

## THÈSE



Pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS UFR des sciences fondamentales et appliquées Pôle poitevin de recherche pour l'ingénieur en mécanique, matériaux et énergétique - PPRIMME (Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

École doctorale : Sciences et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique -SIMMEA (Poitiers) Secteur de recherche : Génie électrique

Cotutelle : Universitatea tehnica (Cluj-Napoca, Roumanie)

Présentée par : Mihai Alexandru Bilici

## Séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaires dans des dispositifs à lit fluidisés

Directeur(s) de Thèse : Lucian Dascalescu, Adrian Samuila

Soutenue le 16 décembre 2013 devant le jury

#### <u>Jury :</u>

Président	Florin Ciuprina	Profesor, Universitatea politehnica din București	
Rapporteur	Florin Ciuprina Profesor, Universitatea politehnica din Bucureși		
Rapporteur	Petru Notingher	etru Notingher Professeur des Universités, Université de Montpelli	
Membre	Lucian Dascalescu	Professeur des Université, Université de Poitiers	
Membre	Adrian Samuila	Profesor, Universitatea tehnica din Cluj-Napoca	

#### Pour citer cette thèse :

Mihai Alexandru Bilici. Séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaires dans des dispositifs à lit fluidisés [En ligne]. Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2013. Disponible sur Internet <a href="http://theses.univ-poitiers.fr">http://theses.univ-poitiers.fr</a>

### THESE

en cotutelle Pour l'obtention du Grade de

## Docteur de l'Université de Poitiers

(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées Ecole doctorale : « Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique »

et de Doctor al Universității Tehnice din Cluj-Napoca Facultatea de Inginerie Electrică

> Spécialité Génie électrique

Présentée par

### Mihai Alexandru BILICI

## Séparation électrostatique des mélanges

## de matériaux granulaires dans des dispositifs à lit fluidisé

Soutenance prévue le 16 décembre 2013

#### Co-directeurs de Thése: Lucien DASCALESCU et Adrian SAMUILA

#### <u>JURY</u>

Petru NOTINGHER	Professeur à l'Université Montpellier II
Florin CIUPRINA	Professeur à l'Université "Politehnica" Bucarest

#### **Examinateurs:**

**Rapporteurs**:

Lucien DASCALESCU	Professeur à l'Université de Poitiers
Adrian SAMUILA	Professeur à l'Université Technique de Cluj-Napoca

dedic această lucrare parinților mei

"this is the best party I've been to" Mike Patton

#### MULŢUMIRI

Ultimii trei ani au insemnat pentru mine un singur lucru: teza de doctorat. Fie că trebuie să muncesc, fie că nu am muncit suficient, teza a fost o preocupare perpetuă și câteodată stresantă. De fiecare dată când am avut vreo problemă sau m-am simțit nesigur, am găsit o rezervă interminabilă în oamenii din jurul meu, care mi-au oferit ajutorul necondiționat. Sper că intr-o bună zi să întorc ceea ce am primit.

In primul rând doresc să mulțumesc d-lui profesor Adrian Samuilă, coordonatorul acestei teze, pentru tot. Nu pot decât să mă bucur că a avut răbdare cu mine și că mi-a oferit posibilitatea unei relații cum majoritatea tezarilor îsi doresc: transparenta, nepretențioasă, sigură.

Domnului profesor Lucian Dăscălescu îi sunt recunoscător pentru indrumarea mea pe drumul cercetării, cu eleganță și dăruire. Mi-a fost alături în toate inițiativele în care i-am cerut sfatul și de multe ori, dintr-o idee bună pe care am complicat-o rapid, a extras esența mia pus-o în față, de-a gata. Am simțit în acele momente intoarcerea la principiu, sublim în simplitatea lui.

Profesorului Alexandru Iuga îi ofer alese mulțumiri pentru toate lucrurile pe care leam invățat de la dânsul pe parcursul acestor ani. Am descoperit cu uimire și cu bucurie o persoană nonconformistă și unică, un profesor pe care toți si-ar dori să-l aibă, un exemplu de modestie și umanitate, pe care îmi doresc să-l urmez.

In continuare le mulțumesc tuturor colegilor din colectivul LCEI, în special domnișoarei Gabriela Buda și domnului tehnician Pentru Costel, cu care am lucrat cot la cot în multe ocazii.

Doresc să mulțumesc colegilor Tamás György, Vasile Barna, Silviu Corneștean, Vasile Ilieș și Mohamed Miloudi, care m-au ajutat direct în munca de laborator și fără de ajutorul cărora teza ar fi fost mai săracă.

In cele din urmă, sunt recunoscător tuturor celor care mi-au făcut șederea în Angouleme mai frumoasă și mai ușoară: Ramonei Dragomir și lui Aurelian Fătu - care m-au ajutat oricind am avut nevoie; soților Billard, din cauza cărora casa de pe boulevard d'Aquitaine a insemnat acasă în Franța; trupei de la București, în special lui Marius Plopeanu, Danielei Coblaș și lui Nicușor Călinoiu; Gretei și Mirabelei Popescu, care ne-au descrețit frunțile și alături de care am rîs cu poftă în orele (uneori prea) lungi din laborator.

#### Introducere

1.	Stadiul actual al cercetării în domeniul separării triboelectrostatice	. 13
	1.1. Tehnologii de separare a amestecurilor granulare provenite din deșeurile	de
	echipamente electrice și electronice	. 13
	1.1.1.Separarea electrostatică în fluxul tehnologic de recuperare a DEEE	. 13
	1.1.2. Tehnologia de separare triboelectrostatică. Separatoare	. 17
	1.2. Patul fluidizat în tehnologiile de separare tribo-aero-electrostatice	. 24
	1.2.1.Noțiuni fundamentale	. 24
	1.2.2. Patul fluidizat în dispozitive triboelectrostatice	. 26
	1.2.3.Separatoare triboelectrice cu pat fluidizat	. 28
	1.3. Principii de măsură și achiziție de date în studiul proceselor electrostatice	. 29
2.	Caracterizarea proceselor de triboelectrizare și separare electrostatică pe un separator pat fluidizat 2.1. Standul experimental pentru modelarea proceselor de separare tribo-ac	r cu . 35 ero-
	electrostatice	. 35
	2.1.1.Principiul de funcționare și construcție	. 35
	2.1.2. Sistemul de achiziție de date	. 38
	2.1.3. Metoda planificării active a experiențelor	. 42
	2.2. Funcționarea în regim intermitent	. 45
	2.2.1.Experiențe preliminare	. 46
	2.2.2. Caracterizarea procesului de separare	. 48
	2.3. Funcționarea în regim continuu	. 53
	2.3.1.Experiențe preliminare	. 53
	2.3.2. Modelarea procesului de separare cu metoda planificării	
	active a experiențelor	. 55
	2.3.3.Caracterizarea procesului de separare	. 58
3.	Analiza regimurilor de funcționare ale separatorului tribo-aero-electrostatic p	pre-
	11100501a1.	. 03 61
	3.1. Separatorui unoo-aero-eleculostalic pre-industrial cu eleculozi piaca paraleli	. 04
	2.1.2 Europiente în vedence etabilinii influentei diferitiler festeri	. UJ 17
	5.1.2. Experience in venerea stability influences diferiçilor factori	. / 1

	3	3.1.3. Modelarea procesului de separare prin planificarea activă a experiențe	elor 86
	3.2.	Separatorul tribo-aero-electrostatic pre-industrial cu electrozi bandă	
	3	3.2.1.Principiul de funcționare și construcție	
	3	3.2.2. Rezultate experimentale	
	3.3.	Funcționarea automată a separatorului prin reglarea în buclă inchisă	
4.	Se	parator triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori	
	4.1.	Standul experimental	100
	4	4.1.1.Principiul de funcționare și construcție	101
	4	4.1.2. Sistemul de alimentare cu aer	107
	4.2.	Regimul de funcționare cu colectarea fracției de mixt	114
	4	4.2.1. Modelarea procesului de separare prin metoda planificării	
		active a experiențelor	
	4	4.2.2. Factori de influență asupra procesului de separare	
	4	4.2.3. Măsurări în timp real	

Concluzii

Bibliografie

Anexe

#### INTRODUCERE

In ultimii ani, pe fondul epuizării resurselor energetice și de materii prime, a acumulării de cantități semnificative de <u>d</u>eșeuri de <u>e</u>chipamente <u>e</u>lectrice și <u>e</u>lectronice (DEEE), tendința mai multor state a fost de a impune o legislație care să stimuleze recuperarea materialelor reciclabile. Directiva 2002/96/EC a Consiliului European, devenită lege în UE în februarie 2003 impune reciclarea și recuperarea tuturor tipurilor de bunuri electrice și electronice cu o rată de minim 4 kg / an pe cap de locuitor și obligă fabricanții la utilizarea unui procent de material recuperat în construirea noilor echipamente, având obiectivul de a recicla 85 % din deșeuri până în 2016 [4].

În acest context, industria de reciclare este interesată de a valoriza toată gama de materiale provenite din aceste deșeuri. Metodele actuale de recuperare sunt variate și de diferite grade de complexitate sau automatizare. Separarea corona-electrostatică este utilizată de multe firme de reciclare pentru recuperarea fracției conductoare (cupru și aluminiu) din DEEE, în timp ce tehnologia triboelectrostatica se dinstinge prin posibilitatea de a separa amestecuri de diferite tipuri de materiale plastice din componența DEEE. Avantajele metodelor de separare electrostatică constau în caracterul ne-poluant, slab consumator de energie, fiabilitate ridicată, construcție simplă și costuri reduse de întreținere.

Recuperarea materialelor plastice din DEEE prin procedee triboelectrostatice este în atenția a mai multor laboratoare de cercetare de pe mapamond. Cercetări aprofundate asupra încărcării granulelor cu sarcină, utilizării diferitelor dispozitive de triboelectrizare și a separării în câmp electric intens au fost realizate cu precădere în sînul laboratoarelor din Germania, Franța, SUA, Japonia, China.

Echipa Laboratorului de Câmpuri Electrice Intense (LCEI) a Universității Tehnice din Cluj-Napoca, în colaborare cu Echipa Electrostatică Aplicată din cadrul Institutului Pprime, Franța, a inițiat primele studii în acest domeniu de mai bine de 10 ani, colaborând cu diferiți parteneri publici sau privați, realizând studii de fezabilitate, punând la punct metode de separare noi și construind instalații de laborator și pilot de separare.

Teza are ca principale **obiective** îmbunătățirea metodelor de separare triboelectrostatica care utilizează dispozitive cu pat fluidizat și realizarea unor soluții viabile de noi procedee de separare triboelectrostatica pentru diferite aplicații, care să poată fi ușor

extinse de la nivel de laborator la scară industrială. Abordarea acestor obiective se face prin modelarea și caracterizarea proceselor de separare utilizând metode experimentale de investigație și prin utilizarea pe scară largă a sistemelor de achiziție de date pentru controlul în timp real al parametrilor procesului de separare triboelectrostatică.

În **capitolul 1** sunt trecute în revistă principalele tehnologii de separare folosite în recuperarea materialelor plastice provenite din DEEE, sunt descrise echipamentele specifice de triboelectrizare și separare triboelectrostatica în pat fluidizat și sunt prezentate principiile ce stau la baza măsurării sarcinii electrice și a achiziției de date. Cunoașterea stadiului actual al cercetării în domeniul separării triboelectrostatice permite încadrarea tezei în contextul științific internațional și punerea în evidență a problemelor dificile cu care se confruntă separarea triboelectrostatica a amestecurilor de materiale plastice granulare provenite din DEEE.

**Capitolul 2** prezintă construcția și funcționarea unui separator triboelectrostatic de capacitate redusă conceput și realizat în laborator. Dezvoltarea unui sistem de achiziție simultană a masei și a sarcinii granulelor a făcut posibilă realizarea unei game noi de experiențe care, împreună cu metoda planificării active a experiențelor, descriu în profunzime procesul de separare. Dimensiunile mici, modularitatea și ușurința cu care se manipulează au făcut din această instalație o adevărată rampă de lansare în studiul procesului de separare ce folosește patul fluidizat că dispozitiv de încărcare cu sarcină electrică, în aceeași incintă în care, prin intermediul forțelor exercitate de câmpul electric intens asupra granulelor electrizate, se face și separarea.

Rezultatele bune obținute cu separatorul de capacitate redusă au condus la ideea construirii unui separator de capacitate mare, pilot, numit separator tribo-aero-electrostatic pre-industrial, prezentat în **capitolul 3**. S-au pus la punct două configurații constructive pentru acest separator, în care metoda de extracție a materialului electrizat este diferită: prima cu electrozi placă paraleli (realizarea la scară industrială a separatorului de laborator), iar a doua cu electrozi bandă înclinați. Studiul separării realizat cu ajutorul metodelor de investigație din capitolul 2 indică un proces robust, care poate funcționa în buclă închisă sau deschisă. S-au făcut demersuri în acest sens prin dotarea separatorului cu echipamente de comandă și automatizare.

Limitările funcționale ale acestui tip de separator unde materialul granular nu poate iesi din incinta de separare decât ca fracție separată, dar și problemele constructive dificil de rezolvat în configurația cu benzi au dus la dezvoltarea unui separator nou. Acesta, desi păstrează același principiu de funcționare, aduce o serie de inovații importante: înlocuirea benzilor metalice alimentate la înaltă tensiune cu electrozi sector circular și cilindri rotitori din material dielectric, îmbunătățirea procesului de extragere a granulelor încărcate cu sarcină din incinta de triboelectrizare și o cameră de triboelectrizare deschisă pentru ca maerialul insuficient electrizat să poată părăsi camera de separare sub forma unei fracții "mixt" ce va fi reintrodusă în proces. Proiectarea, realizarea și studiul funcționării acestui separator fac obiectul **capitolului 4**.

Încărcarea selectivă cu sarcină electrică a amestecului granular prin triboelectrizare în pat fluidizat în aceeași incintă unde se face și separarea acestuia în prezența câmpului electric intens conduce la un procedeu eficient, flexibil și robust de separare a DEEE. Această idee, prezentată în detaliu și însoțită de constatările făcute în cazul fiecărui separator prezentat, împreună cu o recapitulare a contribuțiilor personale constituie ultimul capitol, cel al **concluziilor generale**.

## Capitolul 1. Stadiul actual al cercetării în domeniul separării triboelectrostatice

## 1.1. Tehnologii de separare a amestecurilor granulare provenite din deșeurile de echipamente electrice și electronice

Un flux tehnologic tipic de recuperare a materialelor (Fig. 1.1.) din deșeurile echipamentelor electrice și electronice (DEEE) cuprinde următoarele etape principale: dezasamblare/sortare, reducerea dimensională și separare. În prezent industria de reciclare utilizează o gama largă de tehnici, din cele mai variate, manuale sau automatizate.



Fig. 1.1. Principalele clase de materiale ce se recupereaza din DEEE [11].

Materialele plastice sunt o componentă principală a acestor deșeuri, reprezentind 22 % din masa totală a materialelor recuperate. O tehnologie de recuperare a materialelor plastice din DEEE cuprinde trei etape principale: reducerea volumului și purificarea, clasarea și separarea materialelor plastice și caracterizarea calitativă a materialelor separate.

## 1.1.1. Tehnologii de separare a amestecurilor granulare provenite din deșeurile de echipamente electrice și electronice

O tehnologie avansată de recuperare a materialelor din amestecurile granulare provenite din DEEE este separarea electrostatică. Din cauza caracterului ne-poluant, a consumului redus de energie, a costurilor reduse de întreținere și exploatare, aceasta s-a impus în ultima vreme în fața altor tehnologii convenționale de separare a materialelor mai costisitoare sau mai puțin eficace. Firme ce se ocupă cu producerea echipamentelor de recuperare a materialelor din DEEE precum Carpco (SUA), Hamos (Germania) sau Matsushita Electric (Japonia) recomandă introducerea în fluxurile tehnologice de recuperare a operațiilor de separare electrostatică [5, 9, 70, 71].

În cadrul fluxurilor tehnologice de recuperare a materialelor plastice, tehnologiile convenționale preced separarea electrostatică a amestecurilor granulare plastice (Fig. 1.2.) [69].



Fig. 1.2. Principalele operații ale unui flux tehnologic tipic de recuperare a materialelor plastice provenite din DEEE [10].

Prima etapă a fluxului tehnologic o reprezintă reducerea volumului și purificarea materialelor constituiente ale DEEE. Operațiile acestei etape sunt:

- clasarea *şi* dezmembrarea, care presupune sortarea pe tipuri de echipamente şi dezmembrarea părților componente mari (dintr-un singur material, care pot fi ușor demontate și adăugate direct la materialele recuperate) sau a componentelor periculoase sau toxice (baterii, tonere, componente ce conțin mercur, etc.). Această operație, în cazul unui reciclator specializat este deja efectuată când echipamentele iesite din uz intră în procesul de reciclare;
- reducerea dimensiunii deşeurilor, care se realizează prin procese mecanice de tăiere, măcinare, fragmentare sau granulare, cu scopul de a disocia complet materialele provenite din DEEE în vederea separării pe componente dintr-un singur material. Utilajele specifice folosite în această etapă sunt granulatoarele, care pot fi mori cu lanțuri, mori cu ciocane, tocătoare etc;

- separarea metalului de alte componente neconductoare realizată cu separatoare magnetice pentru recuperarea metalelor feroase și cu tehnologii pe bază de curenți turbionari sau cu separatoare electrostatice cu efect corona pentru recuperarea metalelor neferoase;
- despr*ă*fuirea, care se realiează cu tehnologii pneumatice în dispozitive de tip ciclon.

În urma primei etape s-au înlăturat componentele metalice, iar amestecul granular rezultat este alcătuit, în principal, din materiale plastice și sticlă.

A doua etapă este reprezentată de separarea materialelor plastice pe tipuri și conține operațiile următoare:

- *spălare, clătire şi* separare densimetrică, prin care se înlătură sticla şi se spală amestecul granular de mase plastice. Se utilizează diverse tehnologii de tip scufundare - plutire sau pe bază de flotație care sunt capabile să separe şi o parte din amestecul granular. Eficiența este însă scăzută deoarece majoritatea plasticelor au densitate apropiată, iar prețul este ridicat din cauza aditivilor necesari pentru separare;
- uscarea amestecului granular;
- separarea triboelectrostatică, ce utilizează tehnologii de separare bazate pe proprietățile diferite de încărcare cu sarcină electrică prin triboelectrizare ale materialelor plastice componente în amestecul granular (Fig. 1.3.) [34, 59, 62].
   Prin separarea în trepte a amestecului granular se pot recupera toate componentele amestecului granular.



Fig. 1.3. Tipuri de material plastic în componentele DEEE [1].

A treia etapă a fluxului este caracterizarea calitativă a materialelor separate, care se face prin operațiile de:

- identificare spectroscopică, pentru determinarea impurităților din materialul separat;
- caracterizarea fizică, cu scopul de a clasa materialele dupa culoare, rugozitate, formă etc.

Tehnologia bazată pe efectului corona (Fig. 1.4.) se folosește pentru separarea amestecurilor granulare de tip conductor - neconductor (de exemplu metale neferoase - plastic) [30, 37, 43, 103]. Amestecul granular este depus într-un strat monoparticula pe un cilindru rotitor metalic legat la pămînt și trece printr-o zonă de câmp electric cu sarcină spațială, generat de unul sau mai mulți electrozi corona alimentați la înaltă tensiune pozitivă sau negativă.



Fig. 1.4. Reprezentarea schematică a unui separator corona-electrostatic cu cilindru rotitor [30].

Supuse unui intens bombardament ionic, componentele amestecului granular se încarcă cu sarcină electrică de polaritatea electrodului corona. Din cauza conductivității ridicate, granulele conductoare în contact cu cilindrul rotitor legat la pămînt pierd sarcina electrică prin contactul cu cilindrul rotitor legat la pămînt mult mai repede decât granulele din material plastic.

Sub acțiunea forței centrifuge, forței de greutate și a forței câmpului electric generat între electrodul electrostatic și electrodul cilindric rotitor legat la pămînt, materialul conductor se desprinde de cilindu și este deviat spre un buncăr de colectare situat în partea dreaptă a axei electrodului cilindric. Sub acțiunea forței imagine electrică granulele din material plastic rămîn lipite de cilindru, se rotesc împreună cu acesta și apoi sunt desprinse de o perie, fiind colectate separat, într-un buncăr situat în partea stîngă a axei electrodului cilindric. Pentru desprinderea granulelor se poate folosi un electrod corona alimentat la înaltă tensiune alternativă, însă această metodă se folosește doar în aplicații speciale, din cauza costului suplimentar ce îl aduce o sursă de înaltă tensiune alternativă.

#### 1.1.2. Tehnologia de separare triboelectrostatică. Separatoare

#### Fenomenul de triboelectrizare

Când două corpuri sunt puse în contact și apoi se separă, acestea acumulează sarcini electrice de semn contrar sub efectul fenomenului de triboelectrizare. Desi fenomenul este cunoscut încă din antichitate, este greu de prezis polaritatea și valoarea sarcinii electrice, deoarece acestea depind de natura materialelor care se ciocnesc, temperatură, umiditate etc.

Încărcarea cu sarcină electrică prin contact este întîlnită în domenii diverse, cum ar fi: instalații de transport pneumatic [41, 48-50], separarea pudrelor și granulelor de natură organică [29, 39-40, 58], tratamentul mineralelor [87], vopsire electrostatică [51], fotocopiere [91], înlăturarea prafului [84], etc.

Pentru înțelegerea fenomenului de triboelectrizare s-au efectuat numeroase studii. Unele arată că transferul de sarcină electrică este un fenomen coerent [100], în timp ce alte studii încearcă să demonstreze că două materiale, în urma ciocnirii nu se încarcă negativ respectiv pozitiv, ci în zona contactului apare un mozaic de sarcini pozitive și negative de dimensiuni nanometrice [14-15].

Multiple încercări de a modela procese de triboelectrizare au fost efectuate, fie prin metode experimentale [80-83, 98], fie prin metode analitice [65-67], arătând legătura între forma granulelor și tipul de contact cu o suprafață plană. Lacks et al. arată că dintr-un amestec de granule de același tip, de dimensiuni diferite, granulele de dimensiune mai mare se încarcă preponderent pozitiv, iar cele de dimensiune mai mică negativ [53, 76, 97]. Importanță deosebită în procesul de încărcare cu sarcină o au și temperatura și umiditatea mediului

ambiant [13, 88], presiunea [92] sau prezența apei la suprafața granulelor sau în structura moleculară [28, 78].

#### Serii triboelectrice

Fenomenul de triboelectrizare a făcut obiectul a numeroase studii care au vizat caracterizarea capacității materialelor de a se încărca cu sarcină electrică în contact cu altele. Rezultatele acestor studii se exprimă sub forma sintetică a seriilor triboelectrice [27, 44, 89, 99, 101]. Două materiale dintr-o serie triboelectrică sunt ordonate astfel: cel plasat spre capătul pozitiv al seriei se încarcă cu sarcină pozitivă, cedând electroni sau ioni negativi, iar celălalt material, plasat spre capătul negativ al seriei, primește ionii negativi sau electronii și se încarcă negativ.

Distanța dintre două materiale într-o serie triboelectrica nu este întotdeauna proporțională cu valoarea sarcinii acumulate prin triboelectrizare. O poziție exactă este dificil de stabilit fie din cauza diferențelor subtile de sarcină transferată, fie din cauză că majoritatea materialelor conțin și alți compusi (de exemplu aditivi) care le schimbă comportarea în procesul de triboelectrizare [89]. S-au determinat experimental mai multe serii triboelectrice pentru cele mai uzuale materiale plastice (Fig 1.5.), unde se observă că pozițiile unor materiale se schimbă de la caz la caz.



Fig. 1.5. Serii triboelectrice experimentale cu principalele materiale plastice utilizate în EEE: Brown [27] a, Wei [99] b, Xiao [101] c, Dobdiba [44] d.

Cunoașterea poziției unui material în seria triboelectrica este importantă în la selectarea materialelor ce sunt utilizate în dispozitivele de triboelectrizare. Prin alegerea judicioasă a unui material plasat în serie între două materiale care trebuie separate, acesta contribuie la încărcarea mai puternică cu sarcină electrică a fiecărui material de separat. Dacă materialul dispozitivului de triboelectrizare este ales, de exemplu, înspre capătul negativ al

seriei, materialele de separat fiind situate, ambele, spre capătul pozitiv, materialul dispozitivului contribuie cu sarcină electrică pozitivă la contactul cu oricare din cele două materiale și diminuează sarcina celui încărcat negativ, ce îl face mai greu de deviat în câmp electric intens.

#### Principiul separării triboelectrostatice

Metoda constă în încărcarea cu sarcină electrică de semn diferit prin triboelectrizare a granulelor de materiale plastice, urmată de devierea lor pe traiectorii distincte, sub acțiunea unui câmp electric intens produs între doi electrozi alimentați la înaltă tensiune [16, 25, 68].

Încărcarea cu sarcină electrică diferențiată a granulelor din amestec este realizată de un aparat separat, numit generic dispozitiv de triboelectrizare.

#### Dispozitive de triboelectrizare

Principiile de funcționare ale dispozitivelor de triboelectrizare determină modul în care granulele acumulează sarcină electrică prin: ciocniri între granule de material diferit, ciocniri între granule de același material și ciocniri între granulă și peretele dispozitivului (Fig. 1.6.). Valoarea și uneori chiar semnul sarcinii electrice acumulate de o granulă sunt date de mecanismul de încărcare predominant.



Fig. 1.6. Mecanisme de încarcare cu sarcină electrică a granulelor într-un dispozitiv de triboelectrizare.

Dispozitivele de triboelectrizare se pot clasa în două categorii: prima, în care predomină ciocnirile între granule și a doua, în care predomină ciocnirile între granule și perete.

Prima categorie include dispozitive de triboelectrizare cu pat fluidizat și dispozitivele cu cilindru rotitor.

**Dispozitivele de triboelectrizare cu pat fluidizat** sunt descrise pe larg în paragraful 1.2.2.

În cazul **dispozitivelor cu cilindru rotitor** (Fig. 1.7.), materialul este introdus în interiorul cilindrului. Prin rotire, materialul este pus în mișcare și aruncat de pragurile din interioriul cilindrului în interior, unde au loc ciocniri între granule [64, 99].





Si în acest caz se întîlnesc toate cele trei mecanisme de triboelectrizare, însă predominant este contactul între granule. Prin confecționarea pragurilor din materiale diferite din diferite materiale, se poate favoriza acumularea sarcinii de un anumit semn.

A doua categorie include dispozitivele de tip ciclon, zig-zag și vibrotransportoarele.

În **dispozitivul de tip ciclon** (Fig. 1.8.) materialul, sub acțiunea forței centrifuge, este transportat pe o traiectorie în formă de spirală de-a lungul peretelui interior [45, 93].



Fig. 1.8. Principiul de funcționare al unui dispozitiv de triboelectrizare de tip ciclon.

Granulele se rostogolesc de-a lungul peretelui, având loc multiple coliziuni de tip granulă-perete.

La **dispozitivele zig-zag** (Fig. 1.9.), materialul este transportat pneumatic printr-o conductă construită în zig-zag [26].



Fig. 1.9. Dispozitiv de triboelectrizare cu tuburi zig-zag realizat în LCEI [26].

În interiorul conductei granulele se ciocnesc de pereții acesteia și capătă o mișcare turbionară. Se întîlnesc toate cele trei mecanisme de triboelectrizare, însă în acest dispozitiv, preponderente sunt ciocnirile între granule și perete.

În cazul **dispozitivelor de tip vibrotransportor** [35, 94], materialul este depus pe tava acestuia, care execută mișcări în plan orizontal și în plan vertical sub acțiunea unui electromagnet și a unor lamele elastice. În urma mișcărilor tăvii, materialul se ciocnește și se freacă de suprafața acesteia.

#### Separatoare triboelectrostatice

În funcție de cum sunt introduse granulele electrizate în câmpul electrostatic se pot deosebi separatoare de trei tipuri: cu bandă, cu cădere liberă și cu pat fluidizat.

În cazul **separatoarelo***rcu bandă* (Fig. 1.10.) [72-74], granulele ies din dispozitivul de triboelectrizare încărcate cu sarcină diferită și sunt depuse sub forma unui strat uniform pe o bandă transportoare din material conductor, legată la pămînt. Sub acțiunea forței electrice imagine, granulele sunt lipite de suprafața conductoare. În dreptul capătului benzii este plasat un electrod electrostatic cilindric, alimentat la înaltă tensiune continuă, care generează un câmp electric intens în raport cu banda metalică legată la pământ.

Principalele forțe care acționează asupra granulelor ajunse în dreptul electrodului (zona de separare) sunt: forța electrică imagine  $F_I$ , forța de greutate  $F_G$ , forța centrifugă  $F_C$  *și* forța electrică  $F_E$  (a câmpului dintre electrodul electrostatic și bandă).

Granulele incărcate cu sarcină electrică de semn contrar electrodului sunt atrase de electrod și colectate separat dacă rezultanta forței electrice și a forței centrifuge este mai mare decât forța imagine. O parte din granule ramân însa lipite de bandă ( $F_I > F_C + F_E$ ) pâna când se pierde din sarcină și forța de greutate le desprinde de pe bandă.



Fig. 1.10. Principiul de funcționare al unui separator triboelectrostatic cu bandă [72-74].

Granulele electrizate cu sarcină de același semn cu electrodul rămîn lipite de bandă sub acțiunea forței electrice și a forței imagine, a căror rezultantă este mai mare decât forța centrifugă. Când granulele ies din zona de separare și ajung sub bandă, forța de greutate reușește să desprindă o parte, iar altă parte este colectată ca fracție separată, prin desprinderea lor mecanică de pe bandă.

În cazul în care materialele lipite pe bandă păstrează sarcina acumulată la fel de mult timp, se obține o cantitate de mixt însemnată, iar procesul are o eficiență slabă.

Separatoarele *triboelectrostatice cu cădere liberă* [2, 3, 57, 75, 77] funcționează după următorul principiu (Fig. 1.11.): granulele sunt încărcate cu sarcină diferențiată într-un dispozitiv de triboelectrizare sunt lăsate să cadă liber în câmpul electric intens produs de doi electrozi verticali alimentați la înaltă tensiune.



Fig. 1.11. Principiul de funcționare al unui separator triboelectrostatic cu cadere liberă.

Sub acțiunea gravității și a forței câmpului electric, granulele încărcate sunt deviate spre electrozi, cele încărcate pozitiv spre electrodul de polaritate negativă, iar cele încărcate negativ spre electrodul de polaritate pozitivă. Granulele încărcate insuficient să fie deviate la electrozi, sunt colectate în zona centrală ca fracție de material mixt. Între cei doi electrozi se pot plasa mai multe cutii colectoare, permițându-se astfel colectarea mai multor fracții de puritate diferită.

**Separatoarele triboelectrice cu pat fluidizat** aduc o inovație majoră față de cele două separatoare prezentate anterior: triboelectrizarea materialelor se face în aceeași incintă unde are loc și separarea. Principiul de funcționare este descris pe larg în paragraful 1.2.3.

#### 1.2. Patul fluidizat în tehnologiile de separare tribo-aero-electrostatice

#### 1.2.1. Noțiuni fundamentale

Analiza fenomenelor fizice și a mecanicii patului fluidizat oferă noțiuni fundamentale necesare proiectării și realizări dispozitivelor ce îl utilizează.

Fluidizarea este procesul prin care materialelor solide granulare dispersate în aer li se conferă proprietăți similare lichidelor: granulele de densități inferioare plutesc în aer, granulele de densități superioare se scufundă, în timp ce suprafața patului rămîne orizontală la înclinare [60, 61, 102]. Ansamblul format din granule și aer se numește pat fluidizat.

Mărimea fizică principală care definește regimurile unui pat fluidizat (Fig. 1.12.) este viteza superficială de fluidizare, u. Patul fluidizat poate exista între două valori limită ale acestei viteze:  $u_{mf}$  - viteza minimă de fluidizare și  $u_t$  - viteza de transport. În același timp, patul fluidizat este un regim intermediar între coloana compactă de material și transportul pneumatic.



Fig. 1.12. Regimurile patului fluidizat în funcție de viteza de fluidizare, observate pe un dispozitiv de triboelectrizare: u<sub>mf</sub> - viteza minimă de fluidizare; u<sub>mb</sub> - viteza minimă la care apar bulele de aer; u<sub>t</sub> - viteza minimă de transport pneumatic [31, 79].

Așezând un strat de granule de aceleași dimensiuni pe suprafața unui filtru și trecând un jet de aer ascendent cu o viteză inferioară vitezei minime de fluidizare, materialul rămîne pe filtru, iar regimul se numește pat fix (Fig. 1.12.a).

Crescând viteza aerului de fluidizare până la o valoare egală cu  $u_{mf}$ , stratul de material se rarefiază, fapt ce conduce la o pierdere de presiune proporțională cu viteza aerului și cu

înălțimea patului astfel format. Acest regim este determinat de asemenea și de frecarea materialului cu pereții camerei de fluidizare și de starea suprafețelor granulelor. În acest caz fluidizarea este omogenă, iar regimul se cheamă pat incipient. Dacă viteza aerului de fluidizare este inferioară vitezei limită de cădere a granulelor, dar suficient de mare pentru a imprima acestora o energie cinetică oarecare, acestea rămîn în suspensie într-o mișcare dezordonată. Căderea de presiune între suprafața inferioară și cea superioară a patului fluidizat rămîne constantă la creșterea vitezei aerului de fluidizare între limitele  $u_{mf}$  și  $u_t$  (Fig. 1.13.).



Fig. 1.13. Caracteristica diferenței de presiune în funcție de viteza aerului de fluidizare pentru diferite regimuri ale patului fluidizat [31, 79].

În cazul separării triboelectrostatice a materialelor plastice granulare, acestea au dimensiuni și forme diferite, conducând la un proces de fluidizare complex, apărând situații în care se formează bule de aer ce străbat patul fluidizat. În cazul în care bulele de aer se unesc, poate apărea un tampon de aer (piston) în interiorul patului, de obicei în cazul camerelor de fluidizare înalte și de secțiune mică.

Crescând viteza aerului de fluidizare spre valoarea limită  $u_t$ , patul fluidizat se rarefiază din ce în ce mai mult. Când valoarea limită  $u_t$  este depășită, granulele se deplasează în direcția curgerii aerului și se ajunge la transport pneumatic.

În procesul de fluidizare, granulele au comportamente specifice diferite, care pot afecta caracteristicile patului fluidizat. Geldart [56] propune o clasificare a acestora în patru grupe (Fig. 1.14.).

Materialele din grupa C sunt pudrele foarte fine unde forțele de adeziune sunt mai mari decât forța ascensională a aerului, făcând fluidizarea foarte dificilă. Proprietățile fluidizării pot fi ameliorate prin metode mecanice (vibrații) sau prin utilizarea aditivilor de fluidizare.



Fig. 1.14. Diagrama Geldart pentru regimurile de fluidizare în funcție de dimensiunile și densitatea granulelor [56].

Materialele din grupa A au dimensiuni de ordinul unei zecimi de milimetru și densități scăzute. Stratul de fluidizare este uniform până la momentul formării bulelor de aer.

Materialele din grupa B au dimensiuni și densități medii (un bun reprezentant este nisipul). Bulele de aer apar la valori ale  $u_{mb} \approx u_{mf}$ . Când alimentarea cu aer este întreruptă, patul dispare brusc.

Granulele din grupa D au diametre mai mari de 0,5 mm și densități mari. Bulele încep să se formeze imediat după punctul minim de fluidizare și se ridică lent, iar fluidizarea este turbulentă, bulele spărgându-se la suprafață. În această grupă se încadrează granulele milimetrice de materiale plastice.

#### 1.2.2. Patul fluidizat în dispozitive triboelectrostatice

În general, dispozitivele de triboelectrizare cu pat fluidizat (Fig. 1.15.) sunt constituite dintr-o cameră de triboelectrizare, unde sub acțiunea unui jet de aer ascendent, granulele sunt aduse în stare de fluidizare, favorizând astfel multiple ciocniri între granule și între granule și peretele dispozitivului [63].



Fig. 1.15. Principiul de funcționare al unui dispozitiv de triboelectrizare cu pat fluidizat: alimentarea cu granule
(a), granulele sunt încărcate sub acțiunea patului fluidizat, granulele încărcate cu sarcină electrică ies din camera de fluidizare (c).

Toate cele trei mecanisme de încărcare cu sarcină descrise în figura 1.6. se produc simultan, însă sarcina electrică este dictată cu preponderentă de ciocnirile de tip granulăgranulă.

În cadul LCEI, Călin et al. [33] au dezvoltat un astfel de dispozitiv (Fig. 1.16.), utilizat cu succes în triboelectrizarea amestecurilor granulare de materiale plastice.



Fig. 1.16. Dispozitiv de triboelectrizare de tip coloană cu pat fluidizat [33].

Materialul granular este introdus printr-o deschidere laterală și este depozitat pe filtrul din partea inferioară. Jetul de aer este distribuit uniform în secțiunea camerei de triboelectrizare. Sub acțiunea fotei ascensionale a aerului de fluidizare, granulele sunt ridicate în volumul camerei și sunt menținute în suspensie.

În acest regim se produce triboelectrizarea prin ciocniri multiple de tip granulă-granulă și granulă-perete. Regimul este stabilit prin realizarea unui gradient negativ de presiune, obținut prin perfoarea camerei în trei zone de reducere a presiunii. Granulele sunt menținute în pat câteva minute, după care, prin deschiderea clapetei de evacuare, se blochează fluxul de aer și se permite ieșirea granulelor din cameră, sub acțiunea forței de gravitație [31].

#### 1.2.3. Separatoare triboelectrice cu pat fluidizat

Un model de laborator al separatorului triboelectric cu pat fluidizat este prezentat pe larg de Drăgan [18, 46, 47] și face obiectul unui brevet de invenție [32]. Principiul de funcționare este reprezentat în figura 1.17.



Fig. 1.17. Principiul de funcționare al unui separator triboelectostatic cu pat fluidizat.

Amestecul granular este introdus în camera de triboelectrizare unde, prin ciocniri repetate, sub acțiunea forței de ascensiune a aerului în patul fluidizat, granulele se încarcă cu sarcină diferențiată. Sub acțiunea forței câmpului electric, granulele încărcate cu sarcină pozitivă sunt deviate spre electrodul alimentat de la o sursă de înaltă tensiune de polaritate negativă, în timp ce granulele încărcate cu sarcină negativă, sunt deviate spre electrodul pozitiv, alimentat de la o sursă de înaltă tensiune de polaritate pozitiv, alimentat de la o sursă de înaltă tensiune de polaritate pozitivă.

Granulele sunt fixate apoi pe electrodul bandă, sub acțiunea forței imagine, forței câmpului electric, componentei normale a forței gravitaționale și forței de frecare. Granulele astfel fixate sunt scoase din camera de triboelectrizare de cei doi electrozi bandă, apoi desprinse mecanic cu ajutorul periilor și colectate ca fracție separată.

Funcționarea acestui tip de separatoare se face fără colectarea unei fracții de mixt, având, la nivel principial o eficiență maximă. Întreg materialul ce intră în camera de triboelectrizare iese sub formă de fracții de material separat.

## 1.3. Principii de măsură și achiziție de date în studiul proceselor electrostatice

Măsurarea sarcinii electrice este un proces puternic influențat de condițiile mediului ambiant și supus la numeroase erori de manipulare [6, 36]. Interpretarea rezultatelor nu se poate face decât înțelegând corect fizica procesului de măsură și ipotezele care se propun.

Cușca Faraday (Fig. 1.18.) este un dispozitiv de măsură bine cunoscut și utilizat pe larg în aplicațiile electrostatice.



Fig. 1.18. Cușca Faraday utilizată în laborator: principiu și realizare.

Drăgan [41] utilizează variante diferite ale cuștii Faraday clasice, în timp ce Dăscălescu [49] descrie în detaliu o cușcă Faraday modificată bazată pe fenomenul de inducție electrică, ce permite evaluarea sarcinilor electrice acumulate într-o conductă din material dielectric.

Prin utilizarea unui sistem de achiziție de date în cazul procesului de electroseparare, se poate urmări în timp real evoluția factorilor măsurați - prin afișarea datelor achiziționate sub forma unui grafic derulant și stocarea acestor date pentru prelucrarea facilă în timp relativ scurt. Achiziția de date poate stă la baza unui sistem complex de comandă și reglare, care poate fi implementat cu succes în cazul separatoarelor electrostatice.

Un sistem tipic de achiziție de date, precum cel descris schematic în figura 1.19., are în alcătuire cinci componente esențiale [95]:

- senzorii și traductoarele sunt dispozitive cu rolul de a transforma energia de intrare de o anumită formă în semnal digital sau analogic;
- componenta de prelucrare a semnalului care elimină incompatibilitățile între traductoarele de intrare și componenta hardware prin tratarea semnalului (filtrare, aplificare etc);
- componenta hardware, care are funcția de a converti semnalele analogice în semnale digitale și invers;
- calculatorul, dotat cu caracteristici de viteză și stocare a datelor rezultate din procesul de achiziție;





Fig. 1.19. Componentele unui sistem general de achiziție de date.

Aparatura utilizată în Laboratorul de Electrostatică Aplicată în achiziția masei și a sarcinii constă din: 2 balanțe electronice 2 kg, rezoluție 0,1 g; 2 electrometre Keithley 6514; o placă de achiziție digitală GPIB, o placă de achiziție externă Meilhaus RedLab 1008; pachetul de software TracerDAQ și pachetul LabVIEW 6.

Mihălcioiu [85-86] a pus la punct un instrumentul virtual, numit AdeSO.vi (Fig. 1.20.), capabil să achiziționeze date la un timp de eșantionare variabil de la un electrometru conectat la o cușcă Faraday. Panoul frontal simplu prezintă un grafic derulant, un potențiometru care reglează timpul de eșantionare, un buton ON/OFF și un câmp unde se completează adresa fișierului de ieșire.



Fig. 1.20. Instrumentul virtual: panoul frontal (a) și fisierul cu datele inregistrate (b).

Diagrama de instrucțiuni (Fig. 1.21.) poate fi structurată pe 4 module principale:

- modulul 1, are rolul de a inițializa electrometrul (alegerea modului de sarcină, zero-check) prin utilizarea unor cuvinte cheie specifice protocolului GPIB;



Fig. 1.21. Diagrama de instructiuni a instrumentului virtual AdeSO.vi.

- modulul 2, cu rolul efectiv de a realiza citirea unei date de la electrometru şi aducerea acestuia la zero pentru a fi gata pentru o nouă măsurare;
- modulul 3 afişează datele pe graficul derulant şi apelează un fişier text unde transmite informația citită;
- modulul 4 modifică intervalul de timp între două măsurări.

Realizarea conexiunii între PC și electrometru (Fig. 1.22.) este facută prin intermediul unei plăci de achiziție NI PCB, utilizând protocolul GPIB [7-8].



Fig. 1.22. Reprezentarea schematică a sistemului de achiziție de date cu AdeSO.vi.

Avantajul principal al acestui instrument virtual este simplitatea, dar pentru măsurarea sarcinii electrice pe două canale, la același timp de eșantionare, sau la timpi de eșantionare diferiți, au fost necesare o serie de modificari, care în principal constau în dublarea codului pentru doua canale [17, 19].

#### Concluzii

Separarea amestecurilor granulare plastice provenite din DEEE este un demers de actualitate, iar tehnologia de separare a materialelor plastice este un domeniu de cercetare în continuă dezvoltare.

Dispozitivele de triboelectrizare dezvoltate în aplicații de separare electrostatică sunt bine cunoscute și și-au demonstrat utilitatea.

Utilizarea patului fluidizat ca metodă de triboelectrizare în prezența câmpului electric, prezintă avantaje certe, dar aduce o serie de aspecte specifice care trebuie clarificate.

Principiul de funcționare al separatoarelor triboelectrostatice cu pat fluidizat aduce o îmbunătățire a tehnologiilor de separare existente. Aceste echipamente au potențialul de a se impune printre aplicațiile de separare ca fiind printre cele mai eficiente.

Fenomenele triboelectrice sunt complexe și greu de modelat, de aceea abordarea experimentală este indispensabilă în studiul noilor separatoare electrostatice. Folosirea sistemelor de achiziție de date ușurează munca în laborator și deschide perspective noi în investigarea proceselor.

## Capitolul 2 Caracterizarea proceselor de triboelectrizare și separare electrostatică pe un separator cu pat fluidizat

# 2.1. Standul experimental pentru modelarea proceselor de sparare tribo-aero-electrostatice

#### 2.1.1. Principiul de funcționare. Construcție.

Standul experimental prezentat în figura 2.1. are ca element central separatorul electrostatic DISELF ( $\underline{\mathbf{D}}$ ispositif  $\underline{\mathbf{I}}$ ntermédiaire de  $\underline{\mathbf{S}}$ éparation  $\underline{\mathbf{E}}$ lectrostatique á  $\underline{\mathbf{L}}$ it  $\underline{\mathbf{F}}$ luidisé). Particularitatea acestui separator este că realizează atât încărcarea cu sarcină electrică cât și separarea propriu-zisă a materialelor încarcate diferențiat în aceeași incintă.

Încărcarea electrică se face prin triboelectrizare - ciocniri granulă-granulă și granulăperete, la nivelul unui pat fluidizat. La baza camerei de electrizare se află o sită pe care este așezată masa de material ce urmează a fi separată. Fluxul de aer ascendent (asigurat de intrarea de aer comprimat la presiuni variabile) antrenează particulele într-un pat fluidizat.



Fig. 2.1. Separatorul DISELF - aspectul standului experimental.
Câmpul electric necesar separării este generat de doi electrozi plani paraleli, aflați pe două din fețele opuse ale separatorului. Aceștia sunt alimentați de două surse GAMMA ES60N-20W și GAMMA ES60P-20W cu înaltă tensiune de polaritate opusă, pentru a creea un câmp electric intens uniform, orientat perpendicular pe direcția fluxului de aer de fluidizare.

Granulele separate sunt colectate în două cuști Faraday aflate la baza electrozilor, ceea ce permite măsurarea sarcinii electrice a fiecărui material separat, cu ajutorul a două electrometre (Keithley 6514). Masa materialului separat se poate afla prin cântărire, iar puritatea lui prin numărarea granulelor (când materialul permite) sau prin alte metode.

Constructiv, dispozitivul este compus din două părti separate, detașabile - camera de triboelectrizare și ansamblul de alimentare *și* m*ă*sur*ă*.

**Camera de fluidizare** are secțiune dreptunghiulară (90 x 110 mm) și a fost prevăzută cu doi pereți transparenți din PMMA pentru a permite observarea procesului de triboelectrizare și separare. Ceilalți pereți sunt prevăzuți cu electrozi realizați din tablă de aluminiu cu dimensiuni de 90 x 250 mm conectați la sursele de înaltă tensiune. Camera de fluidizare este fixată pe un suport ce permite schimbarea ansamblului de alimentare și asigură verticalitatea întregului dispozitiv.

Ansamblul de alimentare *cu aer și* masură este propriu fiecarui regim de funcționare a separatorului. Experimențele pe acest stand au fost realizate în cazul a două regimuri distincte: intermintent și continuu.

**Regimul de** *funcționa*re intermitent utilizează ansamblul din figura 2.2. Incinta de alimentare constituie spațiul destinat alimentării cu material a separatorului, reprezentând un volum rectangular cu dimensiuni de 90 x 90 x 90 mm, delimitat de pereții din PVC ai ansamblului, iar la bază de o sită din material plastic ce permite accesul aerului de fluidizare.

Cele două cutii colectoare ce însoțesc incinta de alimentare sunt realizate din PVC și pot stoca, fiecare, circa 100 g de material granular. Pereții lor interiori respectiv exteriori sunt căptușiți cu bandă de cupru. Astfel s-au realizat cele două cuști Faraday ce permit măsurarea sarcinii materialului colectat. Volumul interior al fiecărei cutii reprezintă electrodul de măsură al cuștii și este legat printr-un conector BNC la electrometru, în timp ce banda ce înfășoară peretele exterior, care reprezintă ecranul cuștii, este legată la pământ.

Ansamblul de alimentare și măsură poate fi detașat ușor de camera de triboelectrizare, ori de câte ori este necesară realimetarea sau curățarea acestuia, precum și măsurarea masei sau purității materialului separat.



Fig. 2.2. Reprezentarea schematică a separatorului în regim intermitent.

**Regimul de** *funcți*onare continuu presupune alimentarea continuă a separatorului DISELF cu material granular de la un vibrotransportor model Retsch DR100 cu debit variabil (Fig. 2.3.).



Fig. 2.3. Schema standului experimental al separatorului DISELF în funcționare în regim continuu cu achiziție de date.

În acest caz, ansamblul de alimentare și măsură a fost echipat cu două rampe care direcționează materialul colectat spre alte cuști Faraday de o capacitate mult mai mare, aproximativ 3 litri fiecare. Acestea sunt așezate pe câte o balanță electronică (max. 2000 g, rezolutie 0,1 g) ceea ce permite măsurarea masei sau, prin achiziție de date, monitorizarea evoluției în timp a masei colectate. Pentru a permite schimbarea rapidă a regimurilor de funcționare, cele două variante ale ansamblului de alimentare și măsură s-au construit din materiale de același tip și cu dimensiuni constructive identice.

## 2.1.2. Sistemul de achiziție de date

## Achiziția de date în măsurarea masei

Balanțele electronice Kern 440-47N sunt dotate cu un singur port de comunicații și anume RS232, obișnuitul port serial aflat pe majoritatea plăcilor de bază din PC-uri, astfel că sistemul de achiziție s-a realizat prin conectarea directă a celor două balanțe la PC prin câte un port serial (Fig. 2.4.).

Achiziția de date propriu-zisă s-a realizat într-un program simplu efectuat în LabVIEW, scopul acestuia fiind de a prelua măsuratorile balanțelor și de a le stoca în câte un fișier text, pentru a afișa simultan măsuratorile pe două grafice derulante.



Fig. 2.4. Sistemul de achizite de date în masurarea masei cu doua balante Kern 440-7N.

Principalele componente ale panoului frontal al instrumentului virtual (Fig. 2.5.) sunt cele două grafice derulante care indică ultimele 120 de măsurători realizate. Au mai fost plasate de asemenea două câmpuri ce indică valoarea instantanee a fiecărei balanțe și alte două câmpuri ce trebuie completate cu adresa fișierului text în care se dorește stocarea datelor.



Fig. 2.5. Panoul frontal al instrumentului virtual de măsură a masei cu două balanțe electronice.

Diagrama de instrucțiuni (Fig. 2.6.) prezintă două structuri de cod identice, întrucât balanțele electronice sunt același model și achiziția se realizează prin aceeași procedură în ambele cazuri.



Fig. 2.6. Diagrama de instrucțiuni a instrumentului virtual de măsură a masei cu două balanțe electronice.

**Structura 1** este formată din două blocuri - adresa portului de comunicații și blocul de citire din memoria buffer a balanței. Semnalul primit de la balanțe este unul digital și a fost citit pe 7 biți - aici reprezentat printr-un fir mov ce intră în **structura 2**.

**Structura 2** este compusă din bucla **if**, reprezentată pe diagramă printr-o fereastră ce are două instanțe: adevărat sau fals (vrai/faux). Instanța adevărat primește semnalul de la balanță sub formă de variabilă șir, îl convertește în variabilă numerică și îl afișează pe grafic și în câmpul valorii instantanee. În același timp, utilizând un bloc de concatenare, valoarea semnalului este scrisă într-un fișier text. Fiecare linie reprezintă o valoare citită, urmată de ora la care s-a efectuat și utilizând simbolul ; ca separator (Fig. 2.7.), ceea ce faciliteza prelucrarea ulterioară a datelor la importarea în Excel. Pe instanța fals nu se realizează nici o instrucțiune.

📕 PA - BI	-			
<u>F</u> ichier <u>E</u> di	tion F <u>o</u> rma	t <u>A</u> ffichage	e <u>7</u>	
109.3;1 109.5;1 109.9;1 110.1;1 110.4;1 110.8;1 110.7;1 111.6;1 111.6;1 112.2;1	.2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:30 .2:06:31	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		

Fig. 2.7. Fișier text cu date din achiziția masei.

Condiția pentru instanța adevărat este reprezentată de structura 3. Aici se regăsește un bloc de comparare care are rolul de a selecta semnalul corect din totalitatea datelor oferite de bufferul balanței.

Cele trei structuri sunt dublate și pentru cea de-a doua balanță și sunt plasate într-o buclă **while**, care are drept condiție de realizare o constantă adevărat, ceea ce înseamnă că instrucțiunile se vor efectua atâta timp cât instrumentul virtual este pornit (în modul run). În afara ferestrei while se pot observa două blocuri, ce reprezintă calea fișierelor care vor fi apelate la fiecare scriere.

## Achiziția de date în măsurarea sarcinii electrice

Electrometrele Keithley 6514 pot fi conectate în șirul de achiziție de date prin portul GPIB sau utilizând ieșirea analogică în semnal de tensiune [7]. În lipsa unei plăci de achiziție de date cu conexiune GPIB s-a optat pentru ieșirea analogică.

Sistemul de achiziție a sarcinii electrice (Fig. 2.8.) este astfel alcătuit de cuștile Faraday, cele două electrometre, de placa de achiziție externă RedLab 1008 și de calculator.



Fig. 2.8. Sistemul de achizite de date în măsurarea sarcinii cu placa de achiziție RedLab 1008.

Utilizându-se software-ul pus la dispozitie de fabricantul placii în a urmari evolutia sarcinii, nu a fost necesara realizarea unui nou instrument virtual. Astfel, punerea în funcțiune a acestui sistem s-a rezumat la efectuarea conexiunilor dintre electrometre și placa de achiziție, apoi etalonarea porturilor placii.

Software-ul utilizat - TracerDAQ (Fig. 2.9.) prezintă achiziția sarcinii într-o fereastră de tip osciloscop, unde pot fi modificați diverși parametri specifici (bază de timp, timpul de eșantionare etc).



Fig. 2.9. Achiziția de date în software-ul TracerDAQ în măsurarea sarcinii electrice.

Datele achiziționate sunt prezentate într-un fișier text similar cu cel conceput pentru măsurarea masei, fiecare linie din fișier având afișate măsuratorile pe cele patru canale și ora la care acestea au fost efectuate.

## 2.1.3. Metoda planificării active a experiențelor

Planificarea activă a experiențelor sau metoda planurilor de experiențe, este o metodă de calcul complexă care permite documentarea, concepția și optimizarea unui sistem, măsurarea fiecărui parametru care intervine în proces și descoperirea condițiilor celor mai favorabile pentru funcționarea procesului [52, 54]. Comportamentul unui sistem se poate defini în raport cu factorii ce-l influențează și în raport cu mărimile de ieșire, care sunt măsurabile.

Factorii de influență care pot fi modificați la valori reproductibile reprezintă mărimile de intrare. În conceperea unui plan de experiențe sunt aleși factorii care au o importanță semnificativă asupra procesului. Mărimile de ieșire sau răspunsurile sunt acele valori obținute prin calcul sau măsură ce caracterizează calitatea procesului.

Se consideră așadar un proces oarecare ce are m factori și n răspunsuri, ca în figura 2.10.



Fig. 2.10. Reprezentarea schematică a unui proces oarecare cu intrari u și iesiri y.

Fiecare răspuns y se poate exprima sub forma unei funcții polinomiale cu variabile  $u_i$ , i=1, 2, ..., m de forma următoare:

$$y = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 , i, j = 1, 2, ..., m$$
(2.1)

Pentru fiecare factor u<sub>i</sub>, este definită o variabilă centrată x<sub>i</sub> cu relația:

$$x_{i} = \frac{(u_{i} - u_{i0})}{\Delta u_{i}} = u_{i}^{*}$$
(2.2)

unde

$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2}; \ \Delta u_{i} = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2}$$
(2.3)

Funcția de ieșire devine:

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, i, j = 1, 2, ..., m$$
(2.4)

unde  $x_i$  are valoarea -1 pentru nivelul minim  $u_{imin}$  al factorului și valoarea +1 pentru nivelul maxim  $u_{imax}$  al aceluiași factor.

Funcția polinomială poate fi reprezentată grafic sub forma unei suprafețe de răspuns (curbe de nivel) unde fiecare contur reprezintă o valoare constantă a funcției, inscrisă pe etichetă (Fig. 2.11.).



Fig 2.11. Suprafața de răspuns generată cu programul MODDE 5.0.

Pentru a obține rezultatul sub forma unei suprafețe de răspuns este necesară realizarea unui plan de experiențe compozit. Se aleg factorii de intrare și domeniile lor de variație și apoi se realizează măsurători în anumite puncte ale domeniului predefinit. În figura 2.12. sunt reprezentate punctele de măsură necesare în cazul unor procese cu trei respectiv doi factori.



Fig. 2.12. Reprezentarea grafică a punctelor de măsură necesare unui plan de experiențe compozit cu 3 factori (a) respectiv 2 factori (b).

Domeniile de variație sunt ale mărimilor sunt reprezentate de laturile dreptunghiurilor, iar punctele de măsură de punctele situate la colțurile dreptunghiurilor. Steaua marchează centrul domeniului total de variație și corespunde centrului domeniului ales pentru fiecare factor. Numărul total de măsurări, N, este dat de relația:

$$N = 2^{k} + 2 \cdot k + 3 \tag{2.5}$$

unde k este numărul factorilor.

In cadrul experiențelor realizate în acest capitol, această metodă a fost folosită în modelarea procesului prin implementarea în programul MODDE 5.

#### Implementarea planificării active a experiențelor în MODDE

Utilizarea acestui program este relativ simplă, factorii sunt introduși pe rând cu domeniile lor de variație și cu unitatea de măsură [12]. Apoi sunt definite răspunsurile, care vor reprezenta valorile măsurate în proces. Se alege tipul planului dorit și MODDE generează tabelul cu măsuratorile care trebuie realizate pentru calcularea funcției de ieșire (Fig. 2.13.).

	1	2	3	4	4		6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Ex	С	D	U	bPC	bPA
1	1	N1	11	Incl	Ŧ	3	20	94.7	82.3
2	2	N2	2	Incl	Ŧ	9	20	94	97.7
3	3	N3	10	Incl	Ŧ	3	32	99.6	96.5
4	4	N4	3	Incl	Ŧ	9	32	95.6	97.8
5	5	N5	1	Incl	Ŧ	3	26	97.8	90.2
6	6	N6	6	Incl	•	9	26	97	97.2
7	7	N7	8	Incl	•	6	20	97.3	94.2
8	8	N8	4	Incl	•	6	32	99.5	98.2
9	9	N9	5	Incl	•	6	26	97.8	94.8
10	10	N10	7	Incl	Ŧ	6	26	98.8	95.3
11	11	N11	9	Incl	Ŧ	6	26	97.2	95.6

Fig. 2.13. Tabel generat de MODDE pentru un proces de separare cu două intrări (D - debit de material [g / s] și U - diferența de potential dintre electrozi [kV] ) și două iesiri (bPA - puritatea materialului PA [%] și bPC puritatea materialului PC [%]).

După completarea tabelului cu valorile măsurate (sau calculate, în cazul mărimilor derivate) se realizează calculul funcțiilor de ieșire pentru fiecare răspuns. Acestea sunt exprimate sub formă de polinom, unde fiecare coeficient este aflat cu o anumită eroare. Se pot alege diferite forme de exprimare a acestor funcții, printre care și suprafețele de răspuns. De asemenea se poate afla legătura dintre diferiți factori (funcție/grafic) și se poate calcula un regim optim de funcționare, unde condițiile de convergență sunt alese de utilizator.

## 2.2. Funcționarea în regim intermitent

Separatorul electrostatic DISELF a fost descris în paragraful 2.1.1. ca având două regimuri de funcționare - intermitent și continuu. Regimul intermitent presupune introducerea în incinta de alimentare a întregii cantități de amestec granular, separatorul este lăsat să funcționeze un anumit interval de timp, pentru ca materialul granular se se separe, apoi procesul de separare se oprește. Pentru a realiza o separare nouă, materialul rămas în camera de alimentare și fracțiile separate sunt înlăturate și separatorul se alimentează cu material nou.

În definirea separării ca un proces, se numesc mărimi de intrare, variabile de control sau factori mărimile care influențează separarea și care pot fi modificate la valori reproductibile. Principalele mărimi de intrare considerate în acest studiu sunt: tensiunea de alimentare, viteza aerului de fluidizare, masa de material la intrare, intervalul de timp de funcționare și compoziția amestecului de material.

Variabilele de ieșire, sau răspunsurile sunt mărimile fizice măsurabile ce caracterizează separarea. În acest caz au fost luate în considerare: masa de material a fracțiilor separate și sarcina acumulată de granule după separare. În cele mai multe cazuri s-au definit, pe baza acestor mărimi, unele noi: sarcina masică, puritatea materialului separat, randamentul de separare, ponderea fracției colectate, gradul de recuperare etc.

În aceste condiții, au fost realizate mai multe tipuri de experiențe:

- experiențe preliminare, cu rolul de a determina domeniile de variație ale principalelor mărimi de intrare: viteza aerului, tensiunea de alimentare a electrozilor, masa optimă cu care trebuie alimentat separatorul, durata unui ciclu de separare etc;
- experiențe pentru a caracteriza procesul, unde se observă evoluția anumitor mărimi de ieșire și se determină legătura dintre acestea și mărimile de intrare;
- experiențe în cadrul metodei "planificării active a experiențelor" unde se folosește metoda descrisă în paragraful 2.1.3., prin care se realizează un model matematic al calității separării.

Amestecurile binare utilizate pentru separare sunt compuse din poliamidă și policarbonat, cu aspectul și caracteristicile descrise în figura 2.14.

	Material	<u>Poliamida</u> (PA)	Policarbonat (PC)
	Culoare	albastru	portocaliu
	Forma	cilindrica	cilindrica
	Dimensiune [mm]	Ø 2,5 x 3,4	Ø 3 x 3,6
	Masa [mg]	20	25
	Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]	1100	1200
1cm			

Fig. 2.14. Aspectul și caracteristicile granulelor utilizate în amestecurile supuse separării.

## 2.2.1. Experiențe preliminare

Câteva informatii inițiale au putut fi preluate dintr-un articol realizat inaintea inceperii tezei [24]. Astfel se cunoaște că viteza aerului de fluidizare este 6 m/s, masa optimă de material cu care se realizează o încercare este de 150 g și că separarea are loc la diferențe de potențial aplicate la electrozi cuprinse între 8...40 kV.

Primele seturi de experiențe preliminare s-au realizat pentru a verifica aceste valori de potențial (tabelul 2.1.). S-au ales astfel diferite valori pentru tensiunea de alimentare cuprinse în intervalul  $\pm 4...20$  kV. S-a observat că procesul de se parare funcționează satisfăcător pentru valori minime ale tensiunii aplicate de  $\pm 6$  kV.

	Diferența de potențial [kV]	Masa [g]	Puritatea [%]	Q / m [nC / g]
	12	14,9	87,2	13,29
РА	18	32,8	94	14,63
	24	41,7	97,6	14,22
	30	46,5	97,4	4,32
	36	48,6	92,3	4,53
	12	27,7	85,3	-12,27
	18	41,8	84,5	-13,44
PC	24	48,9	93,75	-12,47
	30	48,3	91,1	-8,36
	36	41,9	90,5	-6,95

TABELUL 2.1. MASA, PURITATEA ȘI SARCINA MATERIALELOR SEPARATE

PENTRU UN AMESTEC GRANULAR DE 50 % PA - 50 % PC.

În ceea ce privește valoarea maximă a tensiunii aplicate se observă apariția fenomenului de descărcare Corona care dăunează procesului de separare întrucât granule din material diferit se încărca cu sarcină de același semn - fapt care diminuează sau chiar anulează

efectul triboelectrizarii (încărcarea diferențială cu sarcină de semn diferit a materialelor de natură diferită).

În ceea ce privește masa materialelor separate (Fig. 2.15.a.) se poate observa că o creștere semnificativă începe de la valoarea de 18 kV a potențialului aplicat. Valorile purității (Fig. 2.16b) de asemenea au o creștere semnificativă de la valoarea de 24 kV. Se poate vorbi de material separat doar pentru purități mai mari de valorile impuse în industrie pentru materialele recuperate. La valoarea de 36 kV care este asociată cu apariția fenomenului Corona se poate observa o scădere atât în ceea ce privește masa cât și puritatea materialelor recuperate.



Fig. 2.15. Variația masei (a) și a purității (b) materialelor separate în funcție de tensiunea de alimentare a electrozilor.

S-au ales așadar valorile limită ale intervalului de variație a potențialului aplicat la electrozi la 18 kV și 30 kV. Aceste experiențe s-au realizat cu un material granular în amestec

de 50 % PA - 50 % PC. S-au păstrat aceste valori ale mărimilor de intrare și pentru amestecurile sintetice de alte proporții.

## 2.2.2. Caracterizarea procesului de separare

**Primul set de** *experiențe* a fost realizat cu amestec granular 50 % PA - 50 % PC. S-a variat tensiunea aplicată la electrozi la valorile de  $\{\pm 9; \pm 12; \pm 15\}$  kV obținându-se diferențe de potențial de  $\{18; 24; 30\}$  kV.

Procedura experimentală constă în urmatoarele:

- se alimentează separatorul cu 150 g de amestec granular;
- se pornește procesul de separare pentru diferența de potențial de 18 kV;
- se oprește după un interval de timp de 10 s;
- se măsoară cu ajutorul cuștilor Faraday sarcina materialului separat;
- se golesc cuștile și se cîntărește materialul;
- se reiau măsuratorile modificând intervalul de timp la 20 s; 30 s și 60 s.

După terminarea acestui prim set de experiențe se procedează la crestera tensiunii de alimentare U la 24 kV apoi la 30 kV. Se calculează sarcina masică pentru toate cazurile și se trec datele în tabel (tabelul 2.2.).

U [kV]	Timpul [s]	Masa PC [g]	Masa PA [g]	Sarcina PC [nC]	Sarcina PA [nC]	Q/m PA [nC / g]	Q/m PC [nC / g]
	10	36,4	29,1	-559	453	-15,357	15,567
10	20	46,7	36,3	-761	652	-16,296	17,961
18	30	48,5	39	-725	740	-14,948	18,974
	60	58,2	43,7	-823	758	-14,141	17,346
	10	39,1	29	-435	529	-11,125	18,241
24	20	44,1	35,4	-506	489	-11,474	13,814
24	30	52,1	41,6	-715	587	-13,724	14,111
	60	60,3	46,2	-791	712	-13,118	15,411
	10	35,3	31,4	-328	221	-9,292	7,038
20	20	45,4	37,2	-373	205	-8,216	5,511
30	30	56,3	42,2	-559	258	-9,929	6,114
	60	61,6	50,49	-557	368	-9,042	7,289

TABELUL 2.2 REZULTATELE EXPERIMENTALE OBȚINUTE PENTRU SEPARAREA LA DIFERITE VALORI ALE DIFERENȚEI DE POTENTIAL APLICATA LA ELECTROZI.

Valorile finale ale masei după 60 s nu sunt influențate în mod semnificativ de tensiunea aplicată. Sarcina masică este relativ constantă în funcție de timp (Fig. 2.16.). Aceste observații conduc la concluzia că fiecare granulă când atinge o valoare suficientă a sarcinii electrice va fi atrasă spre electrozi și apoi separată. Această valoare depinde însă de tensiunea aplicată la electrozi: sarcină electrică necesară separării la o diferență de potențial de de 18 kV este mai mare decât cea la 30 kV.



Fig. 2.16. Sarcina masică calculată la diferite intervale de timp la trei valori ale diferenței de potential.

Cunoscând alura caracteristicii sarcinii materialelor separate prin achiziția de date (2.17.a.) și că valoarea sarcinii masice rămîne relativ constantă în timp, se poate afirma că masa materialului separat evoluează după o curbă asemănătoare celei de sarcină, fapt confirmat și de curba din figură 2.17.b., obținută din datele din tabelul 2.2.



Fig. 2.17. Achiziție de date pentru sarcina electrică a materialelor granulare în regim intermitent (a) masa materialelor separate măsurată la intervalele de timp de {10; 20; 30; 60} s (b).

Folosirea separatorului în această primă configurație împiedică achiziția de date pentru masă. Totuși, achiziția masei a fost realizată ulterior și pentru acest regim, utilizând separatorul în configurația folosită la regimul continuu, dar alimentându-l intermitent. Rezultatele acestor măsurători se regăsesc în cel de-al doilea set de experiențe.

Cantitatea de material recuperat (tabelul 2.2.) în funcție de tensiunea aplicată și de timp este prezentată în figura 2.18. O primă observație conduce la concluzia că masele separate pentru fiecare material sunt diferite, de fiecare dată inregistrându-se o valoare mai mare pentru PC. Încărcarea cu sarcină electrică are loc prin contact, granulă-granulă sau granulă-perete.



Fig. 2.18. Masa recuperată dintr-un amestec granular 50 % PA - 50 % PC în cazul diferitelor potențiale la electrozi: PA (a) și PC (b).

Rezultatele mai bune pentru PC pot fi explicate prin faptul că materialele din ansamblul separatorului (PMMA și PVC) favorizează electrizarea acestui material.

Al doilea set de experiențe a fost realizat cu amestecuri granulare de 50 % PA - 50 % PC, 60 % PA - 40 % PC și 40 % PA - 60 % PC. Tensiunea aplicată la electrozi a fost de  $\pm 12$  kV (obținându-se o diferență de potențial de 24 kV) și masa inițială de material granular în amestec utilizată este de 200 g.

Procedura experimentală constă în urmatoarele etape:

- se alimentează separatorul cu amestec granular;
- se pornește procesul de separare. Materialul este colectat în doua recipiente așezate pe doua balanțe electronice conectate la un calculator ce realizează achiziția de date;
- se oprește procesul de separare dupa 30 s;
- se inlătură materialul din separator și din recipientele de colectare și se reiau măsurările cu celelalte amestecuri granulare.

Rezultatele obținute după fiecare măsurare în urma achiziției de date sunt stocate în câte un fișier text pentru fiecare material. Graficele din figura 2.29. sunt obținute din aceste fișiere (frecvența de eșantionare este de 12 masuratori / s).



Fig. 2.19. Evoluția materialului separat în cazul amestecurilor granulare: 50 % PA - 50 % PC (a), 60 % PA - 40 % PC (b) și 40 % PA - 60 % PC (c).

Curbele prezentate în figura 2.19. confirmă rezultatele obținute în cadrul primului set de experiențe. În cazul unui amestec granular 50 % PA - 50 % PC se recuperează aproximativ aceeași cantitate de material după 30 s.

Pentru amestecurile care nu au componentele în proporții egale, poliamida se recuperează mai bine decât policarbonatul de fiecare dată. Aceste rezultate pot fi puse pe seama faptului că granulele de poliamidă sunt mai ușoare decât cele de policarbonat și fiecare granulă ar avea nevoie de o sarcină mai scăzută, deci de un număr mai mic de coliziuni și implicit de un timp mai scurt pentru a fi separată.

Pe de altă parte, s-a observat în cadrul experiențelor că unele granule de policarbonat au rămas blocate în interiorul camerei de separare și a căilor de ieșire spre balanțe. Aceste granule au fost deja separate, dar nu au fost înregistrate de balanță.

În cazul amestecului 40 % PA - 60 % PC, recuperarea slabă a policarbonatului se datorează și din cauza faptului că acest material este în proporție mai mare. Granulele de poliamidă sunt mai bine triboelectrizate și ies din camera separatorului fără a putea contribui la încărcarea cu sarcină a granulelor de policarbonat rămase în separator.

## 2.3. Funcținarea în regim continuu

Funcționarea în regim continuu a separatorului DISELF presupune utilizarea variantei constructive descrise în paragraful 2.1.1., alimentarea acestuia se face în mod continuu cu un debit constant de material, iar fracțiile separate sunt colectate cu ajutorul unui sistem de rampe care dirijează materialul separat către două cutii colectoare de capacitate mare.

## 2.3.1. Experiențe preliminare

Primul set de teste urmărește influența vibrotransportorului și a conductei de PVC utilizate pentru a ghida materialul în camera de fluidizare, al doilea set reevaluează înalta tensiune la care cei doi electrozi trebuie alimentați pentru a obține rezultate satisfăcătoare ale purității, iar al treilea investighează debitele de material la care poate fi alimentat separatorul în acest regim de funcționare.

#### Influența vibrotransportorului și a conductei de ghidare

În contact cu pereții tăvii vibrotransportorului și ai conductei de ghidare a materialului, fiecare material se încarcă cu sarcină electrică prin contact. Pentru a observa influența acestor două noi elemente, s-au efectuat măsurări pentru a determina sarcina electrică cu care se încarcă materialele (Tabelul 2.3.).

Material		Sarcina masică [nC / g]								
	Dispozitiv	#1	#2	#3	#4	Medie	Abatere medie patratică			
РА	Vibrotransportor	-0,16	-0,21	-0,18	-0,15	-0,17	0,03			
	Vibrotransportor și conductă	-0,19	-0,09	-0,16	-0,27	-0,18	0,07			
РС	Vibrotransportor	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05	0,01			
	Vibrotransportor și conductă	0,099	0,03	-0,1	-0,04	-0,001	0,08			

TABELUL 2.3 INFLUENȚA VIBROTRANSPORTORULUI ȘI A CONDUCTEI DE GHIDARE ASUPRA SARCINII MASICE A GRANULELOR CE URMEAZA A FI SEPARATE

Poliamida se încarcă cu o cantitate mai mică de sarcină de semn negativ (sarcină masică medie este de -0,17 nC / g) la ieșirea din vibrotransportor. La ieșirea din conducta de

ghidare, sarcina masică este ușor mai mare, ajungând la valoarea -0,175 nC / g. Policarbonatul se încarcă cu sarcină de semn pozitiv după trecerea prin vibrotransportor, iar la ieșirea din conducta de ghidare, sarcina oscilează între polaritatea pozitivă și negativă, însă valorile sunt scăzute.

În orice caz, aceste valori nu influențează practic rezultatul separării, deoarece sarcina masică a fracțiilor separate, conform rezultatelor din paragraful 2.2.1, este de cel puțin 30 de ori mai mare.

#### Determinarea valorii optime a diferenței de potențial dintre electrozi

Mai multe experiențe preliminare au arătat că utilizarea unei diferențe de potențial mai mari de 30 kV poate cauza descărcări corona la muchiile electrozilor sau între electrozi și granulele încărcate cu sarcină, care compromit puritatea materialului separat. Aflarea valorii minime a diferenței potențialului dintre electrozi la care poate avea loc procesul de separare a fost realizată printr-o serie de experiențe asupra unui amestec granular balansat de PA și PC, la o valoare constantă a debitului de material. Procesul de separare a fost oprit după 60 de secunde și puritatea materialului a fost evaluată prin sortarea manuală a granulelor și cântărirea materialului colectat.

Experiențele au fost realizate pentru diferența de potențial dintre electrozi între 12 kV și 24 kV, în incremente de 2 kV (Fig. 2.20.). Scopul procesului de separare este de a avea două fracții cu puritate superioară valorii de 95%.



Fig. 2.20. Puritățile fracțiilor separate de PA și PC în funcție de diferența de potențial dintre electrozi.

Așadar, diferența de potențial minimă care poate fi folosită în experiențele viitoare este aleasă ca prima valoare la care puritatea este superioară valorii de 95%, în acest caz 20 kV.

## Determinarea valorii optime a debitului de alimentare cu material granular

Variația debitului de material a fost aleasă în jurul unei valori centrale, bazată pe observații empirice (punctul în care patul fluidizat este optim) în testele realizate la primele 2 seturi prezentate. Valoarea maximă a fost definită drept cea mai mare valoare a debitului de material la care nu apare fenomenul de "prea plin". Valoarea maximă observată a fost de 9 g / s, iar valoarea centrală la 6 g / s. În acest caz, valoarea minimă a debitului a fost aleasă la 3 g / s, pentru a avea un interval simetric de variație - util când se folosește metoda planificării active a experiențelor.

## 2.3.2. Modelarea procesului de separare cu metoda planificarii active a experiențelor

S-au realizat un număr total de trei planuri de experiențe, utilizând trei amstecuri granulare de proporții diferite. Domeniile de variație ale mărimilor de intrare alese sunt marcate în figura 2.21.



Fig. 2.21. Domeniul de variație ales pentru mărimile de intrare și procesele intilnite în afara domeniului.

Durata fiecărei experiențe este de 60 s, iar măsuratorile au fost realizate în punctele marcate pe figură 2.21. Fiecare plan de experiențe este compus din 11 experiențe, în centrul domeniului de variație (marcat cu o stea) realizându-se trei experiențe. Mărimile de ieșire au fost alese puritățile fracțiilor recuperate.

## Planul de experiențe compozit cu un amestec de compozitie 50 % PA - 50 % PC

Puritățile obținute pentru fracțiile recuperate în fiecare punct de măsură sunt prezentate în tabelul 2.4.

Nr. Crt.	Debitul de material D [g / s]	Diferența de potential U [kV]	Puritatea p <sub>PC</sub> [%]	Puritatea p <sub>PA</sub> [%]
1	3	20	94,7	82,3
2	9	20	94	97,7
3	3	32	99,6	96,5
4	9	32	95,6	97,8
5	3	26	97,8	90,2
6	9	26	97	97,2
7	6	20	97,3	94,2
8	6	32	99,5	98,2
9	6	26	97,8	94,8
10	6	26	98,8	95,3
11	6	26	97,2	95,6

TABELUL 2.4 PURITATEA FRACȚIILOR DE PA ȘI PC, PRIMUL PLAN DE EXPERIENȚE COMPOZIT

Modelele matematice ale răspunsurilor  $p_{PC}$  ( $R^2 = 0.858$ ,  $Q^2 = 0.103$ ) și  $p_{PA}$  ( $R^2 = 0.977$ ,  $Q^2 = 0.781$ ) sunt:

 $p_{PA}[\%] = 95.46 + 3.95D + 3.05U - 2.1D^{2} + 0.39U^{2} - 3.52DU$ (2.6)

$$p_{PC} [\%] = 98.33 - 0.91D + 1.45U - 1.52D^{2} - 0.53U^{2} - 0.82DU$$
(2.7)

Conform acestor modele, puritatea fracțiilor separate are valori între 84 % și 99,2 %, mai mari în cazul fracției de PC (Fig. 2.22.). Valorile maxime pentru PA sunt observate la valori mari atât ale tensiunii cât și ale debitului de material. În cazul PC, cele mai bune rezultate sunt obținute la cele mai mari valori ale diferenței de potențial dintre electrozi (32 kV) și pentru cele mai mici valori ale debitului de material (3 g / s).



Fig. 2.22. Curbele echipotențiale prezise de MODDE 5.0 pentru p<sub>PA</sub> (a) şi p<sub>PC</sub> (b), debitul de material D şi diferența de potenâial dintre electrozi U fiind exprimate în [g / s] respectiv [kV].

Puritățile scăzute pentru PA pot fi explicate prin faptul că masa și dimensiunea granulelor de PC sunt mai mici decât cele de PA și așadar sunt mai ușor antrenate de fluxul de aer, care le deplasează spre zona de colectare a fracției de PA. În ciuda diferenței de potențial crescută dintre electrozi, forțele de gravitate și cele aerodinamice sunt mai mari decât forțele electrice și granulele nu au suficient timp să iasă din acea zonă. Este astfel inevitabil că unele granule sunt colectate și identificate ca impuritate, chiar dacă nu sunt încărcate cu sarcină de polaritate opusă cu restul granulelor de același tip.

## Planurile de experiențe compozite cu amestecuri de compoziție 70 % PA - 30 % PC și 30 % PA - 70 % PC

Rezultatele acestor două planuri de experiențe sunt date în tabelul 2.5. Se observă, în unele cazuri, purități ale materialului colectat de peste 99%.

În cazul amestecului 30 % PA - 70 % PC, puritatea fracției PC este de aproape 100%, fapt ceea ce duce la anularea modelului, deoarece mărimea de ieșire este constantă. Același lucru poate fi spus despre fracția PA în cazul planului realizat cu amestec de compoziție 70 % PA - 30 % PC.

Valorile purității materialelor separate aflate în minoritate în compoziția amestecului granular nu sunt suficient de mari pentru fi considerate un succes (51,9...85,4 %).

Aceste valori scăzute pot fi explicate prin faptul că materialul aflat în minoritate încarcă prin triboelectrizare doar o parte a materialului aflat în majoritate, care este colectat cu o puritate de aproape 100%, în timp ce restul materialului majoritar este colectat la electrodul de polaritate opusă, împreună cu materialul aflat inițial în minoritate.

Debitul de		Diferenta de	30% PA -	70 % PC	30% PC - 70 % PA		
Nr. Crt.	material D [g / s]	potențial U [kV]	Puritatea p <sub>PC</sub> [%]	Puritatea p <sub>PA</sub> [%]	Puritatea p <sub>PC</sub> [%]	Puritatea p <sub>PA</sub> [%]	
1	3	20	>99	64	75,5	>99	
2	9	20	>99	84	62,3	>99	
3	3	32	>99	85,4	60	>99	
4	9	32	>99	84,7	68,4	>99	
5	3	26	>99	77	78,6	>99	
6	9	26	>99	85,5	52,2	>99	
7	6	20	>99	81,1	51,9	>99	
8	6	32	>99	81,5	53,1	>99	
9	6	26	>99	73,96	63,2	>99	
10	6	26	>99	54,3	68,2	>99	
11	6	26	>99	63,1	62,3	>99	

TABELUL 2.5 PURITATEA FRACȚIILOR DE PA ȘI PC, AL DOILEA ȘI AL TREILEA PLAN DE EXPERIENȚE COMPOZIT

## 2.3.3. Caracterizarea procesului de separare

## Studiul compoziției amestecurilor granulare binare de PA și PC

Rezultatele prezentate în tabelul 2.5. au condus la realizarea unei noi serii de experiențe ce au fost realizate și cu alte amestecuri disproporționate. Valorile debitului de material și a diferenței de potențial dintre electrozi au fost menținute la 6 g / s respectiv 26 kV. În cazul fiecărei experiențe, au fost măsurate puritățile fracțiilor recuperate, ca în figura 2.23.



Fig. 2.23. Puritățile fracțiilor recuperate în funcție de compoziția amestecului granular de separat.

Se observă că puritățile fracțiilor recuperate ating cele mai mari valori în cazul amestecurilor cele mai aproape de situația 50 % PA - 50 % PC, unde se atinge un maxim pentru ambele fracții.

Cu cât amestecul este mai disproporționat, cu atât puritatea materialului aflat în minoritate este mai mică, în timp ce materialul aflat în majoritate este recuperat cu puritate apropiată de, sau chiar 100 %.

## Evoluția purității în timp pentru două amestecuri disproporționate de PA și PC

Valorile masei și purității fiecărei fracții au fost colectate în recipiente diferite în incremente de 5 secunde pentru o durată de 30 de secunde (tabelul 2.6.), la un debit de alimentare de 6 g / s.

Tabelul 2.6 Evoluția masei și puritații fracțiilor recuperate din amestecuri de compoziție 40% PA - 60 % PC și 60% PA - 40 % PC

Amestec	40% PA - 60% PC						60% PA - 40% PC					
Timp [s]	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
m <sub>PC</sub> [g]	16,7	31,3	44,4	51,1	57,1	61,9	19,2	32	39	44,3	47,8	50,5
$m_{PA}[g]$	19,1	37,7	52,6	62,6	69,1	73,2	26,2	45,1	68,4	83,4	91,2	95,3
p <sub>PC</sub> [%]	89,22	95,52	97,92	100	98,33	95,8	85,86	79,68	88,57	82,45	91,14	82,59
p <sub>PA</sub> [%]	65,96	69,89	67,78	65	58,46	59,52	87,17	91	91,41	89,33	89,61	95,12

Valorile obținute sunt mai mari pentru materialul majoritar în amestec. Cât despre materialul aflat în minoritate, puritatea are valori ușor mai scăzute în comparație cu materialul majoritar din cauza aerului de fluidizare, care conduce granule străine în zona de colectare a fracției.

## Experiențe realizate prin achiziția de date în timp real

Figura 2.24. arată o curbă de evoluție tipică pentru fracțiile recuperate de PA și PC provenite dintr-un amestec granular de compoziție 50 % PA - 50 % PC.



Fig. 2.24. Evoluția fracțiilor recuperate de PA și PC pentru un amestec granular balansat separat în regim continuu de funcționare.

Evoluția este liniară, un fapt de așteptat, deoarece materialul ce intră în amestec poate ieși din separator doar sub formă de fracție separată.

În figura 2.25. au fost reprezentate pe același grafic curbele de variație a masei fracțiilor de separare obținute pentru diferite amestecuri. După cum se poate observa, cantitățile de material separat sunt mai mari dacă materialul se află în majoritate în amestec și sunt mai mici dacă materialul este minoritar. Curbele își mențin caracterul liniar în toate cazurile.

Cantitățile recuperate în cazul diferitelor amestecuri nu diferă mult între ele, obținându-se o cantitate totală recuperată de 338,3 g pentru amestecul 40 % PA - 60 % PC, 330,86 g pentru 50 % PA - 50 % PC și 323 g pentru 60 % PA - 40 % PC.



Fig. 2.25. Evoluția fracțiilor recuperate de PA (a) și PC (b) din diferite amestecuri granulare separate în regim continuu de funcționare.

Figura 2.26.a. indică o curbă de achiziție de sarcină tipică. Evoluția sarcinii este simetrică pentru cele două materiale recuperate. O noua curbă (Fig. 2.26.b), ce arată evoluția în timp a sarcinii masice, poate fi obținută prin împărțirea datelor achiziționate pentru masă la datele achiziționate pentru sarcină, menținând același timp de eșantionare.



Fig. 2.26. Sarcina (a) și sarcina masică (b) a fracțiilor separate de PA și PC în regim continuu de funcționare.

Se constată că valorile sarcinii masice se stabilizeaza după o perioadă de 20 s în jurul  $\pm$  12 nC / g, aproximativ la aceeași valoare obținută în regimul de funcționare intermitent.

## Concluzii

Puritatea materialului separat depinde în mare măsură de proporția fiecărei componente în amestecul granular. Materialul majoritar se separă cu puritate superioară celui minoritar.

Cele mai bune valori pentru puritate sunt obținute în cazul unui amestec în proporție 50% PA - 50% PC, la valori ridicate de tensiune și la debit scăzut.

În cazul unui amestec granular disporportionat rezultate bune ale purității se obțin după două separări succesive.

Sarcina masică a materialelor separate este invers proporțională cu tensiunea aplicată la electrozi. Un câmp electric mai intens înseamnă o dinamică mai bună a separării.

Evoluția sarcinii masice este relativ constanta în timp. După aproximativ 10 s granulele sunt încărcate electric suficient pentru a fi separate.

Puritățile obținute pentru amestecuri de 50% PC și 50% PA sunt în limitele impuse de industrie (95%). Randamentul separării este apropiat de 100%.

## Capitolul 3. Analiza regimurilor de funcționare ale separatorului tribo-aero-electrostatic pre-industrial

Separatorul prezentat în acest capitol este al doilea din categoria separatoarelor triboelectrostatice cu pat fluidizat construite în Laboratorul de Electrostatică Aplicată din Angouleme și are două variante constructive.

Prima variantă este echipată cu electrozi placă și reprezintă un "scale-up", a separatorul DISELF. A doua variantă constructivă reperzinta o dezvoltare a unui separator de laborator construit în LCEI și este echipată cu electrozi rotitori de tip bandă [47].

Cele două variante sunt construite pe același cadru și au același volum al camerei de triboelectrizare. Fluxul vizat de material procesat în cele două configurații este de 1 tonă / oră, de aceea separatorul s-a denumit separator tribo-aero-electrostatic pre-industrial (STAEL).

Capitolul 3 este împărțit în 3 subcapitole, în care se tratează următoarele subiecte:

- separatorul în varianta cu electrozi placă construcție, principiu de funcționare, experiențe preliminare și în timp real, experiențe prin metoda planificării active a experiențelor (subcapitolul 3.1.);
- separatorul în varianta cu electrozi bandă rotitori construcție, principiu de funcționare, experiențe de separare cu HIPS și ABS obținut din deșeuri de DEEE (subcapitolul 3.2.);
- bazele reglajului în buclă deschisă și închisă a separatorului cu electrozi bandă (subcapitolul 3.3.).

Construcția separatorului în varianta cu benzi rotitoare și a sistemului de comandă în buclă închisă au fost finanțate prin intermediul unui proiect de cercetare încheiat cu firma APR2, Bonnieres-Sur-Seine, Franța. De asemenea, această variantă constructivă este obiectul unui brevet de invenție înregistrat în Franța [32].

# 3.1. Separatorul tribo-aero-electrostatic pre-industrial cu electrozi placă paraleli

Problemele discutate în acest capitol sunt structurate în trei subcapitole, după cum urmează:

- descrierea instalației, a principiului de funcționare și aspecte despre construcția diferitelor subansamble - paragraful 3.1.1.;
- experiențe preliminare, experiențe în regim continuu și experiențe pentru a determină influența diferiților factori ce influențează procesul paragraful 3.1.2.;
- stabilirea modelului experimental al procesului de separare utilizând metoda planificării active a experiențelor.

Amestecurile granulare separate în experiențele realizate sunt PA și PC, cu caracteristicile descrise în paragraful 2.1.1. respectiv ABS și HIPS, conform figurii 3.1.

Material	ABS	HIPS	ABS		HIPS
Culoare	crem	negru	江南东北南部		MARKE
Formă	neregulată	neregulată			
Dimensiune maxima [mm]	34	34	New York		
Densitate $ ho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1020-1080	1020-1060	ななななない	10 mm	<b>SUBSCRIPT</b>
Permitiviate electrica	3 <mark>,13,4</mark>	2,52,6	A CONTRACTOR	H →	

Fig. 3.1. Caracteristicile materialelor granulare ABS și HIPS, clasa granulometrică [3...4] mm.

Forma neregulată a granulelor este datorată faptului că aceste materiale sunt obținute prin reciclarea deșeurilor de echipamente electrice și electronice de către firma APR 2.

Materialul obținut direct din echipamentele de măcinare ale APR 2 a fost clasat în laborator, folosind un dispozitiv de clasare granulometrica cu site. Prin acest procedeu s-au eliminat granulele cu dimensiuni mici (sub 1 mm) și s-a păstrat fracția 3...4 mm, prezentă în amestec în proporție de peste 90 %.

## 3.1.1. Principiul de funcționare și construcție

Standul experimental este compus din separatorul triboelectrostatic și aparatura conexă ce deservește separatorul (Fig. 3.2.). Aceste componente au rolul de alimentare (cu înaltă tensiune, aer sau material) sau măsură (masă, sarcină electrică).



Fig. 3.2. Standul experimental al separatorului tribo-aero-electostatic pre-industrial cu electrozi placă paraleli.

## Principiu de funcționare

Amestecul granular binar este introdus în camera de triboelectrizare prin partea superioară, de un vibrotransportor cu debit variabil. Se asigură în acest fel alimentarea continuă cu material a patului fluidizat creat la baza camerei de triboelectrizare printr-un dispozitiv de alimentare cu aer conectat la o turbosuflantă cu debit variabil. Sub acțiunea acestui pat fluidizat granulele se încarcă diferențiat prin ciocniri de tipul granulă-granulă sau granulă-perete în camera de triboelectrizare.

Doi electrozi placă (500 mm x 320 mm) alimentați de la două surse de înaltă tensiune de polaritate opusă crează un câmp electric intens (peste 2 kV / cm). Sub acțiunea acestuia, granulele încărcate cu sarcină sunt deviate spre electrozii placă și ies din camera de triboelectrizare sub acțiunea forței de greutate, prin două fante situate la baza electrozilor.

Materialul este mai apoi condus prin jgheaburi la două buncăre colectoare / cuști Faraday, așezate pe două balanțe electronice. În acest fel se măsoară simultan sarcina electrică a granulelor ce intră în cușcă și masa fracției separate.

## Construcție

Separatorul este construit din trei părți separate detașabile: ansamblul format de cei doi electrozi, ansamblul de alimentare cu aer și sistemul de colectare.

**Ansamblul electrozilor** (Fig. 3.3.), prin fixarea pe suportul separatorului, delimitează camera de triboelectrizare și separare de secțiune rectangulară.



Fig. 3.3. Ansamblul electrozilor placă, în reprezentare 3D.

Electrozii sunt confectionați din aluminiu iar suportul din PMMA. Prin culisarea pe suportul separatorului, electrozii pot fi apropiați sau depărtați, delimitând o cameră de triboelectrizare de volum variabil. Distanța minimă între electrozi este de 170 mm, iar cea maximă de 250 mm.

**Ansamblul de alimentare cu aer** este format din coloanele de fluidizare și divizorul de aer, conectate între ele prin conducte flexibile de PVC, conform figurii 3.4.



Fig. 3.4. Ansamblul de alimentare cu aer (a) și sectiune prin divizorul de aer cu 18 ieșiri (b).

Fixarea ansamblului se face pe suportul de PMMA al separatorului și poate culisa pe verticală, delimitând o cameră de fluidizare mai lungă sau mai scurtă.

**Sistemul de colectare** este format din două ansamble identice, câte unul plasat în dreptul fiecărui electrod, ca în figura 3.5. Ansamblele sunt construite din PVC și se pot detașa ușor de peretele camerei de fluidizare pe care sunt fixate.

Aparatura conexă utilizată în experiențele realizate cu separatorul este compusă din:

- un vibrotransportor model VIBRA FRANCE APB 4/30 cu modul de comanda;
- doua surse de inalta tensiune model GAMMA ES60N-20W respectiv ES60P-20W (aceleași ca în cazul DISELF);
- o turbosuflantă model SCL K06, 3 kW, FPZ Spa, Concorezzo, Italia, cu debit maxim la frecvența de 60 Hz de 300 m<sup>3</sup> / h, comandată de la un covetizor de frecvență pentru a obține debite variabile;

- două balanțe electronice KERN 440-47N 2000 g, rezoluție 0,1 g;
- două electrometre Keithley 6514;
- un PC cu instrument virtual specific, realizat de către autor în LabVIEW;
- două cuști Faraday, construite în laborator, care sunt folosite și pe post de buncăre de colectare.



Fig. 3.5. Reprezentări ale separatorului, cu ansamblele constructive principale.

Pentru achiziția de date s-a folosit un **instrument virtual** similar celui care achiziționează date de la două balanțe electronice, care permite citirea simultană a datelor de la 2 balanțe și de la 2 electrometre.

Interfațarea se face prin intermediul a două porturi seriale RS - 232 și prin intermediul portului GPIB, că în figura 3.6.





Achiziția de date se face pe patru canale, dar instrucțiunile sunt identice pentru balanțe și pentru electrometre. Practic, un electrometru și o balanță electronică lucrează împreună pentru fiecare fracție separată.

## Instrumentul virtual

Diagrama de instrucțiuni (Fig. 3.7.) poate fi împărțită structural în 3 module. Modulul 1 conține instrucțiunile de interfatara pentru un electrometru și o balanță. Electrometrul conectat prin GPIB, pe adresa specifică SCPI este configurat pentru măsurarea sarcinii (poate măsura de asemenea tensiune, rezistență și curent) și i se face un zero-check.





Modulele 2 și 3 sunt plasate într-o buclă while. Practic, cât timp condiția de validitate este adevărată (tot timpul, la terminalul acesteia este conectată o constantă booleană cu valoare True, se oprește la oprirea rulării IV-ului) se rulează buclat modulele 2 și 3.

Modulul 2 realizează citirea bufferului balanței. Deoarece nu fiecare șir citit este complet, se face un test pentru a determina măsurătoarea corectă, cu instrucțiunile care sunt în afara modulului 2. Măsurătoarea corectă condiționează rularea modului 3 care este pus într-o buclă condiție.

În acest modul se află instrucțiunile pentru citirea sarcinii (stânga), instrucțiunile pentru compunearea șirului text ce va fi scris în fișier (centru) și instrucțiunile de scriere în fișier și afișare pe panoul frontal - Fig. 3.8. (dreapta). Tot aici se resetează variabila ce conține bufferul balanței (dreapta jos), pentru a putea trece la următoarea operație fără întârzieri suplimentare.



Fig. 3.8. Panoul frontal al instrumentului virtual pentru o balanță și un electrometru.

Aceste instrucțiuni sunt dublate și pentru cealaltă balanță și celălalt electrometru. Deoarece echipamentele sunt identice, nu este necesară decât ajustarea adresării.

Metoda se pretează foarte bine la măsuratorile din laborator, fiind necesare mai puține operații de manipulare a datelor.

Folosirea diferitelor aparate atrage de la sine întârzierile specifice datorate timpilor de răspuns. Se pierde într-adevăr din timpul de eșantionare, obținându-se o frecventa de 4 măsurători / s, însă această frecvență este suficientă măsurătorilor vizate.

## 3.1.2. Experiențe în vederea stabilirii influenței diferiților factori

Experiențele realizate pe separator în această configurație au fost făcute cu două amestecuri granulare binare. Natura experiențelor este diferită și prin seturile realizate se urmărește caracterizarea procesului de separare din mai multe puncte de vedere.

Subcapitolul de față prezintă experiențe preliminare, experiențe de calibrare și experiențe unde se urmărește calitatea separaii, modificând diferite mărimi ce influențează procesul.

## A. Experiențe preliminare

Experiențele au avut ca obiectiv definirea domeniului de variație al diferiților factori care influențează procesul de separare și estimarea debitului de material maxim pe care poate să îl proceseze separatorul în regim continuu. Dintre aceștia, diferența de potențial dintre electrozi și volumul camerei de fluidizare s-au impus ca având efectele cele mai importante asupra rezultatelor separării.

Pe parcursul experiențelor s-a urmărit temperatura și umiditatea relativă a aerului ambiant. Valorile acestora s-au menținut cvasiconstante în intervalele [18..22] °C respectiv [30..40] % RH.

#### A1. Diferența de potențial între electrozi

Setul de experiențe realizat pentru determinarea intervalului de variație a acestui factor s-a făcut cu amestec granular 50 % PA - 50 % PC, cu o masă inițială de 1000 g. Motorul turbosuflantei s-a alimentat la frecvența de 50 Hz, pentru turația nominală de 3000 rot / min. Distanța d între sita aflată la baza camerei de triboelectrizare și electrozi (Fig. 3.10.) este de 6 cm. S-a considerat un interval de variație pentru diferența de potențial de [30...60] kV. Limita superioară este dată de valoarea maximă a tensiunii la care nu apar descărcări corona, iar valoarea minimă este dată de limita de 2 kV / cm.

Măsurătorile s-au realizat în regim intermintent, ceea ce presupune că materialul este încărcat în camera de triboelectrizare, iar apoi procesul de separare se desfășoară pe durata a 3 minute, timp suficient pentru finalizarea separării materialului granular.
Efectul tensiunii este cuantificat înregistrând masele și puritățile fracțiilor separate de PA și PC, conform tabelului 3.1.

U [kV]	m <sub>PA</sub> [g]	Рра [%]	m <sub>PC</sub> [g]	Р <sub>РС</sub> [%]
30	132,4	98,03	137	98,26
36	153,5	98,88	157,8	98,88
42	171,6	99,31	187,7	98,67
48	198,4	99,44	225,9	98,14
54	187,1	99,8	258	99,83
60	182,5	99,68	285,3	99,11

TABELUL 3.1. REZULTATELE EXPERIENȚELOR DE DETERMINARE A INTERVALULUI DE VARIAȚIE A DIFERENȚEI DE POTENTIAL INTRE ELECTROZI.

Se observă, în figura 3.9., că masa fracției de PA este destul de puțin sensibilă la modificarea tensiunii de alimentare, valorile cele mai mari, inregistrându-se la valori mari ale tensiunii de alimentare.



Fig. 3.9. Teste preliminare de separare: masele fracțiilor recuperate (a) și puritatea acestora (b) în funcție de tensiunea de alimentare a electrozilor.

În cazul fracției de PC, se observă o creștere aproximativ liniară a masei cu diferența de potențial dintre electrozi, la valoarea maximă a tensiunii (60 kV) obținându-se o masă de peste două ori mai mare decât în cazul în care electrozii sunt alimentați la o diferență de potențial de 30 kV.

Puritățile fracțiilor separate nu variază semnificativ cu modificarea tensiunii la bornele electrozilor, depășind în toate cazurile pragul de 98 %.

S-au observat în timpul experiențelor descărcări spontane la valori ale diferenței de potențial de peste 50 kV, datorate diferitelor subansable aflate la potențial flotant și prezenței

granulelor incărcate cu sarcină. De asemenea, s-au observat și descărcări corona locale, în exteriorul camerei de separare, identificate prin sunetul specific.

S-a ales intervalul [30...48] kV pentru realizarea experiențelor viitoare.

#### A2. Configurația camerei de triboelectrizare

Distanța d între baza inferioară a electrozilor și sita aflată la capătul coloanelor de fluidizare este un parametru important, deoarece este singurul care modifică volumul camerei de fluidizare (Fig. 3.10.).



Fig. 3.10. Secțiune longitudinală, detaliu: distanța d dintre baza inferioară a electrozilor și sită.

Experiențele s-au realizat în regim intermitent pentru distanța d = 4 cm cu amestecul granular 50 % PA - 50 % PC, cu două mase inițiale de material - 750 g respectiv 1000 g, la trei turații ale motorului turbosuflantei: {2500; 3000; 3600} rot / min, și o diferență de potențial între electrozi de 48 kV.

Debitul de aer la ieșirea din turbosuflantă a fost măsurat și este proporțional cu turația motorului (tabelul 3.2.).

Frecvență convertor	Hz	41,6	50	60
Turație motor	rot / min	2500	3000	3600
Debit aer la ieșire	$m^3 / h$	200	250	310
	1 / s	55,55	69,44	86,08

TABELUL 3.2. CARACTERISTICILE TURBOSUFLANTEI LA DIFERITE FRECVENȚE DE ALIMENTARE.

m [g]	n [rot / min]	m <sub>PA</sub> [g]	р <sub>РА</sub> [%]	m <sub>PC</sub> [g]	р <sub>РС</sub> [%]
	2500	186,2	99,73	194,2	99,3
750	3000	246,7	99,75	247,3	99,5
	3600	269,6	96,3	278,1	97,2
	2500	305,6	99,15	302,3	98,87
1000	3000	372,3	98	370,4	96,97
	3600	415	94,5	378,6	95,62

Rezultatele experiențelor sunt prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Masele și puritațile fracțiilor recuperate pentru  $d=4\ cm.$ 

Se observă că la creșterea turației (și implicit a debitului de aer), materialul se separă în proporții din ce în ce mai mari, până la 80% din material fiind separat în cazul cel mai bun - 1000 g, 3600 rot / min. Puritățile obținute sunt relativ constante, puțin mai scăzute la turații mari.

S-au realizat seturi de măsurători și pentru distanța d = 2 cm, însă cu rezultate slabe. Calitatea separării nu este corespunzătoare (sub 90 % puritatea fracțiilor separate) și cantitatea de material ce poate fi separată este scăzută.

S-a stabilit în experiențele viitoare distanța de 4 cm că fiind cea mai satisfăcătoare. S-a identificat și masa minimă de material de care separatorul are nevoie pentru a obține patul fluidizat, că fiind masa materialului rămas în camera de triboelectrizare după separarea în totalitate a amestecului granular. În cazul distanței de 4 cm, această valoare este 250 g.

#### **B.** Experiențe de calibrare

Prin acest set de experiențe s-a realizat calibrarea vibrotransportorului Vibra France APB 4/30 modificat, care s-a folosit la alimentarea în regim continuu. Configurația modificată a vibrotransportorului se referă la folosirea acestuia pe un suport echipat cu un buncăr de alimentare construit în laborator (Fig. 3.11.).

Debitul vibrotransportorului se reglează manual, prin intermediul potențiometrului de pe panoul de comandă, sau automat, prin furnizarea unui semnal industrial de 4...20 mA sau 0...10 V pe intrarea de comandă.

Experiențele s-au realizat cu amestecurile binare PA - PC și ABS - HIPS descrise anterior în paragraful 3.1.1. Determinarea debitelor s-a făcut folosind o balanță electronică și instrumentul virtual folosite în experintele cu DISELF.



Fig. 3.11. Standul experiemental pentru calibrarea vibrotransportorului: comanda prin potențiometru (a); comandă cu sursă variabilă de tensiune continuă (b).

Potențiometrul de comandă este gradat de la 1 la 10. Calculul debitelor s-a făcut pe fiecare poziție gradată a potențiometrului respectiv din volt în volt în cazul folosirii intrării de comandă industrială. Pentru fiecare punct de măsură din tabelul 3.4. s-a achiziționat masa de material transportat în 30 de secunde și s-a calculat debitul.

Com	andă prin potențioi	metru	Comandă prin semnal			
Poziție x <sub>p</sub> [-]	PA - PC D <sub>m</sub> [g / s]	ABS - HIPS D <sub>m</sub> [g / s]	Tensiune U [V]	PA - PC D <sub>m</sub> [g / s]	ABS - HIPS D <sub>m</sub> [g / s]	
1	0,4	0,45	1	0,8	0,8	
2	2,71	1,56	2	3,4	1,96	
3	6,46	3,74	3	7,1	4,18	
4	11,54	7,3	4	12,11	7,73	
5	18,77	9	5	19,35	9,2	
6	22,8	14,66	6	22,93	14,9	
7	23,18	15	7	23,11	15,21	
8	23,63	15,81	8	23,44	16,35	
9	24,26	16,23	9	24,3	16,82	
10	24,65	17,36	10	24,76	17,85	

TABELUL 3.4. DETERMINAREA DEBITULUI DE ALIMENTARE A VIBROTRANSPORTORULUI VIBRA FRANCE APB 4/30.

Se mentionează că rezultatele, în cazul ambelor materiale, sunt aproape identice fie folosind comanda prin potențiometru, fie folosind comanda prin semnal de tensiune continuă [0...10] V sau de curent [4...20] mA.

Diferența de debite între cele două materiale rezidă în forma granulelor, întrucât chiar dacă cele două amestecuri au densități apropiate, amestecul granular ocupă volume diferite.

Caracteristicile de ieșire ale vibrotransportorului  $D_m = f(x_p)$  și  $D_m = f(U)$  (Fig. 3.12.) au un puternic caracter neliniar.





În concluzie debitul se poate regla la fel de ușor prin reglaj prin potențiometru sau prin semnal de comandă, însă trebuie făcută referirea în permanență la caracteristicile de funcționare. Pentru fiecare amestec granular nou folosit, este necesară o recalibrare a vibrotransportorului pentru obținerea noii caracteristici.

#### C. Experiențe în regim continuu de funcționare

#### C1. Debitul de alimentare cu material

Alimentarea cu amestec granular în regim continuu se face respectând cantitatea necesară de material pentru a există pat fluidizat în care să se încarce granulele cu sarcină electrică, pentru a putea fi separate eficient. În felul în care funcționează separatorul, se poate porni de la premisa că debitul de material la intrare este același cu debitul de material la ieșire (suma debitelor fracțiilor separate). Modificarea debitului de material poate conduce la purități mai bune sau mai slabe ale fracțiilor separate.

**Primul set de experiențe** are în vedere caracterizarea regimului de funcționare continuu prin achiziția în timp real a masei și sarcinii electrice ale fracțiilor separate la trei

debite de alimentare cu material. Experiențele s-au realizat cu debitele {6,46; 18,77; 23,63} g / s, corespunzătoare pozițiilor 3, 5 și 8 ale potențiometrului vibrotransportorului.

Diferența de potențial dintre electrozi este 48 kV și turația turbosuflantei de 3000 rot / min, corespunzătoare unui debit de aer de 250 m<sup>3</sup> / h. Amestecul granular utilizat are compoziția 50 % PA - 50 % PC.

Evoulutia masei materialului separat în funcție de timp este prezentată în figura 3.13.



Fig. 3.13. Evoluția în timp a masei fracțiilor separate pentru trei debite de alimentare cu material.

Cum era de așteptat, la debitul de alimentare cel mai mic se separă cea mai scăzută cantitate de material. Caracteristica este liniară după 10 secunde, așadar se poate afirma că masa de material separat crește direct proporțional cu debitul de material la intrare.

