



**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI**

FACULTATEA DE INGINERIA SISTEMELOR BIOTEHNICE

ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIA SISTEMELOR  
BIOTEHNICE

**Rezumat Teză de Doctorat**

**CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA  
PROCESULUI DE DENSIFICARE A BIOMASEI**

*(Cuvinte cheie: biomasă, peletizare, energie consumată, optimizare)*

**Conducător științific:**

Prof. Univ. Dr. Ing. Gheorghe VOICU

**Autor:**

Ing. Iuliana Găgeanu

- BUCUREȘTI -  
2020

## Rezumat

În ultimele decenii, înlocuirea combustibililor fosili cu cei din surse regenerabile a devenit o preocupare majoră la nivel mondial, cu rol în reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și a poluării. Biomasa reprezintă resursa regenerabilă cu cea mai mare răspândire și are avantajul că poate fi utilizată cu ușurință de către un spectru larg al populației. Peletizarea reprezintă unul din cele mai bune moduri de utilizare a biomasei drept combustibil, în urma procesului rezultând biocombustibili cu caracteristici similare lemnului.

**Obiectivul general al cercetărilor teoretice și experimentale îl constituie determinarea experimentală în laborator a influenței parametrilor de intrare și control asupra celor de ieșire (calitativi) ai peletelor, cu ajutorul unui stand automatizat, respectiv validarea experimentală, în condiții de exