé (najmä pre komerčné účely) a aj napriek „zdanlivo jednoduchému“ teoretickému pozadiu takejto aplikácie ELS poľa je vidieť, že z praktického hľadiska sú hodnotné výsledky vyvážené dlhodobým skúmaním a tvorivou prácou.

Praktický význam tejto práce je preto jednoznačný a priamo vyplýva z uskutočnenej práce autora. Dosiahnuté výsledky a poznatky možno považovať za vlastné a na ich základe možno pokračovať v ďalších témach rozvíjajúcich túto dizertačnú prácu nielen na poli elektrotechniky, ale aj ďalších odvetví priemyslu.

### **Otázky do diskusie, na ktoré prosím reagovať**

1. Akým spôsobom bolo generované VN pre účel vytvorenia ELS poľa v separačnej komore? (komerčný zdroj, vlastná realizácia, Delonov násobič?)
2. Na základe akých predpokladov bola zvolená hodnota el. napätia pre vytvorenie ELS poľa práve s danou hodnotou  $U = 20$  kV? Bola zároveň diskutovaná otázka el. bezpečnosti pri prevádzke separátora?
3. Riešil autor algoritmizáciu procesu separovania: (použitie mikrokontroléra pre riadenie a snímanie konkrétnych veličín separátora. Např. v prípade zlyhania ohrevu nabíjacej trubky, zastavenie procesu dávkovania a pod.). V prípade použitia on-line



snímania procesu triedenia pomocou vysokorýchlostnej kamery, je možné spätňoväzobne upravovať vstupné parametre procesu riadenia, pre real-time korekciu čistoty a účinnosti procesu?

4. Aká je „pripustnosť“ realizovaných separátorov, z hľadiska množstva roztriediteľného materiálu za časovú jednotku (v závislosti od typu triedeného materiálu) ?
5. Bol pri numerických simuláciách rozloženia ELS poľa bráný do úvahy iba prípad s lineárnym prostredím medzi elektródami? Je potrebné v praxi uvažovať aj prítomnosť reálneho zastúpenia rôznych typov prvkov v ovzduší, s ohľadom na možný vznik nelinearit a potenciálne ovplyvnenie procesu separovania.

### Záver

Predložená dizertačná práca spĺňa podmienky samostatnej tvorivej vedeckej práce a obsahuje pôvodné, autorom publikované výsledky. Z tohto dôvodu ju **odporúčam k obhajobe**. V súlade s platnými ustanoveniami navrhujem, aby po úspešnej obhajobe bola **Ing. Janovi Kacerovskému** v odbore „**elektrotechnika**“ udelená akademická hodnosť

**„philosophiae doctor“ /Ph. D./**

V Žiline 23.11.2018



.....  
doc. Ing. Milan Smetana, PhD.