Evoluția în timp a sarcinii masice este prezentată în figura 3.14.



Fig. 3.14. Evoluția în timp a sarcinii masice ale fracțiilor separate pentru trei debite de alimentare cu material.

În primele secunde se observă un vârf datorat sistemelor de măsură, iar de la secunda 10 până la finalul experienței, valorile se stabilizează.

Cea mai mare valoare a sarcinii masice,  $\pm 15$  nC / g, este obținută și pentru PA și pentru PC la cel mai mic debit - 6,46 g / s. Această valoare scade cu creșterea debitului. Fenomenul poate fi explicat prin faptul că la un debit scăzut, granulele sunt mai puține și numărul de coliziuni ce le suferă o granulă este mai mic decât în cazul unui debit crescut, când sunt mai multe granule în patul fluidizat.

Prin acest set de experiențe s-a concluzionat că indiferent de debitul de alimentare, procesul este unul liniar, însă cu creșterea debitului scade sarcina masică a fracțiilor separate, fapt ce poate conduce la purități din ce în ce mai scăzute, odată cu creșterea debitelor.

Al doilea set de experiențe are în vedere urmărirea evoluției purității în timp și calcularea unei purități finale a fracțiilor separate. Condițiile experimentale sunt aceleași ca la primul set, cu diferența că în loc de achiziție de date directă, materialul, la fiecare ieșire este colectat succesiv în 6 cutii schimbate din 10 în 10 secunde.

Astfel se poate urmări evoluția cantității de material separat pe durata experimentului la un timp de eșantionare de 10 s (Fig. 3.15). Curbele sunt similare celor obținute în figura 3.13.



Fig. 3.15. Evoluția în timp, cu un pas de eșantionare de 10 s, a maselor fracțiilor separate pentru trei debite de alimentare cu material.

Puritățile calculate pentru materialul din fiecare cutie după colectarea pe intervalul de eșantionare, împreună cu puritatea întregii cantități separate (media ponderată a celor 6 valori) s-au trecut în tabelul 3.5.

Matarial Debit		Puritatea calculată [%]								
[g / s]	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s	60 s	medie			
	6,46	99,01	98,6	99,77	99,64	99,86	99,9	99,66		
PA	18,77	98,68	99,43	99,69	99,37	99,55	99,31	99,44		
	23,63	96,3	99,46	99,16	99,2	98,53	98,51	98,81		
	6,46	100	100	100	100	99,9	100	99,98		
`PC	18,77	100	99,21	99,69	99,38	99,23	99,38	99,38		
	23,63	98,43	99,25	99,06	97,86	97,58	96,29	97,68		

TABELUL 3.5. PURITAȚILE CALCULATE PENTRU FRACȚIILE DE MATERIAL SEPARAT IN INCREMENTE DE 10 SECUNDE.

Se observă în general purități crescute în primele secunde, dar nu este o regulă generală - figura 3.16.



Fig. 3.16. Evoluția în timp (pas de eșantionare 10 s) a purității fracțiilor separate de: PA (a) și PC (b) pentru trei debite de material.

În toate cazurile însă (fac excepție 2 puncte de măsură), pentru ambele materiale, puritatea cea mai mare se regăsește la debitul cel mai mic, scăzând cu creșterea debitului, efect direct al unei încărcări mai slabe la debite mai mari de alimentare cu materia.

#### C2. Diferența de potențial dintre electrozi

Alimentarea electrozilor la înaltă tensiune pentru a obține un câmp electric uniform. se face prin conectarea lor la două surse, la aceeași valoare a tensiunii dar de polaritate opusă.

Alegerea unei valori pentru diferența de potențial este limitată superior de valoarea maximă furnizată de sursele de înaltă tensiune și de valoarea minima unde apare fenomenul corona sau apar descărcările sporadice, dar de neocolit între electrozi și componentele separatorului, aflate la un potențial electric flotant. Limita inferioară a tensiunilor de alimentare este dată în principiu de valoarea minimă a câmpului electric pentru care separarea se realizează în parametrii calitativi ceruți ai procesului de separare.

Setul de experiențe realizat are ca scop urmărirea rezultatelor separării prin achiziția în timp real a masei celor două produse ale separării, pentru trei valori ale diferenței de potențial. Valorile alese au fost {36; 48; 60} kV, limita superioară și cea inferioară respectând considerațiile anterioare. Restul parametrilor sunt menținuți la valorile: n = 3000 rot / min,  $D_m = 23,63$  g / s, compoziția amestecul granular 50 % PA - 50 % PC.



Prin prelucrarea datelor în urma achiziției se obțin graficele din figura 3.17.

Fig. 3.17. Evoluția maselor fracțiilor separate de PA (a) și PC (b) la trei valori diferite ale diferenței de potențial.

În cazul ambelor materiale separate se observă că după o perioadă de 20 s curbele sunt liniare, fapt care indică un proces stabil în timp. De asemenea, în cazul ambelor materiale, la valoarea de 60 kV a diferenței de potențial dintre electrozi se colectează cantitatea cea mai mare de material.

Într-adevăr, cu cât câmpul electric este mai intens cu atât mai multe granule sunt deviate spre electrozi, deoarece conform experienței C1 sarcina masică necesară pentru separare este mai scăzută decât în cazul unui câmp electric de intensitate mai mică. Masa materialului separat scade așadar cu scăderea în intensitate a câmpului electric între cei doi electrozi.

În ceea ce privește puritățile obținute la finalul experiențelor (tabelul 3.6) se înregistrează o creștere substanțială a valorilor cu creșterea diferenței de potențial de la 36 kV la 48 kV: creștere procentuală de 7 % pentru PA și de 12,55 % pentru PC. O creștere mai puțin pronunțată a purității este observabilă la creșterea tensiunii de la 48 kV la 60 kV.

Fracție	Puritatea calculată [%]				
	U = 36 kV	U = 48 kV	U = 60  kV		
PA	92.33	98.73	99.1		
PC	85.88	96.66	98.92		

TABELUL 3.6. PURITAȚILE FRACȚIILOR DE MATERIAL SEPARAT LA DIFERITE VALORI ALE DIFERENȚEI DE POTENȚIAL DINTRE ELECTROZI

#### C3. Debitul de aer

Prin modificarea debitului de aer se poate controla turbulența patului fluidizat și implicit procesul de triboelectrizare a granulelor. Setul de experiențe este constituit din trei experiențe de achiziție în timp real a masei fracțiilor de material separat, realizate la trei valori ale debitului de aer: {200; 250; 300} m<sup>3</sup> / h. Debitul de alimentare ales a fost de 23,63 g / s, diferența de potențial între electrozi de 48 kV, iar amestecul granular este compus din PA și PC în proporții egale.

Curbele de variație (Fig. 3.18) indică un proces stabilizat la toate cele trei valori ale debitului. Masele recuperate cresc cu creșterea debitului de aer.



Fig. 3.18. Evoluția în timp a cantităților separate de PA (a) și PC (b) la trei valori diferite ale debitului de aer de fluidizare.

Puritățile celor două fracții separate se încadrează între valorile de 94,32 % și 98,39 % fără a varia semnificativ cu modificarea debitului de aer.

Aceste rezultate, împreună cu cele prezentate la setul C2 s-au considerat ca bază pentru realizarea unui plan de experiențe (capitolul 3.1.3) având că intrări diferența de potențial dintre electrozi și debitul de aer.

#### C4. Compoziția amestecului granular

Pentru studierea influenței compoziției amestecului granular asupra separării s-au utilizat amestecuri sintetice binare de ABS și HIPS (Fig. 3.1) în următoarele proporții: 20 % ABS - 80 % HIPS, 30 % ABS - 70 % HIPS, 40 % ABS - 60 % HIPS, 50 % ABS - 50 % HIPS. Alimentarea cu material s-a făcut la un debit de 13,3 g / s, diferența de potențial intre electrozi a fost aleasă la valoarea de 36 kV, iar debitul de aer are valoarea 250 m<sup>3</sup> / h. Durata unei experiențe a fost de 60 s. Achiziția de date s-a făcut atât pentru masă, cât și pentru sarcina electrică a celor două fracții de separare.

Curbele de variație în timp ale sarcinii masice ale fracțiilor separate sunt reprezentate în figura 3.19. Valorile se stabilizeaza după o perioadă de aproximativ 20 s.



Fig. 3.19. Sarcina masică măsurată pentru diferite amestecuri granulare de ABS și HIPS.

In cazul fracției de HIPS se observă o stratificare clară a valorilor sarcinii masice. Pentru un amestec balansat (50 % ABS - 50 % HIPS) sarcina masică masurată este cea mai mare. Aceasta scade însa pe măsură ce amestecul este din ce în ce mai disporporționat și HIPS-ul este majoritar în amestecul inițial. Valoarea cea mai mică este obținută în situația 20 % ABS - 80 % HIPS, aproximativ 1 / 3 din valoarea obținută pentru un amestec balansat. Din cauză că în patul fluidizat mecanismul principal de triboelectrizare este ciocnirea între granule din material diferit, este de preferat un amestec cât mai balansat pentru obținerea celei mai bune încărcări pentru fiecare tip de material.

În concluzie, cu cât amestecul granular este mai disproporționat, cu atât materialul se electrizează mai puțin și cantitatea separată scade. Fenomenul este mai bine evidențiat în figura 3.20.



Fig. 3.20. Evoluția maselor fracțiilor separate de ABS și HIPS în cazul a 4 amestecuri granulare diferite:
20 % ABS - 80 % HIPS (a), 30 % ABS - 70 % HIPS (b),
40 % ABS - 60 % HIPS (c), 50 % ABS - 50 % HIPS (d).

Pentru un amestec puternic disporportionat (Fig. 3.20.a.) se observă o diferență mare între cantitățile de material colectate, materialul majoritar în amestec colectându-se mai bine. Cu cât amestecul este mai bine proporționat, cu atât diferența dintre fracțiile separate scade, ajungându-se în cazul 50 % ABS - 50 % HIPS să se măsoare o masă apropiată: 189,6 g fracția ABS și 202,2 g fracția HIPS.

Suma celor două fracții colectate, sau întregul material colectat, crește de la amestecul cel mai disproporționat la amestecul balansat (tabelul 3.7).

Amostoc	Masa materialului separat [g]					
Amestec	Fracția ABS	Fracția HIPS	Total			
20 % ABS - 80 % HIPS	109,9	245,2	345,1			
30 % ABS - 70 % HIPS	131,4	237,8	369,2			
40 % ABS - 60 % HIPS	167,8	221,3	389,1			
50 % ABS - 50 % HIPS	189,6	202,2	391,8			

 $TABELUL \ 3.7. \ MASELE \ RECUPERATE \ PENTRU \ DIFERITE \ AMESTECURI \ GRANULARE \ ABS \ - \ HIPS$ 

Desigur, după o funcționare îndelungată, nu se mai observă această diferență între cantitățile totale separate de la amestec la amestec. Procesul se stabilizeaza și masa finală a materialului separat va fi aceeași, diferențele observabile după 60 s fiind regăsite că impurități.

#### C5. Experiența de lungă durată în regim continuu

S-a folosit amestec granular cu cumpozitia 20 % ABS - 80 % HIPS. Alimentarea cu material s-a facut la un debit de 9 g / s, diferența de potențial între electrozi a fost aleasă la valoarea de 60 kV, iar debitul de aer are valoarea 250 m<sup>3</sup> / h. Durata experienței a fost stabilită la 5 minute, corespunzătoare, pentru acest debit, situației în care limita maximă a unei balanțe electronice este atinsă (2000 g).

Achiziția maselor produselor separate este exemplificată în figura 3.21. Se observă un proces stabilizat după primele 30 s, unde ambele mase au o evoluție liniară.



Fig. 3.21. Evoluția maselor fracțiilor recuperate pentru experiența de lungă durată.

Prin prelucrarea directă a datelor achiziționate a fost posibilă reprezentarea debitelor în funcție de timp din figura 3.22. Fiecare valoare a debitelor de ieșire a fost calculată pentru un interval de 10 secunde, obținându-se astfel o valoare mediată a debitului pe acest interval.

Urmărind variația curbelor de debit obținute la fiecare ieșire, se observă că procesul este cvasiliniar, în opoziție cu variația maselor la ieșire unde acest fapt este mai puțin observabil. Totuși, prin adunarea debitelor celor două ieșiri, se obține un debit al materialului separat, reprezentat în figură cu linie punctată (curba ABS + HIPS) care este mult mai liniar decât oricare din cele doua debite.



Fig. 3.22. Evoluția în timp a debitului de material la intrare și a debitului de material la ieșire.

După aproximativ 80 de secunde se poate spune că procesul s-a stabilizat, iar debitul de ieșire are aproximativ aceeași valoare cu cea a debitului de intrare, cu o ușoară creștere, nu mai mare de 5 %. Această diferență este datorată în principal faptului că în primele 80 de secunde s-a acumulat material în separator, care este separat pe parcurs ce se încarcă cu sarcină.

Această experiență pune în evidență caracterul stabilizat al procesului de separare și confirmă ipoteza funcționării separatorului în buclă deschisă.

# 3.1.3. Modelarea procesului de separare prin planificarea activă a experiențelor

În elaborarea acestui set de experimente s-a considerat ca fiind adecvat un plan de experiențe cuadratic cu două intrări și șase ieșiri. Mărimile de intrare considerate, din multitudinea de mărimi sau parametri care influențează procesul (Fig. 3.23), sunt: debitul de aer și diferența de potențial între cei doi electrozi. Metodele de cuantificare a mărimilor ce caracterizează procesul de separare permit evaluarea a șase mărimi de ieșire, și anume: masa, puritatiea și sarcina masică a celor două fracții separate.

Temperatura și umiditatea relativă a mediului ambiant s-au menținut la valorile de 18 °C respectiv 50 %. Amestecul granular utilizat are compoziția 50 % PA - 50 % PC. Timpul de desfășurare a fiecărei experiențe este de 60 s. Masa inițială de material, prezentă în separator înaintea alimentării este de 250 g, iar debitul de alimentare este menținut constant la valoarea de 23,63 g / s (corespunzător poziției 8 a potențiometrului vibrotransportorului), sau o masă adăugată de 1418 g în 60 s.



Fig. 3.23. Mărimile de intrare și mărimile de ieșire pentru procesul de separarea tribo-aero-electrostatică a amestecurilor binare PA - PC.

Domeniile de variație alese sunt: [36...60] kV pentru diferența de potențial și [200...300] m<sup>3</sup> / h pentru debitul de aer.

Tabelul 3.8. generat de utilitarul MODDE 5 conține experiențele realizate în cadrul planului și rezultatele măsurate.

Nr. Crt.	D <sub>a</sub> [g / s]	U [kV]	Masa PA m <sub>PA</sub> [g]	Masa PC m <sub>PC</sub> [g]	Puritate PA p <sub>PA</sub> [%]	Puritate PC p <sub>PC</sub> [%]	$\begin{array}{c} q_{PA}\!/m_{PA} \\ [nC \ / \ g] \end{array}$	$\frac{q_{PC}}{m_{PC}} \frac{q_{PC}}{m_{PC}}$
1	200	36	262,3	249,9	83,98	85,28	6,65	5,29
2	200	60	323,1	411,8	98,42	97,94	6,9	5,88
3	300	36	375	364,4	95,77	90,2	6,41	7,13
4	300	60	380,2	493,5	99,29	97,39	5,44	6,66
5	250	36	261,5	356,3	92	85,88	5,87	6,56
6	250	60	399,8	465,6	99,1	98,92	5,9	5,45
7	200	48	209	292,9	94,32	94,63	5,73	7,31
8	300	48	384,1	444,2	98,39	97,35	6,97	8,6
9	250	48	307,2	394,4	98,1	96,25	5,02	8,22
10	250	48	315,7	400,7	98,73	96,66	5,33	8,48
11	250	48	321,6	411,3	98,33	98,73	5,18	8,43

TABELUL 3.8. EXPERIENȚELE PROPUSE DE MODDE 5 PENTRU REALIZAREA PLANULUI CU 3 FACTORI ȘI 5

RASPUNSURI.

Pe baza rezultatelor din acest tabel sunt calculate funcțiile polinomiale pentru fiecare mărime de ieșire:

$$m_{PA} = 309,8 + 26,56 \cdot U + 44,68 \cdot D_{a} + 16,12 \cdot U^{2} - 2,95 \cdot D_{a}^{2} - 7,54 \cdot U \cdot D_{a}$$
(3.1)

$$m_{PC} = 401,86 + 51,46 \cdot U + 44,68 \cdot D_a + 6,7 \cdot U^2 - 20,24 \cdot D_a^2 - 5,79 \cdot U \cdot D_a$$
(3.2)

$$p_{PA} = 98.1 + 3.32 \cdot U + 2.23 \cdot D_a - 1.68 \cdot U^2 - 0.58 \cdot D_a^2 - 1.28 \cdot U \cdot D_a$$
(3.3)

$$p_{PC} = 97,02 + 4,13 \cdot U + 0,82 \cdot D_a - 2,09 \cdot U^2 - 0,7 \cdot D_a^2 - 1,26 \cdot U \cdot D_a$$
(3.4)

$$Q_{PA}/m_{PA} = 5,32 - 0,08 \cdot U - 0,05 \cdot D_{a} + 0,2 \cdot U^{2} + 0,47 \cdot D_{a}^{2} - 0,18 \cdot U \cdot D_{a}$$
(3.5)

$$Q_{PC} / m_{PC} = 8,27 - 0,15 \cdot U + 0,48 \cdot D_{a} - 1,13 \cdot U^{2} - 0,17 \cdot D_{a}^{2} - 0,28 \cdot U \cdot D_{a}$$
(3.6)

Masa fracțiilor de PA și PC este reprezentată sub forma unor suprafețe de răspuns, conform relațiilor 3.1 și 3.2 în figura 3.24.



Fig. 3.24. Cantitatile prezise pentru fractiile de PA și PC.

În cazul ambelor produse separate, variația masei recuperate are aproximativ aceeași alură, valorile cele mai mari obținându-se la debit de aer maxim și tensiune maximă. Poliamida se separă în cantități inferioare (între 230 g și 390 g) policarbonatului (între 250 g și 490 g).

Puritatea fracțiilor separate (Fig. 3.25) variază între 83,98 % și 100 % pentru PA și 85,3 % și 98,92 %, fiind puternic influențată de diferența de potențial dintre electrozi, și într-o mai mică măsură, pentru PC, de debitul de aer.



Fig. 3.25. Puritățile prezise pentru fracțiile de PA și PC.

Pentru măsurarea sarcinii electrice a fracțiilor separate s-au utilizat ca buncăre de colectare 2 cuști Faraday legate la câte un electrometru. Pentru fiecare fracție, valoarea sarcinii electrice după 60 s s-a împărțit la masa materialului colectat în cușca Faraday pentru a calcula sarcina masică.

Sarcina masică a celor două produse de separare este reprezentată sub formă de suprafețe de răspuns în figura 3.26. Este necesară menționarea faptului că reprezentarea

sarcinii este făcută fără a lua în considerare semnul, care este pozitiv pentru PA și negativ pentru PC.



Fig. 3.26. Sarcinile masice prezise pentru fracțiile de PA și PC.

Încărcarea cu sarcină electrică a unei mase de material este indicatorul direct al eficienței unui pat fluidizat. Un pat fluidizat eficient conduce, în principiu, la o separare performantă. În cazul celor două materiale se obțin indicații diferite. Suprapunând aceste curbe peste curbele de puritate, se poate spune că niciunul din materiale nu are nevoie de sarcina masică maximă pentru a fi separat cu puritate maximă.

Folosind modulul "Optimizer" al utilitarului MODDE se poate prezice punctul de funcționare cel mai favorabil separării. Stabilind drept criteriu de convergență "maximize" pentru masa și puritatea materialelor separate se obțin valorile de 287 m<sup>3</sup> / h pentru debitul de aer și 60 kV pentru diferența de potențial. Aceste valori caracterizează punctul optim de funcționare unde  $m_{PA} = 401,63$  g,  $m_{PC} = 496,54$  g,  $p_{PA} = 99,6$  %,  $p_{PC} = 97,5$  %. Sarcinile masice obținute la aceste valori sunt +5,7 nC / g pentru PA și -5,9 nC / g pentru PC, ceea ce indică încă o dată că un proces optim este cel în care materialul se încarcă la valori egale.

## 3.2. Separatorul tribo-aero-electrostatic cu electrozi bandă

### 3.2.1. Principiul de funcționare și construcție

Standul experimental este compus din separatorul triboelectrostatic și aparatura conexă ce deservește separatorul (Fig. 3.27). Aparatura conexă este aceeași că în cazul separatorului STAEL cu electrozi placă paraleli. Principiul de funcționare al separatorului este descris în paragraful 1.2.3.



Fig. 3.27. Standul experimental al separatorului tribo-aero-electostatic pre-industrial cu electrozi bandă.

Electrodul propriu-zis este banda rotitoare din ansamblul conveiorului. Cele două conveioare au fost fabricate la comandă de societatea Transmodul France, caracteristicile fiind marcate pe figura 3.28.



Fig. 3.28. Electrodul bandă rotitor: reprezentare schematică.

Benzile sunt angrenate de două motoare de 80 W de joasă turație, alimentate la rețeaua industrială de 400 V, 50 Hz, prin convertoare de frecvență.

Alimentarea la înaltă tensiune s-a realizat printr-un contact alunecător cu perie de grafit (Fig. 3.29.).



Fig. 3.29. Contactul de alimentare la înaltă tensiune a electrozilor bandă rotitori.

#### **3.2.2. Rezultate experimentale**

Amestecurile granulare utilizate în experiențele realizate sunt compuse din ABS și HIPS. Materialul este obținut prin măcinarea DEEE la societatea APR 2 și apoi clasat în laborator, obținându-se mai multe fracții granulometrice. Proprietățile sunt aceleași cu ale materialelor descrise în figura 3.1 cu mențiunea că dimensiunile fracției de față sunt între 0,7 și 1 mm pentru ambele materiale.

#### Determinarea masei optime de material

Experiențele de față s-au realizat cu amestecuri sintetice binare cu compoziția 50 % ABS - 50 % HIPS. Motorul turbosuflantei a fost alimentat la turația de 3600 rot / min, debitul aerului de fluidizare fiind 310 m<sup>3</sup> / h. Diferența de potențial dintre electrozi a fost fixată la 24 kV, iar viteza de rotație a benzilor este de 0,165 m / s.

Pe parcursul experiențelor s-a notat temperatura și umiditatea relativă a aerului ambiant. Valorile acestora s-au menținut cvasiconstante în intervalele [18..20] °C respectiv [30..40] % RH.

S-a investigat și influența umidității prin realizarea de experiențe cu materiale granulare ce au fost păstrate 24 h în prealabil în incinte ale căror umiditate relativă este controlată la valorile de 20 % respectiv 40 %.

Durata fiecărei experiențe este de 60 s. Cele două seturi de experiențe sunt prezentate în tabelul 3.9.

Umiditate relativă 20 %				Umiditate relativă 40 %			
Masa	Fracția re	ecuperată	Eficienta	Masa	Fracția re	ecuperată	Eficienta
inițială [g]	lă [g] ABS [g] HIPS [g] [%] inițial	inițială [g]	ABS [g]	HIPS [g]	[%]		
500	154,9	112,68	53,51	300	39,13	52,94	30,65
600	192,93	146,25	56,53	400	61,45	95,82	39,32
700	239,44	166,88	58,05	500	88,98	131,67	44,13
800	284,68	200,2	60,61	600	117,84	163,13	46,83
900	324,18	236,2	62,26	700	136,03	189,47	46,51
1000	369,4	276,75	64,62	800	160,57	217,62	47,27
1100	402,54	302,89	64,13	900	174,35	252,04	47,37
1200	437,04	325,92	63,58	1000	195,66	259,55	45,52
1300	470,14	352,56	63,29	1100	215,93	298,34	46,75

TABELUL 3.9. REZULTATELE EXPERIENȚELOR DE DETERMINARE A MASEI OPTIME DE MATERIAL INITIAL.

1400	458,74	450,18	64,92	1200	240,12	337,87	48,16
1500	533,78	417,08	63,39	1300	252,72	346,19	46,07
1600	589,76	456,16	65,37	1400	253,54	353,22	43,34
1700	614,21	484,75	64,64	1500	295,05	370,2	44,35

Granulele de HIPS s-au electrizat cu sarcină de semn negativ și au fost evacuate la electrodul pozitiv, în timp ce granulele de ABS s-au electrizat cu sarcină de semn pozitiv și au fost evacuate la electrodul negativ.

Eficiența este calculată ca suma maselor fracțiilor recuperate raportată la masa inițială a amestecului granular, în procente. Se observă o creștere ușoară a valorilor eficienței pe măsură ce masa inițială a amestecului granular este mai mare (Fig. 3.30.).



Fig. 3.30. Eficiența procesului de separare în funcție de masa inițială a amestecului granular și umiditatea relativă a materialului cu care s-au realizat experiențele.

Valorile eficienței obținute pentru o umiditate mai mică (20 %) a materialului sunt net superioare celor obținute pentru o umiditate crescută (40 %). Măsurătorile prezentate în continuare sunt realizate cu material granular cu umiditate relativa de 20%.

Masa optimă de material care se află în separator la orice moment este un indicator pentru dinamica procesului de separare în regim continuu de funcționare. Aceasta se poate alege la oricare din valorile pentru care eficiența este maximă (peste 1000 g în cazul materialului cu umiditate relativa de 20%).

#### Experiențe în regim continuu de funcționare

S-au făcut trei experiențe în regim intermitent de funcționare, utilizând trei amestecuri ABS - HIPS în proporții diferite. Diferența de potențial dintre electrozi este de 30 kV, debitul aerului de fluidizare de 310 m<sup>3</sup> / h, iar viteza de rotație a benzilor de 0,165 m / s. Durata fiecărei experiențe este de 60 s, înregistrată începând în momentul în care se pornește patul fluidizat.

Prima experiență utilizează 2000 g de material granular în porporție de 50 % ABS - 50 % HIPS (Fig. 3.31.).



Fig. 3.31. Evoluția în timp a masei fracțiilor separate pentr un amestec balansat de ABS și HIPS.

Se observă un proces de separare stabil, însă fracția de HIPS se recuperează semnificativ mai bine decât fracția de ABS. Primele 7 secunde indică timpul parcurs de primele granule evacuate de la formarea patului fluidizat până la recipientele colectoare.

Următoarele două experiențe utilieza 1500 g de material în amestecuri disproporționate (Fig. 3.32.).



Fig. 3.32. Evoluția în timp a masei fracțiilor separate pentr un amestec de 30 % ABS - 70% HIPS (a) și 70 % ABS - 30% HIPS (b).

În cazul fiecărui amestec, HIPS-ul se încarcă cu sarcină electrică mai bine decât ABSul fiind colectat în cantități mai mari, chiar și când nu este în minoritate. Aceste rezultate pot fi puse pe seama contribuției în triboelectrizare a pereților incintei de separare, care au încărcat ambele materiale cu sarcină de semn negativ. Această situație este în favoarea granulelor de HIPS care se încarcă prin triboelectrizare cu granulele de ABS tot cu sarcină de semn negativ și în defavoarea granulelor de ABS, care la contactul cu granulele de HIPS se încarcă cu sarcină de semn pozitiv.

# 3.3. Funcționarea automată a separatorului prin reglarea în buclă inchisă

Separatorul STAEL prezentat în cele două configurații, are o funcționare în regim continuu sau intermitent robustă, caracterizată prin evoluția liniară a maselor fracțiilor de material separat. Într-un proces industrial, însă, nu se poate controla compoziția amestecului granular care urmează a fi separat și se întâmplă frecvent ca proporțiile acestuia să varieze puternic în doar câteva secunde, afectând procesul de triboelectrizare și implicit procesul de separare. Se poate ajunge în situația de "prea plin" în care materialul nu reușește să iasă din incinta de separare, iar separatorul este alimentat în continuare cu material nou.

În acest fel a apărut ideea reglării în buclă închisă a separatorului, într-o primă fază într-o formă simplă, prin corelarea debitului de material la intrare cu debitele fracțiilor separate la ieșirea din separator.

Având în vedere considerațiile simple de la care se pleacă - debitul de intrare al materialului de separat să fie același cu debitul de ieșire (suma fracțiilor separate), principiul de funcționare al reglajului în buclă închisă are următoarele etape:

- preliminar se stabilesc valorile debitului de material la intrare D, debitului aerului de fluidizare D<sub>aer</sub>, viteza benzilor v, masa inițială de material din separator m<sub>0</sub> și diferența de potențial dintre electrozi U, pentru care se realizează separarea;
- procesul are loc pentru aceste valori prestabilite, nu se cunosc informații despre compoziția amestecului granular;
- se achiziționează în mod continuu şi în timp real masele fracțiilor separate.
   Instrumentul virtual calculează debitele la ieşire şi compară suma acestora cu debitul de intrare.
- dacă acestea sunt mai mari decât debitul de intrare, se crește debitul de intrare sau se micșorează viteza de rotație a benzilor.
- dacă suma debitelor la ieşire este mai mică decât debitul de intrare, se oprește temporar vibrotransportorul până când cantitatea de material existentă în surplus în separator iese că fracție separată.

Comanda tuturor echipamentelor se face prin intermediul unui instrument virtual creat în LabView.

Echipamentele prezentate în testele realizate în subcapitolele 3.1 și 3.2 sunt folosite în continuare alături de alte echipamente achiziționate special pentru acest obiectiv (Fig. 3.33.).



Fig. 3.33. Schema de principiu a sistemului de reglare în buclă inchisă a separatorului STAEL.

Lista completă de echipamente conține:

- separatorul tribo-aero-electrostatic STAEL;
- 2 surse de înaltă tensiune GAMMA, modele ES60N și ES60(P);
- vibrotransportor, model Vibra France APB/ 30;
- turbosuflantă model SCL K06, 3 kW, FPZ Spa, Concorezzo, Italia, comandată de la un convertor de frecvență Siemens Micromaster420, 4 kW;
- 2 convertoare de frecvență Siemens Sinamics G110 0,12 kW pentru comanda motoarelor electrozilor bandă;
- 2 balanțe electronice Kern 440-47N;
- 1 PC echipat cu instrument virtual dezvoltat în LabVIEW şi placă cu ieşiri V analog model Advantech PCI 1721 pentru comanda convertizoarelor şi a vibrotransportorului.

Schemele de alimentare ale tuturor echipamentelor sunt prezentate în anexe, figurile A1, forță, respectiv A2, comandă.

#### Concluzii

Rezultatele obținute cu acest separator confirmă posibilitatea de extindere a separatorului DISELF la nivel industrial.

Funcționarea în regim continuu este constantă în timp și se poate realiza în buclă deschisă dacă amestecul granular își păstrează omogenitatea și compoziția.

Funcționarea cu debite de alimentare mari duce la pierderea în calitate (puritate) a fracțiilor de separare.

Cele mai bune performanțe ale procesului de separare se obțin la: valori mari ale debitului de aer (pat fluidizat puternic turbulent), cantități scăzute de material în patul fluidizat (nr. de coliziuni / granulă crește), amestec balansat (încărcare optimă cu sarcină).

Varianta constructivă cu electrozi bandă se pretează la separarea granulelor cu dimensiuni sub 1,5 mm.

# Capitolul 4. Separatorul triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori

Separatorul prezentat în acest capitol este cel mai recent din seria instalațiilor triboaero-electrostatice construite în cadrul laboratoarelor LCEI și EEA. Experiența dobândită în construcția separatoarelor anterioare și rezultatele obținute pe acele separatoare au încurajat dezvoltarea acestui nou separator, denumit separator triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori (<u>s</u>eparateur <u>tribo-a</u>ero-<u>e</u>lectrostatique a <u>l</u>it fluidisé et <u>c</u>ylindres <u>t</u>ournants -STAEL-CT).

Acest separator a fost proiectat în cadrul LCEI și executat în colaborare cu societatea SINTEROM din Cluj-Napoca, principalele avantaje ale acestui separator constau în:

- geometria cilindrilor rotitori facilitează separarea prin asigurarea unui parcurs mai rapid al materialelor până la ieșire și în același timp elimină problemele aduse de unghiul de înclinație a benzilor - constrângerea unui raport între volumul camerei de triboelectrizare și lungimea benzilor;
- posibilitatea de a interschimba facil suprafețele cilindrice;
- electrozii de inaltă tensiune sunt ficși și alimentarea lor este mai simplă;
- granulele separate sunt în contact cu suprafețe neconductoare și procesul de descărcare este mai lent;
- posibilitatea de a obține un regim de funcționare cu 3 produse de separare.
- o construcție mai simplă și implicit un preț mai mic.

După realizarea practică a mai multor sisteme de aer și a diferitelor elemente conexe de etanșare, colectare, acționare și măsură, o caracteristică importantă a STAEL-CT este flexibilitatea: poate funcționa în regim intermitent sau continuu, cu sau fără colectarea unei fracții de mixt, în buclă închisă sau deschisă.

Capitolul 4 tratează următoarele subiecte:

- principiul de funcționare, descrierea instalației și istoricul și detaliile proiectării și construcției acesteia;
- regimul de funcționare continuu în buclă deschisă cu colectarea fracției de mixt;

Acest separator face obiectului brevetului de invenție intitulat **Procedeu** *și instalație de separare triboelectrostatică* în pat fluidizat inaintat la OSIM în februarie 2012.

Principalele revendicări sunt atât procedeul de separare, cât și instalația de separare, cu dispozitive inovante de alimentare cu aer și de extracție a materialului granular.

# 4.1. Standul experimental

Standul experimental este compus din separatorul triboelectrostatic, dispozitivele conexe și toatalitatea aparaturii care deservește sepratorul (Fig. 4.1.).



Fig. 4.1. Fotografie a standului experimental al separatorului triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori.

Aceste componente au rolul de:

- alimentare cu înaltă tensiune, aer sau material;
- comandă și reglaj aer, înaltă tensiune, debit de material, turație cilindri;
- măsură masă, sarcină electrică.

Separatorul triboelectrostatic este construit modular, pe un suport metalic ce permite interschimbarea facilă acestor module.

### 4.1.1. Principiu de funcționare și construcție

#### Principiu de funcționare

Separatorul triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori (Fig. 4.2.) realizează, asemănător celorlaltor instalații din familia STAEL, încărcarea cu sarcină electrică și separarea materialelor granulare în aceeași incintă.

Amestecul granular binar (componenta A + componenta B) este introdus în camera de triboelectrizare 1. Patul fluidizat este realizat prin alimentarea cu un flux de aer de fluidizare ascendent 2. Componentele amestecului granular se încarcă cu sarcină electrică de semn contrar prin ciocniri repetate sub acțiunea forței de ascensiune a aerului în acest pat fluidizat. Mecanismele de încărcare sunt preponderent ciocniri granulă-granulă, încărcarea se poate produce și prin ciocniri cu cu cilindrii rotitori, cu sita prin care se face admisia aerului de fluidizare sau cu pereții laterali ai camerei de triboelectrizare a separatorului.

Granulele neconductoare A și B, care s-au încărcat cu sarcină electrică de semn contrar sunt deviate spre electrozi 3, 4 sub acțiunea forței electrice exercitată de câmpul electrostatic generat între cei doi electrozi. Aceștia sunt alimentați cu tensiune pozitivă, respectiv negativă de la câte o sursă de înaltă tensiune pozitivă 5, respectiv negativă 6.

Granulele de tip A încărcate cu sarcină negativă, deviate spre electrodul pozitiv, se fixează pe suprafața cilindrului rotitor din material dielectric 7 ce se rotește peste electrod. De asemenea, granulele de tip B încărcate cu sarcină pozitivă sunt deviate spre electrodul negativ și fixate pe suprafața cilindrului rotitor 8 asociat electrodului.

Forța câmpului electric  $F_e$ , forța electrică imagine  $F_i$ , componenta normală a forței gravitaționale  $F_{gn}$  contribuie la fixarea granulei încărcate cu sarcină electrică pe suprafața cilindrului rotitor, în timp ce forța centrifugă  $F_c$  are tendința de a o desprinde. Dacă forța de frecare între granulă și suprafața cilindrului este mai mare decât componenta tangențială a forței de greutate  $F_{gt}$ , ganulele se fixează și sunt extrase din zona de triboelectrizare prin rotirea cilindrilor în sensuri contrare.

Desprinderea granulelor de pe suprafața cilindrilor rotitori se face la ieșirea lor din zona de câmp, sub acțiunea forței de greutate sau a periilor de ștergere 9, care îndeplinesc și rolul de a etanșa camera de triboelectrizare. Materialele astfel desprinse sunt colectate ca produse de separare în două recipiente.



Fig. 4.2. Separatorul triboelectrostatic cu pat fluidizat și cilindri rotitori: principiu de funcționare. 1 - cameră de triboelectrizare; 2 - aer de fluidizare; 3 electrod cilindric pozitiv; 4 - electrod cilindric negativ; 5 - sursă de înaltă tensiune de polaritate pozitivă; 6 - sursă de înaltă tensiune de polaritate negativă; 7 - cilindru rotitor neconductor asociat electrodului pozitiv; 8 - cilindru rotitor neconductor asociat electrodului negativ; 9 - perii de ștergere și etanșare; 10 - cameră de fluidizare; 11 - sursă de aer cu debit variabil; 12 - filtru.

Granulele de tip A și B, care în urma ciocnirilor repetate nu sunt încărcate cu suficientă sarcină pentru a fi separate, sunt evacuate din zona de triboelectrizare sub acțiunea fluxului de aer. Granulele evacuate pe această cale formează fracția de "mixt".

#### Construcție

Separatorul triboelectrostatic cu pat fluidizat *și* cilindri rotitori (STAEL-CT) îmbunătățește separatorul STAEL prin înlocuirea electrozilor de tip bandă metalică cu electrozi de formă sector cilindric, ficși, în jurul cărora se rotesc cilindri din material izolant, transformarea sistemului de alimentare cu aer într-un sistem secvențial modular, simplificarea sistemului de etanșare prin înlocuirea lamelelor cu perii din material plastic și posibilitatea de a obține un regim de funcționare cu fracție "mixt" pentru a evita situația de "prea plin" (blocarea patului fluidizat).

Proiectarea separatorului s-a realizat având la bază aceste idei. Pentru desenarea pieselor și realizarea ansamblelor 3D s-a apelat la softul de proiectare mecanică SolidWorks 2009.

Separatorul este alcătuit, structural, din trei ansamble: ansamblul celor doi electrozi de tip sector cilindric și cilindrii rotitori din material izolant, dispozitivul de alimentare cu aer și suportul (Fig. 4.3.).



Fig. 4.3. Reprezentarea 3D a ansamblelor separatorului: electrozi cu cilindri rotitori și motoare de angrenare (a); dispozitiv de alimentare cu aer (b); suport cu buncăre de colectare (c) cele trei ansamble compuse (d).

Primele piese proiectate și construite au fost cele *două ansamblele formate din electrod sector cilindric și cilindru rotitor din material izolant* (Fig. 4.4.).

Două probleme de rezolvat în proiectarea acestui ansamblu au fost alimentarea electrodului de la sursa de înaltă tensiune și rotirea cilindrului izolant în jurul electrodului. Este necesar așadar de a avea două ansamble pe acelsi suport: unul fix, format piesele care

susțin și stabilesc poziția electrodului și unul mobil, format din pesele care susțin cilindrul rotitor și permit rotirea lui în jurul electrodului.

Ansamblul electrodului este format din țeava suport 8, pe care sunt fixate cele două bucșe 7, cu suporții electrodului 6, pe care este fixat electrodul 9, realizat din tablă de aluminiu de 0,5 mm grosime.



Fig 4.4. Ansamblul electrod - cilindru rotitor: reprezentare isometrica (a); vedere longitudinală (b); reprezentare explodată. 1 - piuliță; 2 - fulie; 3 - rulment; 4 disc suport cilindru; 5 - inel suport cilindru; 6 - suport electrod; 7 - bucşă; 8 - țeavă suport; 9 - electrod; 10 - suport disc; 11 - cilindru rotitor.

Ansamblul cilindrului este format din cilindrul rotitor 11 cu suporții lui - unul de angrenare și celălalt condus. Suportul de angrenare este format din disc 4 cu inel 5 și fulie 2 cu rulment 3 încastrat. Suportul condus este format din disc 4 cu inel 5 și suport disc 11 cu rulment 3 încastrat. Piesele ce compun suporții sunt fixate între ele prin șuruburi din material izolant (PVC și PA 6) sau prin lipire.

Pereții separatorului au rolul de a fixa ansamblul electrod - cilindru rotitor. Aceștia au practicate orificii de formă alungită în care se încastrează bucșele, permițând modificarea dinstantei dintre cilindrii rotitori, între 40 mm și 100 mm. După stabilirea poziției unghiulare a electrozilor, întreg ansamblul este fixat pe poziție prin stringerea cu două piulițe 1.

În acest mod se realizează fixarea suportului electrodului, în timp ce suportul cilindrului se poate roti în jurul axei sale, angrenat, printr-o curea, de un motor cu turație variabilă. Alimentarea electrozilor se face prin țevile suport de la fiecare ansamblu și un conductor flexibil care leagă electrodul de țeava suport.

**Suportul separatorului** (Fig. 4.4.c) este compus din: pereții de PMMA în care sunt încastrate ansamblele electrod-cilindru rotitor și structura metalică din aluminiu. Pe suport se fixează dispozitivul de alimentare cu aer, motoarele de angrenare ale cilindrilor, și buncărele de colectare pentru materialul separat.

**Dispozitivul de alimentare cu aer** (Fig. 4.3.b) este prezentat în detaliu în capitolul 4.1.2. în mai multe variante.

Standului experimental (Fig. 4.5.) conține, pe lângă separatorul electrostatic un număr de alte echipamente care îl deservesc, care pot fi grupate în trei categorii: echipamente de alimentare, echipamente de comandă și reglaj și echipamente de măsură.

Echipamentele de alimentare se referă la aparatura ce asigură:

- alimentarea cu material granular, cu debit reglabil, realizată cu un vibrotransportor electro-magnetic realizat în cadrul LCEI, care are atașat un buncăr din material plastic;
- alimentarea cu înaltă tensiune a electrozilor, de la două surse de înaltă tensiune identice. S-au folosit în acest caz surse electronice stabilizate de polaritate reversibilă GAMMA ±100 kV, 300W ce lucrează în comutație;
- alimentarea cu aer pentru crearea patului fluidizat, asigurată de la o turbosuflantă cu debit variabil intre 11,5 și 140 m<sup>3</sup> / h.

**Echipamentele de comandă și reglaj** au rolul de a modifica parametrii separatorului ce nu țin de geometria acestuia. Aceste echipamente sunt:

- 3 autotransformatoare 230V, 5A. Două dintre ele, împreună cu două punți redresoare cu diode, sunt folosite pentru a regla turația motoarelor ce angrenează cilindrii rotitori. Se obține domeniul de variație al turației cilindrilor între 6 și 30 rot / min. Acest domeniu se poate extinde prin schimbarea raportului de transmisie sau prin schimbarea motoarelor. Al treilea autotransformator este folosit pentru a modifica amplitudinea vibrațiilor vibrotransportorului, prin intermediul tensiunii de alimentare a bobinei electromagnetului. Se poate controla în acest fel, debitul de material cu care este separatorul;



Fig. 4.5. Separatorul triboelectrostatic cu cilindri rotitori și aparatura conexă: reprezentare schematică a standului experimental.

- convertorul de frecvență Siemens Micromaster 420, 2,2 kW, care acționează motorul turbosuflantei modificând turația acestuia prin frecvențe variabile (0...60 Hz). Debitul de aer este proporțional cu turația elicelor turbosuflantei;
- sursele de înaltă tensiune intră și în aceasta categorie, însă reglarea tensiunii se face cu ajutorul unui potențiometru de pe panoul frontal;
- un panou de comandă, pe care sunt plasate trei întrerupătoare cu care se pornesc / opresc independent alimentarea motoarelor ce acționează cilindrii, alimentarea surselor de înaltă tensiune și alimentarea vibrotransportorului. Tot pe panou mai este montat convertorul de frecvență și un transformator de 230/24 V, 10 A pentru alimentarea motoarelor. Panoul facilitează astfel manipularea standului.

Echipamentele de măsură sunt folosite pentru măsurarea și achiziția masei și a sarcinii electrice a fracțiilor de separare. Pentru măsurarea masei sunt folosite două balanțe electronice KERN PCB-1000-1, 1000 g, rezoluție 0,1 g. Pentru măsurarea sarcinii se folosește o cușcă Faraday construită în laborator, conectată prin intermediul unui cablu BNC dublu ecranat la un electrometru Keythley 6514, 0..200  $\mu$ C. Pentru achiziția de date se mai folosește un PC cu un instrument virtual de achiziție realizat de autor.

#### 4.1.2. Sistemul de alimentare cu aer

În cazul separatoarelor tribo-aero-electrostatice descrise în capitolele 2 și 3 materialul odată intrat, nu poate ieși decât că material separat. De asemenea, alimentarea cu material a separatorului se face pe toată lungimea camerei de triboelectrizare..

În cazul separatorului STAEL-CT, camera de triboelectrizare și separare este delimitată de cilindrii rotitori din material izolant, pereții separatorului și sită dispozitivului de alimentare cu aer. Amestecul granular este introdus la un capăt al camerei de triboelectrizare și separare, apoi sub acțiunea patului fluidizat, materialul se deplasează de-a lungul camerei și iese din separator ca fracție separată colectată de fiecare electrod sau ca mixt neseparat prin capătul opus alimentării.

Paragraful de față tratează construcția dispozitivului de alimentare cu aer și descrie componentele întregului sistem de aer.

#### Descriere
Sistemul de alimentare cu aer conține ansamblul componentelelor care intră în lanțul de echipamente ce asigură alimentarea cu aer și producerea patului fluidizat. Componentele principale ale sistemului sunt schematizate în figura 4.6.:



Fig. 4.6. Componentele sistemului de alimentare cu aer: schema generală (a) și principial (b).

În funcționarea la turație nominală, alimentată direct de la sistemul trifazat industrial 400 V, 50 Hz, turbosuflantă are debitul de ieșire de 140  $m^3$  / h.

Pentru a obține debite variabile, motorul turbosuflantei s-a alimentat de la rețeaua trifazată printr-un convertizor de frecvență. S-a măsurat o curbă de variație între frecvența indicată de convertizor și debitul la ieșire (Fig. 4.7.).



Fig. 4.7. Debitul de aer la iesire vs frecvența la care este alimentat motorul turbosuflantei.

Din primele măsurători cu o machetă a dispozitivului de alimentare cu aer s-a observat că dacă se păstrează o singură cale de aer, debitul maxim obținut de la turbosuflantă nu poate fi distribuit uniform pe toată secțiunea bazei patului fluidizat (aprox. 20 mm x 250 mm), pentru granule de dimensiuni între 1..2 mm.

Pentru a controla fluxul de aer mai ușor, s-a decis construirea unui sistem care împarte fluxul de aer în mai multe jeturi mai subțiri. În acest fel, jeturile sunt mai ușor de controlat și fluidizat, iar dispunerea lor de-a lungul unei axe poate acoperi distanța necesară de 250 mm (Fig. 4.6.b.).

#### Divizorul de aer

Acest dispozitiv împarte fluxul de aer de la turbosuflantă în 6 fluxuri identice. Divizorul de aer (Fig. 4.8.) a fost conceput utilizând softul SolidWorks 10 și este realizat din aluminiu masiv.

Forma acestuia este conică (Fig. 4.8.b.), cu 6 găuri radiale, la unghiul de 60° una față de cealaltă. Găurile au două secțiuni: la intrare  $\phi = 12$  mm (aprox. de secțiune 1/6 din secțiunea conductei de la turbosuflantă) și la ieșire, la bază conului,  $\phi = 16$  mm pentru a permite conectarea unor țevi de cupru de diametru interior 12 mm și diametru exterior 16 mm.





Fig. 4.8. Ansamblul divizor de aer și conductele de legătură cu dispozitivul de alimentare cu aer (a) și divizorul propriu-zis, în secțiune și vedere 3D (b).

Pe țevile de cupru sunt montate conductele flexibile ce fac legătura mai departe cu dispozitivul de alimentare cu aer al separatorului.

## Dispozitivul de alimentare cu aer

Ansamblul denumit astfel este compus din mai multe componente:

- camera de divizare a fluxurilor de aer;
- elementele de etanşare;
- sita, la baza superioară a camerei de fluidizare;
- conductele flexibile.

Acest dispozitiv are rolul de a asigura distribuția egală a fluxurilor de aer pe toată suprafața activă și de a crea patul fluidizat în incinta de separare.

S-au construit trei variante de camere de fluidizare, prezentate în figura 4.9.



Fig. 4.9. Camera de fluidizare: cu coloane de secțiune 20 mm x 20 mm (a); cu coloane de secțiune 20 mm x 20 mm înclinate la 80°; cu coloane trapezoidale (c).

Prima variantă (Fig. 4.9.a.) are 6 coloane de fluidizare de secțiune 20 mm x 20 mm. Între două coloane alăturate se află un spațiu asemănător, de aceeași secțiune, însă inactiv. Astfel se realizează distribuirea aerului de fluidizare pe o lungime de 220 mm. Coloanele inactive sunt acoperite la partea superioară cu rampe ce conduc materialul granular spre zonă activă. A două variantă (Fig. 4.9.b.) realizează orientarea preferențială spre ieșire a granulelor din patul fluidizat prin modificarea unghiului pe care îl fac coloanele cu planul sitei, la 80°, nu perpendicular, ca la variantă precedentă.

S-au obținut rezultate relativ bune cu aceste două sisteme, inconvenientul celor două versiuni este că se ajunge, destul de rapid, la blocarea patului fluidizat. Suprafața de contact între granule și dispozitivul de alimentare cu aer este crescută de rampele ce acoperă zonele inactive, iar materialul electrizat se lipește în aceste zone. Fluxul de aer nu reușește să dezlipească granulele lipite de rampe și materialul se acumulează treptat până când toate zonele active sunt acoperite. Etanșarea la aceste două variante a fost făcută cu fișîi de carton, soluție care s-a dovedit a fi destul de ineficientă.

A fost necesar să se conceapă un sistem nou, unde zonele inactive să fie mult mai mici în comparație cu zonele active. Astfel, materialul granular care se află deasupra sistemului de alimentare cu aer să se afle tot timpul în pat fluidizat. Cel de-al treilea dispozitiv (Fig. 4.9.c.) elimină zonele inactive prin construcția coloanelor active sub formă de prisme trapezoidale. Astfel se acoperă o suprafață la ieșire de 240 mm x 20 mm, iar zonele inactive sunt neglijabile.

Ultima variantă constructivă îndeplinește cerințele necesare asigurării unui pat fluidizat pentru electrizarea eficientă a amestecului granular, este cea mai performantă și a fost păstrată în măsuratorile prezentate în capitolul 4.2. Ca etanșare, în acest caz, au fost folosite două perii, interpuse pe fiecare margine a dispozitivului ce mărginește cilindrii rotitori.

#### Funcționare

Principiul de funcționare a separatorului este descris în paragraful 4.1.1. Patul fluidizat se crează la nivelul celor 6 ieșiri, între cei doi cilindri rotitori din material izolant ce se rotesc în jurul electrozilor. Materialul alimentat la un capăt al camerei de triboelectrizare se deplasează pe întreaga lungime a camerei și iese fie ca fracție separată, fie ca material mixt. Reprezentarea mișcării granulelor în patul fluidizat este realizată schematic în figura 4.10.



Fig. 4.10. Reprezentarea schematică a funcționării patului fluidizat, vedere secționată, la un singur electrod.

# 4.2. Regimul de funcționare cu colectarea fracției de mixt

Funcționarea separatorului cu pat fluidizat și cilindri rotitori, așa cum a fost descrisă în subcapitolul 4.1.1., este posibilă în două moduri: cu colectarea fracției de mixt prin evacuarea materialului granular neseparat pe la capătul camerei de triboelectrizare și separare sau fără colectarea fracției de mixt, prin obturarea capetelor camerei de triboelectrizare și separare.

În primul caz, materialul granular electrizat insuficient pentru a fi separat iese din cameră de triboelectrizare și separare sub acțiunea fluxului de aer.

Amestecurile folosite au fost, ca și în celelalte cazuri, constituite din poliamidă și policarbonat în diferite proporții. Aspectul și caracteristicile acestor materiale sunt prezentate în figura 2.15.

# 4.2.1. Modelarea procesului de separare prin metoda planificării active a experiențelor

În elaborarea acestui set de experimente s-a considerat ca fiind adecvat un plan de experiențe cuadratic cu trei intrări și cinci ieșiri. Variabilele de intrare considerate, din multitudinea de mărimi fizice sau parametri care influențează procesul (Fig. 4.11.), sunt: debitul de material, debitul de aer - reprezentat prin frecvența de alimentare a turbosuflantei, cu care debitul este proporțional și diferența de potențial între cei doi electrozi. Metodele de cuantificare a mărimilor ce caracterizează procesul de separare permit evaluarea a cinci mărimi de ieșire, și anume: masele și puritățile celor două fracții separate și eficiența procesului.



Fig. 4.11. Mărimile de intrare și mărimile de ieșire pentru procesul de separarea tribo-aero-electrostatică a amestecurilor binare PA - PC.

Domeniile de variație alese sunt: [3,5...7,5] g / s pentru debitul de material, [35...45] Hz pentru frecvența la care se alimentează motorul turbosuflantei și [40...52] kV pentru diferența de potențial între electrozi.

În cazul ieșirilor, eficiența procesului n se definește ca raportul dintre cantitatea de material separată și cantitatea totală de material introdus:

$$n = \frac{m_{PA} + m_{PC}}{D_{m} \cdot \Delta t} \cdot 100 \ [\%]$$
(4.1)

unde

- m<sub>PA</sub> [g] este masa fracției de PA;

- m<sub>PC</sub> [g] este masa fracției de PC;

-  $D_m [g / s]$  este debitul de material cu care se alimentează separatorul;

-  $\Delta t$  [s] este intervalul de timp în care se desfășoară procesul de separare.

Tabelul 4.1. generat de utilitarul MODDE 5 conține experiențele realizate în cadrul planului și rezultatele măsurate.

Tabelul 4.1. Experiențele propuse de modde 5 pentru realizarea planului cu 3 factori și 5  $\,$ 

D۸	SD.	LINI	CIT	DI
n P	1.7E	UIN	эсл	NΙ.

Nr. Crt.	D <sub>m</sub> [g / s]	U [kV]	f [Hz]	Masa PA m <sub>PA</sub> [g]	Masa PC mPC [g]	Puritate PA p <sub>PA</sub> [%]	Puritate PC p <sub>PC</sub> [%]	Eficiența n [%]
1	3.5	40	35	63.49	65.02	99.84	99.89	60.36
2	7.5	40	35	162.41	144.52	99.36	99.03	65.56
3	3.5	52	35	69.27	75.23	96.24	96.03	68.02
4	7.5	52	35	183.44	164.76	97.05	95.98	77.09
5	3.5	40	45	67.03	68.4	98.86	99.78	66.77
6	7.5	40	45	171.1	142.28	99.99	99.73	68.28
7	3.5	52	45	78.14	82.01	98.2	96.04	70.79
8	7.5	52	45	176	164.29	97.33	95.53	75.65
9	3.5	46	40	72.16	72.93	98.73	98.12	67.56
10	7.5	46	40	183.71	170.71	98.17	98.04	78.64
11	5.5	40	40	118.99	116.37	98.76	98.91	70.82
12	5.5	52	40	113.88	131.77	96.66	96.02	69.59
13	5.5	46	35	108.59	115.23	99.36	97.96	69.06
14	5.5	46	45	118.06	113.6	98.73	97.97	67.26
15	5.5	46	40	100.54	105.87	95.65	96.19	61.6
16	5.5	46	40	106.05	123.41	96.83	99.19	69.4
17	5.5	46	40	100.5	103.81	99.1	97.97	60.77

Pe baza acestui tabel sunt calculate ecuațiile modelului experimental pentru fiecare mărime de ieșire:

$$m_{PA} = 109.54 + 41.63 \cdot D_m + 2.9 \cdot U + 1.95 \cdot f + 5.42 \cdot D_m^2 + 2.31 \cdot U^2$$

$$+0.47 \cdot f^{2} + 1.78 \cdot D_{m}U - 1.56 \cdot D_{m}f - 0.77 \cdot Uf$$
(4.2)

 $m_{_{PC}} = \! 116.64 + 33.48 \cdot D_{_{m}} + 6.55 \cdot U + 0.46 \cdot f + 0.68 \cdot D_{_{m}}^2 + 0.2 \cdot U^2$  $-2.3 \cdot f^{2} + 1.02 \cdot D_{m}U - 0.68 \cdot D_{m}f - 0.29 \cdot Uf$ (4.3)

$$p_{PA} = 97.7 - 0.91 \cdot U + 0.01 \cdot f + 0.11 \cdot D_m^2 + 0.03 \cdot U^2 + 0.36 \cdot f^2 - 0.08 \cdot D_m U + 0.05 \cdot D_m f + 0.18 \cdot Uf$$
(4.4)

(4.4)

$$p_{PC} = 97.83 - 0.12 \cdot D_{m} - 1.41 \cdot U + 0.04 \cdot f + 0.09 \cdot D_{m}^{2} - 0.16 \cdot U^{2} + 0.02 \cdot f^{2} + 0.03 \cdot D_{m}U + 0.01 \cdot D_{m}f - 0.07 \cdot Uf$$
(4.5)  
$$n = 67.09 + 2.53 \cdot D_{m} + 2.31 \cdot U + 0.51 \cdot f + 1.35 \cdot D_{m}^{2} + 0.71 \cdot U^{2} - 0.4 \cdot f^{2} + 0.61 \cdot D_{m}U - 0.54 \cdot D_{m}f - 0.91 \cdot Uf$$
(4.6)

Aceste funcții se pot reprezenta mai departe sub forma unor suprafețe de răspuns. Din cauza faptului că sunt considerate trei mărimi de intrare, reprezentarea fiind limitată la două dintre ele, aceste curbe se vor prezenta sub forma unor familii de grafice, la trei valori diferite ale frecvenței.

Pentru fracția de PA, suprafețele de răspuns conform relațiilor 4.2 și 4.4 sunt prezentate în figura 4.12.:



Fig. 4.12. Suprafețele de răspuns pentru masa (a) și puritatea (b) fracției de PA.

În figura 4.13. sunt prezentate suprafețe similare pentru fracția de PC pe baza relațiilor 4.3 și 4.5.



Fig. 4.13. Suprafețele de răspuns pentru masă (a) și puritatea (b) fracției de PC.

În cazul ambelor produse separate, masa recuperată are aceeași alură la frecvențe diferite. Acest lucru înseamnă că procesul de separare este puțin influențat de variația debitului de aer pe domeniul ales.

În cazul poliamidei, masa recuperată nu este influențată major decât de debitul de material, masa recuperată fiind mai mare la debite mai mari. Pentru policarbonat, tensiunea de alimentare influențează ceva mai mult masa recuperată, astfel că pentru un anumit debit se obțin cantități de material mai mari la tensiuni de alimentare superioare.

Masa recuperată, atât pentru poliamidă cât și pentru policarbonat variază între 70 g și 160 g, pentru o cantitate totală de material introdusă în proces de 210 g, 330 g sau 450 g.

Puritățile obținute pentru ambele fracții sunt superioare valorii de 95 %. Atât pentru poliamidă cât și pentru policarbonat, puritatea este puțin influențată de debitul de alimentare cu material și de frecvență (debitul de aer).

Tensiunea de alimentare este factorul care influențează decisiv puritatea, obținându-se la valoarea cea mai mică (40 kV diferența de potențial) puritățile cele mai bune: peste 99,45% pentru policarbonat și peste 99% pentru poliamidă.

Aceste rezultate bune sunt datorate faptului că pentru o diferență de potențial mică (40 kV), sarcină masică a granulelor atrase la electrozi este mai mare decât pentru o diferență de potențial mare (52 kV).

O valoare ridicată a sarcinii masice pe un eșantion de material granular se obține doar în cazul prezenței unei cantități reduse de impurități, a cărei sarcină (de semn contrar) să nu influențeze sarcina totală.

Eficiența, cum a fost descrisă prin relația 4.1, este procentul de material separat din totalul materialului care este procesat (masa totală pentru debitul masic considerat pe durata experienței). Variația acestei mărimi în funcție de factorii de intrare este prezentată în figura 4.14.



Fig. 4.14. Suprafețele de răspuns pentru eficiența procesului.

Eficiența este influențată în principal de tensiunea de alimentare și de debitul masic și mai puțin de debitul de aer de fluidizare. Alura curbelor de variație este aceeași la frecvențe diferite, valori superioare inregistrându-se la frecvența cea mai mică (35 Hz). Procesul este cel mai eficient la valori ridicate ale tensiunii și debitului masic cu o eficiență superioară valorii de 75%. Eficiența cea mai mică se înregistrează într-o zonă centrată în jurul coordonatelor 4,5 g / s și 42 kV la toate frecvențele de alimentare.

Eficiența maximă se obține în cazul în care a fost separată cea mai mare cantitate de material, dar asta nu înseamnă că în jurul acelei valori procesul este optim. Eficiența nu ia în cosiderare puritatea fracțiilor recuperate.

Trebuie totuși respectate limitările condiționate de existența patului fluidizat, în principal raportul dintre volumul materialul din pat și debitul aerului de fluidizare. Existența unui pat fluidizat condiționează triboelectrizarea materialelor granulare.

Cantitățile de material recuperate cresc odată cu debitul de material și puritățile acestora cresc cu scăderea tensiunii de alimentare. Din această cauză, punctul optim de funcționare pentru o separare unde puritatea este o condiție importantă a fost ales pentru valorile următoare: f = 35 Hz, U = 40 kV și  $D_m = 7,5$  g / s. Aceste valori s-au respectat pe parcursul masurarilor efectuate în afara planului de experiențe.

# 4.2.2. Factori de influență asupra procesului de separare

Concluziile planului de experiențe prezentat în paragraful 4.2.1. indică faptul că procesul de separare există și în afara domeniilor de variație considerate. În plus, punctul optim de funcționare a fost determinat de către MODDE la valori limită ale domeniilor de variație ceea ce duce la posibilitatea că în afara acestor domenii să se obțină rezultate mai bune decât cele măsurate în cadrul planului de experiențe. Din acest motiv s-a considerat că ar fi adecvate măsurări în puncte, variind doar un singur factor, în timp ce restul se mențin constanți.

Experiențele s-au realizat cu separatorul reglat în punctul optim de funcționare. Factorii care s-au variat sunt:

- *iferența de potențial* la care sunt alimentați cei doi electrozi;
- debitul de material cu care este alimentat separatorul;
- compoziția amestecului binar, păstrând aceleași materiale;
- turația cilindrilor rotitori;

Distanța dintre planul axelor cilindrilor și baza camerei de fluidizare (poziția sitei dispozitivului de alimentare cu aer), distanța dintre cilindri sau poziția unghiulară a cilindrilor nu au fost modificate și au rămas aceleași pe parcursul experiențelor, ca în cazul studiului descris în paragraful 4.2.1.

Pentru fiecare set de experiențe s-au înregistrat temperatura și umiditatea relativă a mediului ambiant. Acestea au fluctuat între valorile de 28..32 °C, temperatura, și 23..28 % umiditatea relativa.

#### A. Diferența de potențial dintre electrozi

Diferența de potențial dintre cei doi electrozi este probabil cel mai important parametru și după cum s-a văzut în planul de experiențe, este factorul care influențează cel mai mult puritatea fracțiilor separate.

Măsurările s-au realizat pentru un interval de variație cuprins între30 kV și 52 kV, în incremente de 2 kV. S-au măsurat masele celor două fracții separate, puritatea fiecăreia și s-a calculat eficiența separării după aceeași ecuație, (4.1).

Ceilalți parametri ai procesului de separare au fost menținuți la valori constante: debitul masic  $D_m = 7.5$  g / s; frecvența de alimentare a turbosuflantei f = 35 Hz; compoziția amestecului granular 50 % PA - 50 % PC, turația cilindrilor  $n_1 = n_2 = 6$  rot / min; numărul de lamele de pe cilindri N = 20.

Durata unui experiment a fost de 30 de secunde și masa totală de material procesat a fost de 225 g. Măsurările s-au realizat cu o cantitate inițială de material în camera de triboelectrizare pentru a face posibilă existența patului fluidizat.

În urma experiențelor, s-au reprezentat trei caracteristici de funcționare. Prima dintre acestea, puritate în funcție tensiune, este prezentată în figura 4.15.



Fig. 4.15. Puritatea fracțiilor separate în funcție de diferența de potențial dintre electrozi.

Puritatea fracției de PA este superioară în aproape toate cazurile purității fracției de PC. Se observă că PA nu este atât de influențată de variația tensiuni ca și fracția de PC. Rezultatele cele mai bune se obțin în jurul valorii de 34 kV pentru ambele fracții -  $p_{PA} = 99,4$ % și  $p_{PC} = 100$  %. Puritatea scade cu creșterea tensiunii, cele mai slabe rezultate obținându-se la 50 kV pentru PA -  $p_{PA} = 96,11$  % și la 48 kV pentru PC -  $p_{PC} = 97,85$  %.

Caracteristica masă - tensiune (figura 4.16.a.) arată faptul că în general fracția PC este mai bine recuperată decât fracția de PA. Evoluția acestor mase în funcție de diferența de potențial este liniară pe intervalul [30...38] kV și apoi cvasiconstantă pe intervalul [40...52] kV.



Fig. 4.16. Masa fracțiilor separate (a) și eficiența separării (b) în funcție de diferența de potențial dintre electrozi.

A treia caracteristică, eficientă - tensiune (figura 4.16.b.), pune mai bine în evidență această evoluție a maselor în funcție de tensiune. Valorile eficienței variază între 18,59 % și 80,64 %.

Studiul influenței tensiunii asupra separării confirmă rezultatele obținute în urmă planului de experiențe. Prin mutarea separării în zona de câmp slab se obține o puritate ridicată, în unele cazuri 100 %, dar se pierde mult în cantitatea de material separat, până la 75 % din valoarea maximă obținută în condiții de câmp electric puternic ~ 52 kV.

# **B.** Debitul de material

Debitul de material cu care este alimentat separatorul este factorul care influențează cel mai mult masele care sunt recuperate după procesul de separare. Din planul de experiențe nu s-a observat o influență mare asupra purităților materialelor separate.

Pentru a asigura un interval de variație pentru debit, s-a procedat în felul următor:

- s-a stabilit o cantitate de 500 g de amestec granular cu care să se efectueze fiecare experiență;
- s-a găsit debitul maxim pe care îl poate procesa separatorul (pentru un debit de aer de 101,3 m<sup>3</sup> / h), și anume 32 g / s. Pentru această valoare s-a măsurat tensiunea de alimentare a vibrotransportorului 250 V.
- s-au efectuat măsurări la tensiuni de {175; 190; 205; 220; 235; 250} V şi s-a cronometrat timpul în care materialul trece pe vibrotransportor. Prin împărțirea

masei amestecului de separat la timp s-au obținut diferite valori ale debitului de alimentare.

La realizarea experiențelor, ceilalți factori și parametrii separatorului au fost menținuți la valori constante: diferența de potențial dintre electrozi U = 40 kV; frecvența de alimentare a turbosuflantei f = 35 Hz; amestecul granular 50 % PA - 50 % PC, turația cilindrilor  $n_1 = n_2 = 6$ rot / min; numărul de lamele de pe cilindri N = 20. În incinta separatorului a fost lăsată o masă inițială de material înaintea fiecărei separări pentru asigura patul fluidizat de la începutul cronometrării.

Ca și pentru experiențele precedente, s-a măsurat masa fracțiilor separate și s-au calculat puritățile acestora și respectiv eficiența procesului de separare (tabelul 4.2.).

U <sub>vibro</sub> [V]	⊿ <i>t</i> [s]	$D_m$ [g / s]	m <sub>PA</sub> [g]	m <sub>PC</sub> [g]	р <sub>РА</sub> [%]	р <sub>РС</sub> [%]	eficiență [%]
175	112	4,46	106,6	144,5	98,71	89,6	50,44
190	82	6,1	99,1	147	99,26	91,32	49,04
205	52	9,62	79,6	132,7	99,28	93,91	44,92
220	30	16,67	79,7	120,76	99,61	97,39	41,62
235	20	25	59,4	85,2	97,3	97,59	28,66
250	15.5	32,26	59,7	87,2	97,43	97,04	29

TABELUL 4.2. REZULTATELE SEPARARII LA DEBITE DIFERITE DE MATERIAL.

Prima caracteristică trasată este puritatea fracțiilor separate în funcție de debitul de alimentare (fig. 4.17.):



Fig. 4.17. Puritățile fracțiilor de PA și PC în funcție de debitul de alimentare.

Puritatea poliamidei este în aproape toate cazurile superioară purității policarbonatului. Acest lucru a fost observat pe tot parcursul experiențelor și se datorează faptului că granulele de PA sunt mai ușoare decât cele de PC și că PVC-ul, material din care sunt confecționați cilindrii rotitori contribuie la încărcarea cu sarcină de semn contrar celei produse de PC. Puritățile ambelor fracții se situează în jurul valorii de 97% la debitele superioare valorii de 15 g / s. La debite sub 15 g / s, puritatea PC-ului scade cu debitul până la valoarea de 90%, în timp ce puritatea fracției de PA este cvasiconstantă în jurul valorii de 99%.

Acest fapt este datorat granulelor de PA, pentru care la debite mici, ciocnirile cu pereții sunt mai frecvente decât la debite mai mari. Cu cât este debitul mai mic, cu atât mai multe granule de PA se pot încărca cu aceeași sarcină ca a PC-ului, în urma ciocnirii cu cilindrii și sunt colectate ca impuritate în fracția de PC, conducând la diminuarea purității acestei fracții.

Masele obținute (Fig. 4.18.a.) după separare sunt superioare în cazul PC-ului față de PA.



Fig. 4.18. Masa fracțiilor separate (a) și eficiența separării (b) în funcție de debitul de material.

Acest lucru este datorat în principal faptului că granulele de PC se încarcă mai repede cu sarcină decât cele de PA (fenomen observat la toate experiențele), dar și pentru că fracția de PC conține cantități semnificative (până la 10%) de impurități (PA).

Eficiența procesului (Fig 4.18.b.) urmărește curbele maselor. Procesul este mai eficient la valori scăzute ale debitului. Această eficiență scade cu creșterea debitului, ajungând în jurul valorii de 30% pentru un debit maxim de 32 g / s.

Aceasta este evoluția așteptată a acestor mărimi, deoarece la debite slabe granulele petrec mai mult timp în separator și au timp mai mult să se ciocnească și să se electrizeze, în contrast cu debitele mari, unde granulele trec mai repede prin patul fluidizat și sarcina acumulată este mai scăzută.

#### C. Compoziția amestecului granular

Experiențele realizate pe amestecuri granulare binare pornesc de la premisa că un amestec balansat duce la o încărcare similară cu sarcină electrică de semn contrar a celor două componente. În cazul de față s-a observat că unul din componente - PC - se încarcă mai bine cu sarcină decât PA și se separă în cantități superioare. Pentru a valida această presupunere, dar și din dorința de a vedea cum se separă materialele în cazul unor amestecuri disproporționate s-a procedat la realizarea unor serii de experiențe cu diferite amestecuri binare ale acelorași materiale - PA și PC.

Pentru amestecurile granulare considerate (tabelul 4.3.) s-au realizat experiențe în condiții identice. Parametrii separării au fost menținuți la valorile:  $D_m = 7,5 \text{ g} / \text{s}$ ; U = 40 kV; f = 35 Hz;  $n_1 = n_2 = 6 \text{ rot} / \text{min}$ ; N = 20.

Amestec	PA [g]	PC [g]	m <sub>PA</sub> [g]	m <sub>PC</sub> [g]	р <sub>РА</sub> [%]	р <sub>РС</sub> [%]	Eficiență [%]
90 % PA - 10 % PC	405	45	52,47	51,53	99,9	85,76	22,38
80 % PA - 20 % PC	360	90	62,84	74,12	99,39	92,15	30,07
70 % PA - 30 % PC	315	135	100,14	97,8	99,81	96,41	43,02
60 % PA - 40 % PC	270	180	131,5	111,45	99,57	97,29	55,38
50 % PA - 50 % PC	225	225	137,89	98,86	98,72	98,6	54,27
40 % PA - 60 % PC	180	270	108,75	99,81	99,45	98,2	44,81
30 % PA - 70 % PC	135	315	91,96	76,39	98,3	98,6	36,23
20 % PA - 80 % PC	90	360	69,87	55,9	97,7	99,2	28,04
10 % PA - 90 % PC	45	405	42,08	33,33	94,01	98,6	16,10

TABELUL 4.3. REZULTATELE SEPARARII PENTRU DIFERITE COMPOZIȚII ALE AMESTECURILOR GRANULARE DE PA ȘI PC

Pentru această serie de experiențe s-au pregătit probe de material granular de 450 g, corespunzătoare unui debit de 7,5 g / s, pentru a avea durata unei experiențe de 60 s.

În figura 4.19. este prezentată caracteristica puritate - compoziție. Valorile purității pentru PA sunt maxime în cazurile în care PA este materialul majoritar în amestec și scad pe măsură ce amestecul este din ce în ce mai sărac în PA. Aceeași observație este valabilă și pentru PC, cu mențiunea că puritatea scade mai mult, ajungându-se la valoarea minimă de 85,76 % pentru amestecul 90 % PA - 10 % PC.



Fig. 4.19. Puritatea fracțiilor separate în funcție de compoziția amestecului granular de separat.

La intersecția acestor două curbe se poate stabili un punct unde puritățile celor două fracții sunt satisfăcătoare, rezultate bune obținându-se în cazul amestecului balansat 50 % PA - 50 % PC:  $p_{PA} = 98,72$  % și  $p_{PC} = 98,6$  %.

Pentru masa fracției PA (Fig. 4.20.a.), valorile cele mai mari sunt înregistrate la un amestec balansat, în timp ce pentru masa de PC la un amestec 60 % PA - 40 % PC.



Fig. 4.20. Masa materialelor separate (a) și eficiența procesului de separare (b) în funcție de compoziția amestecului granular binar de PA și PC.

Cu cât este mai aproape compoziția amestecului de situația 50 % PA - 50 % PC, cu atât masele celor două fracții sunt mai mari. Pentru amestecuri din ce în ce mai disporportionate, cantitățile de material recuperate scad și implicit și eficiența procesului de separare (Fig. 4.20.b).

Eficiența cea mai bună pentru proces este la valoarea 60 % PA - 40 % PC, ceea ce validează ipoteza că policarbonatul se încarcă mai repede. Purități bune s-au obținut în mai

multe situații, ceea ce indică faptul că procesul este robust la modificarea compoziției în limitele 30 % PA - 70 % PC - 70 % PA - 30 % PC.

#### D. Turația cilindrilor rotitori

Cilindrii rotitori se rotesc peste electrozii în formă de sector cilindric, având distanța între electrod și suprafața cilindrului minima, de cca. 3 mm.

Materialul este separat în incinta de triboelectrizare în zona de câmp maxim (unde distanța dintre cilindri este aprox. 40 mm) și cilindrii preiau granulele separate și le scot din incinta separatorului.

Pe măsură ce cilindrii se rotesc, granulele lipite de suprafața lor trec prin zone de cu intensitate din ce în ce mai scăzută. Forța electrică imagine și forța câmpului electric fiind principalele forțe care țin materialul fixat pe cilindri, aceastea scad pe măsură ce cilindrii îndepărtează materialul de zona de câmp maxim. Pentru a nu ajunge în situația în care granulele deja separate se dezlipesc și cad înapoi în camera de triboelectrizare s-a procedat la lipirea unor lamele pe suprafața cilindrilor. În acest fel granulele deja separate sunt fixate mecanic pe suprafața cilindrilor.

Materialul ridicat de lamele este depus sub forma unor straturi de granule, în unele cazuri fiind patru straturi suprapuse. Apare așadar întrebarea: cum influențează turația cilindrilor recuperarea? Se ridică problema dacă materialul scos de o lamelă ajunge sau nu la o valoare maximă - material separat există în cameră, dar pe lamelă nu se mai poate depune nici o granulă.

În realizarea acestui set de experiențe s-a urmărit evoluția turațiilor celor doi cilindri ( $n_1 = n_2$ ) în intervalul 6..20 rot / min în incremente de 2 rot / min. Masa materialului de separat a fost stabilită la 250 g cu compoziția 50 % PA - 50 % PC. Ceilalți parametri ai separării au fost menținuți la valorile constante de:  $D_m = 7,5$  g / s; U = 40 kV; f = 35 Hz; N = 20.

Variația eficienței procesului de separare în funcție de turația celor doi cilindri este prezentată în figura 4.21. Valoarea maximă de 62,82 % este înregistrată la turația minimă de 6 rot / min, în timp ce valoarea minimă este înregistrată la turația de 20 rot / min (27,28 %).



Fig. 4.21. Eficiența procesului de separare în funcție de turația cilindrilor rotitori.

Variația eficienței cu turația are alura unei funcții sigmoide, în figura 4.21. fiind suprapusă această funcție (calculată cu utilitarul Origin 6) peste rezultatele experimentale. Măsurări la turații mai mici de 6 rot / min nu au putut fi însă obținute deoarece limita minimă este impusă de angrenajul motor - reductor - fulii cu care se face acționarea cilindrilor.

Limita superioară este atinsă prin atingerea tensiunii maxime de alimentare a celor două motoare (24 V cc). Pentru a trece la turații superioare este necesar schimbarea raportului de transmisie - lucru nerentabil deoarece în funcționare continuă cilindrii se rotesc la turații mici pentru a avea eficientă crescută.

Concluzia după efectuarea planurilor de experiențe a fost că separatorul funcționează cel mai bine - recuperând mase maxime la puritate maximă - cu un regim de funcționare, dat de programul MODDE în urmă rulării modulului de optimizare, caracterizat prin: U = 40 kV, f = 35 Hz și  $D_m = 7.5 \text{ g} / \text{s}$ .

Prin cele cinci seturi de experiențe s-a căutat extrapolarea domeniilor de variație considerate în planul de experiențe și studierea unor noi factori influenți.

Corelând cazurile cele mai bune în cazul tuturor factorilor influenți, se poate stabili că punctul optim de funcționare al separatorului este pentru un amestec granular binar de 50 % PA - 50 % PC la următoarele valori: U = 40 kV,  $D_m = 5 g / s$ ,  $n_1 = n_2 = 6 \text{ rot} / \text{min}$ , N = 20, obținându-se în acest caz o eficiență superioară valorii de 50 % și purități peste 97 % pentru PC și 99 % pentru PA.

# 4.2.3. Masurări în timp real prin achiziția directă a maselor și sarcinii masice a fracțiilor separate

În caracterizarea regimurilor de funcționare s-a luat în calcul și măsurarea mărimilor de ieșire în timp real, pe toată durata experiențelor, prin folosirea unui sistem de achiziție de date.

Se urmărește procedura experimentală care constă în următorii pași:

- se pregătesc toate componentele sistemului de achiziție pentru măsurat;
- se alimentează separatorul cu amestec granular și se pornește procesul de separare;
- se oprește după 60 s;
- fișierele de date se salvează și se redenumesc noile fișiere în câmpurile din i.v.;
- se înlătura materialul din recipientele de colectare și se revine la primul pas.

Parametrii separatorului au fost identici pentru fiecare măsurare, conform paragrafului precedent. Mărimile ce influențează separarea au fost menținute la valorile fixe de: U = 40 kV, f = 35 Hz,  $D_m = 5 \text{ g} / \text{s}$ ,  $n_1 = n_2 = 6 \text{ rot} / \text{min}$ , N = 20.

Rezultatele experienței sunt prezentate în figura 4.22. și în cazul acestui separator, se observă evoluția liniară a procesului de separare, curbele de pantă constantă regăsindu-se la achiziția fiecărei fracții.



Fig. 4.22. Evoluția în timp a maselor achiziționate pentru fracțiile PA și PC, și evoluția fracției de mixt, calculată prin scăderea primelor 2 curbe din masa totală.

Prin efectuarea unei prelucrări de date elementare, s-a obținut, prin calcul, evoluția în timp a fracției de mixt.

## Concluzii

Separatorul cu pat fluidizat și cilindri rotitori realizează separarea amestecurilor granulare cu eficiență ridicată.

Funcționarea în regim continuu cu ieșirea mixtului neseparat face posibilă procesarea în punctul optim de funcționare a până la 80% din material.

La tensiuni de alimentare scăzute ( $\pm$  17 kV) se obțin purități ale materialelor separate de 100%, dar cu eficiență scăzută (sub 20% material procesat).

Procesul de separare este unul robust, fiind mai puțin influențat de compoziția amestecului granular decât în cazul altor separtoare.

Cele mai bune rezultate ale separării se obțin în cazul unui amestec balansat. În cazul amestecurilor disproporționate scad atât puritatea, cât și masa fracțiilor separate.

# CONCLUZII

Marea diversitate a materialelor plastice componente ale DEEE face din recuperarea acestora o problemă complexă. Astfel, tehnologiile de separare au nevoie de îmbunătățiri, diversificare și realizare de aplicații de înaltă eficiență, obiective ce nu se pot realiza decât prin cercetare și dezvoltare continuă.

Teza de doctorat prezintă o sinteză a stării actuale a cercetării în domeniul separării triboelectrostatice în pat fluidizat, instalațiile de separare construite sau îmbunătățite, dar și rezultate obținute cu aceste echipamente, modele experimentale ale proceselor de separare obținute prin planificarea activă a experiențelor și prin utilizarea tehnologiilor de achiziție de date în timp real.

Concluzionând, procedeul de separare este în mare măsură același în cazul tutor separatoarelor, caracteristicile comune fiind:

- 1. Evoluția sarcinii electrice este relativ constantă în timp. După aproximativ 10 secunde granulele sunt încărcate electric suficient pentru a fi separate.
- Sarcina masică a materialelor separate este invers proporțională cu tensiunea aplicată la electrozi. Un câmp electric mai intens conduce la o dinamică mai bună a procesului şi la cantități de material procesate mai mari.
- Funcționarea în regim continuu este constantă în timp, dacă amestecul granular îşi păstrează omogenitatea şi componența, astfel că separatorul poate funcționa în buclă deschisă.
- 4. Separatoarele pot funcționa în buclă deschisă sau închisă, existând o tendința naturală de reglare a debitelor.
- 5. Cele mai bune rezultate ale separării se obțin în cazul unui amestec balansat. În cazul amestecurilor disproporționate scade puritatea fracției separate.
- În cazul unui amestec granular disporportionat valori bune ale purității (peste 95 %) se obțin după două separări succesive.

### Concluzii generale

- 1. Cele trei separatoare prezentate în teză sunt o soluție compactă la separatoarele cu cădere liberă.
- 2. În cazul separatoarelor DISELF și STAEL triboelectrizarea materialului depinde preponderent de compoziția amestecului granular. Procesul de separare este însă robust, iar calitatea separării se poate controla prin modificarea fantelor din dreptul electrozilor.
- 3. Tehnicile de investigație utilizate conduc la înțelegerea procesului de separare printr-o abordare experimentală neintruzivă.
- 4. Sistemul de achiziție de date în timp real permite monitorizarea procesului de separare și dă posibilitatea de a controla eficiența procesului de separare prin integrarea dispozitivului de separare într-un sistem complex de comandă (se închide bucla de reglaj).
- 5. Încărcarea cu sarcină electrică diferențiată a amestecului granular prin triboelectrizare în pat fluidizat în aceeași incintă unde se face și separarea acestuia conduce la un procedeu eficient, flexibil și robust de separare a materialelor plastice provenite din DEEE.

# Perspective

- Utilizarea separatorului DISELF în instalații de separare a amestecurilor foarte fine 20
   50 microni.
- 2. Funcționarea separatorului STAEL cu electrozi bandă în regim continuu cu reglare automată în buclă închisă sau deschisă.
- Realizarea achiziției sarcinii masice pentru separatorul STAEL-CT în LCEI.
   Publicarea rezultatelor în articole.
- 4. Punerea la punct a unor instrumente virtuale care să realizeze operații complexe de prelucrare a datelor.

# Contribuții personale

- 1. Identificarea problemelor științifice și tehnice de rezolvat în domeniul separării triboelectrostatice în pat fluidizat a amestecurilor granulare provenite din DEEE.
- 2. Familiarizarea cu factorii influenți în funcționarea separatoarelor tribo-aeroelectrostatice.

- 3. Proiectarea și realizarea unui separator triboelectrostatic cu pat fluidizat și electrozi paraleli de mici dimensiuni (DISELF) pentru studii preliminare ale separării în regim intermitent de funcționare.
- 4. Realizarea unui nou dispozitiv adaptat la colectarea materialului separat ce permite măsurarea simultană a sarcinii și masei și funcționarea separatorului în regim continuu.
- 5. Punerea la punct a unui sistem de achiziție de date utilizând două porturi seriale pentru balanțele electronice și înregistrarea sarcinii prin intermediul ieșirii în semnal analog de tensiune a electrometrelor.
- 6. Realizarea la scară industrială a separatorului DISELF și adaptarea dispozitivelor de producerea a patului fluidizat la noua construcție proiectarea și realizarea unui divizor de aer cu coloane de fluidizare cu 18 ieșiri.
- 7. Îmbunătățirea sistemului de achiziție de date prin conectarea electrometrelor printr-o placă de achiziție digitală utilizând protocolul GPIB și condiționarea măsurătorilor într-un instrument virtual realizat în LabVIEW.
- 8. Punerea bazelor sistemului de automatizare a separatorului STAEL în regim de funcționare în buclă închisă.
- Proiectarea şi realizarea separatorului triboelectric cu pat fluidizat şi cilindri rotitori. Construcția şi testarea mai multor sisteme de distribuție a aerului pentru producerea patului fluidizat.
- Caracterizarea experimentală a procesului în profunzime utilizând sistemul de achiziție de date și metoda planificării active a experiențelor pentru diferite amestecuri granulare PA - PC și ABS - HIPS în cazul celor trei separatoare prezentate [20- 24, 38, 42, 90].

# **REFERINȚE BIBLIOGRAFICE**

- [1] \*\*\* American Plastics Council, "Plastics from residential electronics recycling", The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics, 2000.
- \*\*\* Carpco Inc., Jacksonville, USA, "Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator", Bulletin No. 97713.
- [3] \*\*\* Carpco Inc., Jacksonville, USA, "The Solution to Separation", Technical Information Bulletin, 1997.
- [4] \*\*\* Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).
- [5] \*\*\* Hamos GmbH, Penzberg, Germany, Bulletin KWS-D 10/98, 1998.
- [6] \*\*\* IEC Electrostatics, Measurement methods, "Faraday Pail Measurement".
- [7] \*\*\* Keithley 6514 Electrometer User Manual.
- [8] \*\*\* National Instruments, LabVIEW, Measurements Manual, National Instruments, Austin, TX, 2000.
- [9] \*\*\* Outokumpu, "Electrostatic Selaction Guide for Industrial Separators".
- [10] \*\*\* "Tehnologii de recuperare a metalelor şi materialelor plastice din deseurile echipamentelor informatice şi de telecomunicatii (TEREMEP)", Contract de cercetare stiintifica CEEX 113 2006, Director de grant prof. A. Iuga.
- [11] \*\*\* "Triboelectrizarea in pat fluidizat a amestecurilor multicomponente de materiale plastice reciclabile", Contract de cercetare stiintifica CNCSIS 1186 2007, Director de grant prof. A. Iuga.
- [12] \*\*\* UmetricsAB, MODDE5.0, User Guide and Tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.
- [13] Baytekin B. T., Baytekin H., Soh S., and Grzybowski B.A., "Was Thales Right? Role of Water in Contact Electrification", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [14] Baytekin H.T., Baytekin B., Patashinski A.Z., and Grzybowski B.A., "Material Transfer in Contact Electrification", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.

- [15] Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., and Grzybowski B.A., "The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [16] Bendimerad S., Tilmatine A., Ziane M., and Dascalescu L., "Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator", International Journal of Environmental Studies, vol. 66, 2009, pp. 529 - 538.
- [17] Bilici M., "Modelisation experimentale de processus tribo-aero-electrostatiques", Raport de Master, sept. 2009, Poitiers, France.
- [18] Bilici M., Dascalescu L., Dragan C., Fati O., Iuga A., and Samuila A., "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices", EEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 18, 2011, pp. 1476-1483, ISSN 1070-9878, DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032818.
- [19] Bilici M., "Modelarea procesului de triboelectrizare a materialelor granulare şi pulverulente in aplicații de separare triboelectrostatică", Lucrare de Licenta, iulie 2008, Cluj-Napoca, Romania.
- [20] Bilici M., Dascalescu L., Barna V., Gyorgy T., Rahou F., and Samuila A., "Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics", Proc. of the IEEE IAS Annual Meeting, Orlando, FL, 2011. Paper EPC 227, ISSN 0197-2618, DOI: 10.1109/IAS.2011.6074273;
- [21] Bilici M., Dascalescu L., Dragan C., Fati O., Iuga A., and Samuila A., "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 18, 2011, pp. 1476-1483, ISSN 1070-9878, DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032818.
- [22] Bilici M., Dascalescu L., Gyorgy T., Barna V., Rahou F., and Samuila A., "Experimental Characterization of Electrostatic Separation of Mixed Granular Plastics in Fluidized Bed Devices", IEEE Trans. Ind. Appl., 2012, in press.
- [23] Bilici M., Dascalescu L., Gyorgy T., Barna V., Rahou F., and Samuila A., "Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics", Proc. of the ESA Annual Meeting, Cleveland, OH, 2011.
- [24] Bilici M., Dragan C., Fati O., Samuila A., Iuga A., and Dascalescu L., "Factors that Influence the Tribocharging of Mixed Granular Solids in Fluidized Bed Devices", Proc. of the SFE Conference 2010, Montpellier, France, ISBN: 2-9505432-7-8.

- [25] Blajan M., Beleca R., Iuga A., and Dascalescu L., "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag shaped square pipes in view of electrostatic separation", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, 2010, pp. 1558-1563.
- [26] Blajan M., Samuila A., Neamtu V., Beleca R., Caliap L., Vadan D., Iuga A., and Dascalescu L., "Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes", Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Converence on Electrostatics, June 6-9, 2006, University of California, Berkeley, California. 538-543 (2006). ISBN-0-7803-9209-4.
- [27] Brown J.D., "An Industrial Electrostatic Separation Process", TECH talk 2 (1), 1998.
- [28] Buda G., Bilici M., Dascalescu L., and Samuila A., "Influence of Material Moisture on the Tribocharging Process of Plastic Granules", J. of Particulate Science and Technology, in press, DOI: 10.1080/02726351.2012.675018.
- [29] Butunoi T., Buda G., Dragos C., Samuila A., Neamtu V., Morar R., Dascalescu L., and Iuga, A., "Wheat seeds separation in high-intensity electric field", Proc. of 2011 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, ATEE 2011, ISSN 2068-7966, Print ISBN: 978-1-4577-0507-6.
- [30] Butunoi T., Gagiu G., Bilici M., Samuila A., Neamtu V., Morar R., Dascalescu L., and Iuga A., "Electric and electronic equipment of a research-oriented electrostatic separator", Proc. of Optim 2010 Conference, Moeciu, Romania, ISSN 1842-0133, DOI: 10.1109/OPTIM.2010.5510342.
- [31] Calin L., "Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques, en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé", Teza de doctorat, Cluj-Napoca, 2008.
- [32] Calin L., and Dascalescu L., FR2943561 (2009), WO2010109096 (2010).
- [33] Calin L., Mihalcioiu A, Iuga A., and Dascalescu L., "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification", J. of Part. Sci & Technol., vol. 25, pp. 205-211, 2007.
- [34] Castle G.S.P., "Contact charging between insulators", J. Electrostat., vol. 40&41, pp. 13-18, 1997.
- [35] Chang J.-S., Kelly A., and Crowley J., Handbook of Electrostatic Processes, Taylor and Francis, 1995.
- [36] Crowley J.M., Fundamentals of Applied Electrostatics, Morgan Hill, CA, Laplacian Press, 1999.

- [37] Dascalescu L., Iuga A., Morar R., Neamtu V., Suarasan I., Samuila A., Rafiroiu D., "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators", Journal of Electrostatics, 29 (3), pp. 211-225.
- [38] Dascalescu L., Bilici M., Dragan C., Samuila A., Ramdani Y., and Tilmatine A., "Robust Design and Capability Evaluation of a Tribo-aerodynamic Charging Process for Fine Particles", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, issue 3, 2011, pp. 1086 - 1092.
- [39] Dascalescu L., Dragan C., Bilici M., Beleca R., Hemery Y., and Rouau X., "Electrostatic Basis for Separation of Wheat Bran Tissues", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, issue 2, 2010, pp. 659 - 665, ISSN 0093-9994, DOI: 10.1109/TIA.2011.2126011.
- [40] Dascalescu L., Dragan C., Bilici M., Beleca R., Hemery Y., and Rouau X., "Premises for the Electrostatic Separation of Wheat Bran Tissues", Proc. of the IEEE IAS Annual Meeting, 2008, Boston, MA, ISSN 0197-2618, DOI: 10.1109/08IAS.2008.101.
- [41] Dascalescu L., Dragan C., Bilici M., Chereches R., and Samuila, A., "Triboelectric Phenomena in Suction-Type Dilute-Phase Pneumatic Transportation Systems for Granular Plastics", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, issue 4, 2010, pp. 1570 - 1576, ISSN 0093-9994, DOI 10.1109/TIA.2010.2049625.
- [42] Dascalescu L., Fati O., Bilici M., Rahou F., Dragan C., Samuila A., and Iuga A., "Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type triboelectrostatic separator for mixed granular plastics", 13th Int. Conf. on Electrostatics, 2011, Journal of Physics: Conf. Series 301, 012066, DOI 10.1088/1742-6596/301/1/012066.
- [43] Dascalescu L., Mizuno A., Tobazeon R., Atten P., Morar R., Iuga A., Mihailescu M., and Samuila A., "Charges and forces on conductive particles in roll-type coronaelectrostatic separators", IEEE Transactions on Industry Applications, 31 (5), pp. 947-956.
- [44] Dodbiba G., Shibayama A., Miyazaki T., and Fujita T., "Triboelectrostatic Separation of ABS, PS and PP plastic mixture", Materials Transactions, 44 (1), 161-166 (2003).
- [45] Dodbiba G., Sadaki J., Okaya K., Shibayama A., and Fujita T., "The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics", Minerals Engineering, 18(15), 1350-1360 (2005).
- [46] Dragan C., Fati O., Radu M., Samuila A., and Dascalescu L., "Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, 2011, pp. 1922 - 1928.
- [47] Dragan C., "Modelisation du processsus de charge et separation tribo-aeroelectrostatique de materiaux granulaires", These, Poitiers, 21 oct 2010.

- [48] Dragan C., Bilici M., Das S., and Dascalescu L., "Triboelectrostatic Phenomena in Suction-type Dilute-phase Pneumatic Transport Systems", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 16, issue 3, 2009, pp. 661 - 667, ISSN 1070-9878, DOI 10.1109/TDEI.2009.5128503.
- [49] Dragan C., Bilici M, Das S., Samuila A., and Dascalescu L., "Tribocharging of Insulating Powders in the Annular Ducts of Pneumatic Devices", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, issue 3, 2010, pp. 1138 - 1143, ISSN 0093-9994, DOI 10.1109/TIA.2010.2045095.
- [50] Dragan C., Samuila A., Das S., Iancu D., Bilici M., and Dascalescu L., "Factors that influence the tribocharging of insulating ducts in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems", 11th Int. Conf. on Electrostatics, vol 67, issues 2-3, 2009, pp. 184 -188, DOI 10.1016/j.elstat.2008.12.020.
- [51] Duff N., and Lacks D.J., "Particle dynamics simulations of triboelectric charging in granular insulator systems", Journal of Electrostatics, 66, 2008, pp 51 - 57.
- [52] Eriksson L., Johansson E., Kettaneh-Wold N., Wikström C., and Wold S., Design of Experiments. Principles and Applications, LearnwaysAB, Stockholm, 2000.
- [53] Forward K.M., Lacks D.J., and Sankaran R.M., "Methodology for studying particleparticle triboelectrification in granular materials", Journal of Electrostatics, 67: 2-3, 2009, pp. 178-183.
- [54] Frigonand N.L., and Mathews D., Practical Guide to Experimental Design, New York, Wiley, 1996.
- [55] Gajewski J., Glod B. J., and Kala W. S.; "Electrostatic method for measuring the twophase pipe flow parameters", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, 1993, pp. 650-655.
- [56] Geldart D., "Types of gas fluidization", Powder Technology, Volume 7, Issue 5, May 1973, Pages 285-292.
- [57] Haga K., Chang J.S., Kelly A.J., and Crowley J.M., Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Dekker, NewYork, 1995.
- [58] Hemery Y., Rouau X., Dragan C., Bilici M., Beleca R., and Dascalescu L., "Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content", Journal of Food Engineering, vol. 93, issue 1, 2009, pp. 114-124, ISSN 0260-8774, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.01.003.
- [59] Higashiyama Y., and Asano K., "Recent process in electrostatic separation technology", Particulate Science and Technology, 1998, 16, pp.77-90.

- [60] Holdich R., Fundamentals of Particle Technology, Midland Information Technology & Publishing (1 Nov 2002), 978-0954388102.
- [61] Howard J.R., Fluidised Bed Technology. Principles and Applications, New York, NY: Adam Hilger, 1989.
- [62] Inculet I., and Castle G.S.P., "Electrostatic separation of plastics for recycling", Particulate Science and Technology, 1998, 16, pp. 91-100.
- [63] Inculet I. I., and Castle G. S. P., "Triboelectrification of comercial plastic in air", , Institut Physics Conference Series, 118, 217-222 (1991).
- [64] Inculet I. I., Castle G. S. P., and Brown J. D., "Electrostatic separation of mixed plastic waste", US Patent, No. 5 289 922, 1994.
- [65] Ireland P.M., "Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode", Journal of Electrostatics, Volume 70, Issue 6, December 2012, Pages 524-531.
- [66] Ireland P.M., "Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part I experiments", Powder Technology, 198 (2010), pp. 189-198.
- [67] Ireland P.M., "Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part II mechanisms and models", Powder Technology, 198 (2010), pp. 199-210.
- [68] Iuga A., Calin L., Neamtu V., Mihalcioiu A., and Dascalescu L., "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device", Journal of Electrostatics, vol.63, issues 6-10, 2005, pp.937-942.
- [69] Jiang C., and Forsberg E., "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review", Journal of Hazardous Materials, 2003, 99, pp. 243-263.
- [70] Kama H., Kiyomura Y., and Seki N., "Electrostatic Separator", Matsushuita Electric Co. Ltd., Patent No.: JP 2002 204 980, 2002.
- [71] Kama H., Kiyomura Y., and Seki N., "Method and Aparatus for Feeding and Carrying Ground Plastic and Electrostatic Separator for Ground Plastic", Matsushuita Electric Co. Ltd., Patent No.: JP 2002 117 820, 2002.
- [72] Kohnlechner R., "Automatic electrostatic separation of nonconductive material mixtures, use of process, process plant and electrostatic separating unit", Patent DE 19829200, 2000.
- [73] Kohnlechner R., "Electrostatic separation of mixed plastics", Hamos GmbH, Penzberg, Germany, www.hamos.com.
- [74] Kohnlechner R. and Dascalescu L., "New applications for standard electrostatic separators", Proc. of the IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting, 2-6 Oct. 2005 Hong Kong. Conference Record. 4, 2569-2572 (2005).

- [75] KWetkus B. A., "Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process", Particulate Science and Technology, 16(1), 55-67 (1998).
- [76] Lacks D.J., and Levadosky A., "Effect of particle size distribution on the polarity of the triboelectric charging in granular insulator systems", Journal of Electrostatics, 65:2, 2007, pp. 107-112.
- [77] Lawver J. E., and Dyrenforth W. P., "Electrostatic separation", Electrostatics and Its Applications, New York, John Wiley&Sons, 1973, pp.221-249.
- [78] Lungu M., "Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect", Minerals Engineering, 17:1, 2004, pp. 69-75.
- [79] Makkawi Y.T., and Wright P.C., "Fluidization regimes in a conventional fluidized bed characterized by means of electrical capacitance tomography", Chemical Engineering Science, Volume 57, Issue 13, July 2002, Pages 2411-2437.
- [80] Matsusaka M., Oki H., and Masuda P., "Control of electrostatic charge on particles by impact charging", Advanced Powder Technology, 18 (2007), pp. 229-244.
- [81] Matsusaka S., Maruyama H., Matsuyama T., and Ghadiri, M., "Triboelectric charging of powders: a review", Chemical Engineering Science, 65 (2010), pp. 5781-5807.
- [82] Matsuyama T., and Yamamoto H., "Charge relaxation process dominates contact charging of a particle in atmospheric conditions", Journal of Physics D-Applied Physics, 28 (1995), pp. 2418-2423.
- [83] Matsuyama T., and Yamamoto H., "Charge-relaxation process dominates contact charging of a particle in atmospheric condition. 2. The general model", Journal of Physics D-Applied Physics, 30 (1997), pp. 2170-2175.
- [84] Mazumder M. K., Horenstein M. N., Stark J., Sumner R., Girouard P., Sadder O., and Gopalkrishnan K.A., "Electrostatic Charging of Particles on Electrodynamic Screens by Low Frequency Electric and Dielectrophoretic Excitations", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [85] Mihalcioiu A., Dascalescu L., Das S., Medles K., and Munteanu R., "Virtual instrument for statistic control of powder tribocharging processes", Journal of Electrostatics, Volume 63, Issues 6-10, June 2005, Pages 565-570.
- [86] Mihalcioiu A., "Tehnici de masura şi instrumentatie virtuala pentru studiul proceselor electrostatice", Teza de Doctorat, Cluj-Napoca, 2005.
- [87] Morar R., Iuga A., Cuglesan I., Muntean O., and Dascalescu L., "Iron ore beneficiation using roll-type high-intensity electric field separators", IEEE Transactions on Industry Applications, 35 (1), pp. 218-224.

- [88] Park C.H., Jeon H.S., Cho B.G., and Park J.K., "Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire", Polymer Engineering and Science, 44:12, 2007, pp. 1975-1982.
- [89] Park C.H., Park J.K., Jeon H.S., and Chun B.C., "Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger", Journal of Electrostatics, 66:11-12, 2008, pp. 578-583.
- [90] Rahou F.Z., Tilmatine A., Bilici M., and Dascalescu L., "Numerical Simulation of Tribo-aero-Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, issue 2, 2012, pp. 816 - 822, DOI: 10.1109/TIA.2011.2181288, ISSN 0093-9994,
- [91] Schein L.B., "Recent advances in our understanding of toner charging", Journal of Electrostatics, 46 (1999), pp. 29-36.
- [92] Sow M., Lacks D.J., and Sankaran R.M., "Effects of Stress on Triboelectric Charging", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [93] Stencel J. M., Schaefer J. L., Neathery J. K., Ban, H., and Finseth D., "Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method", US Patent, No: 6 498 313, 2002.
- [94] Taylor D.M., et al., Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements, Research Studies Press, 272p, 1994.
- [95] Urs, A., "Stadiul actual al cercetărilor privind caracteristicile electrice ale materialelor granulare şi influenţa lor asupra proceselor de electroseparare", Teza de doctorat, Cluj-Napoca, 2001.
- [96] Vosteen W. E., "A Review of Current Electrostatic Measurement Techniques and Their Limitations", Electrical Overstress Exposition, April 24-26, 1984.
- [97] Waitukaitis S., Castillo E., and Vidal E., "Direct Measurement of Size Dependent Charging in Chemically Identical Grains", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [98] Watanabe H., et al., "Triboelectrification of pharmaceutical powders by particle impact", International Journal of Pharmaceutics, 334 (2007), pp. 149-155.
- [99] Wei J., and Realff M. J., "Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycling", Industrial and Engineering Chemistry Research, 44(10), 3503-3509 (2005).

- [100] Williams M.W., "Mechanisms of Triboelectric Charging of Insulators, a Coherent Scenario", Proc. of the 2011 ESA Annual Meeting on Electrostatics, Cleveland, USA, June 14-16, 2011.
- [101] Xiao C., Allenii L., and Biddle M.B., "Electrostatic Separation and Recovery of Mixed Plastics", MBA Polymers, Inc., American Plastic Council, 2002.
- [102] Yates J. G., Fundamentals of fluidized-bed Chemical Processes, Butterworths, London, 1983.
- [103] Younes A., Younes M., Sayah H., Bilici M., Samuila A., and Dascalescu L., "Effect of spark discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type coronaelectrostatic separators. Experimental and numerical study", Journal of Electrostatics, in press, DOI: 10.1016/j.elstat.2012.10.003.


Fig. A1. Schema de alimentare propusa pentru alimentarea echipamentelor și a separatorului STAEL în funcționarea în bucla inchisa (forta).

ANEXE





Fig. A2. Schema de alimentare propusa pentru alimentarea echipamentelor și a separatorului STAEL în funcționarea în bucla inchisa (comanda).

## SEPARATION ELECTROSTATIQUE DES MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES DANS DES DISPOSITIFS A LIT FLUIDISES

Plusieurs types de dispositifs mécaniques (à vibration, à cylindre tournant, à lit fluidisé) mettant en jeu l'effet triboélectrique sont actuellement utilisés pour charger électriquement les constituants des mélanges de matériaux isolants granulaires, en vue de leur séparation dans un champ électrique intense. La non-uniformité de la charge des granules à la sortie de ces dispositifs affecte l'efficacité de la séparation, d'où l'intérêt des recherches visant la mise au point de procédés électrostatiques nouveaux, notamment pour des applications dans le domaine du recyclage des déchets. L'utilisation simultanée de l'effet triboélectrique, de la force de Coulomb et de la force d'image électrique est la solution innovante selon laquelle ont été conçus les quatre dispositifs à lit fluidisés réalisés ou améliorés dans le cadre de cette thèse. L'évaluation des performances de ces dispositifs a été rendue possible par la mise en œuvre de systèmes de mesure complexes, permettant l'enregistrement continu et simultané des charges et des masses des produits de la séparation. Ainsi, la méthode des plans d'expériences pour surfaces de réponse a pu être utilisée pour modéliser le processus de séparation et déterminer les valeurs optimales des variables de contrôle de chacun des dispositifs, tels que le niveau de la haute tension d'alimentation ou la vitesse de l'air de fluidisation. Les résultats obtenus sur les installations de laboratoire et sur un prototype préindustriel recommandent cette classe de procédés tribo-aéro-électrostatiques comme la solution de choix pour le recyclage des déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques.

Mots- clés

électrostatique charge électrique effet triboélectrique matériaux isolants séparation électrostatique lit fluidisé méthode des plans d'expériences recyclage de déchets

## ELECTROSTATIC SEPARATION OF MIXED GRANULAR MATERIALS IN FLUIDIZED-BED DEVICES

Several types of mechanical devices (vibratory trays, rotating drums, fluidized beds) make use of the triboelectric effect for electrically charge the constituents of insulating materials granular mixtures, in view of their separation in a high-intensity electric field. The non-uniformity of granule charge at the exit of these devices adversely affects the separation efficiency, justifying the researches aimed at the development of novel electrostatic processes, mainly for applications in the field of waste recycling. Simultaneous usage of the triboelectric effect, the Coulomb force and the electric image force is an innovative technical solution according to which four fluidized bed devices were built or improved within the framework of this thesis. The performances of these devices could be evaluated by setting up complex measurement systems that enable the continuous and simultaneous recording of the charges and masses of the separated products. Thus, the experimental design methodology could be used for modeling the separation process and identify the optimum values of the control variables of each device, such as the high voltage level of the speed of the fluidization air. The results obtained on laboratory devices as well on an semi-industrial pilot installation recommend this class of tribo-aero-electrostatic separation processes as the solution of choice for the selective sorting of plastics from waste electric and electronic equipment.

**Key-words** 

electrostatics electric charge triboelectric effect insulating materials electrostatic separation fluidized bed experimental design methodology waste recycling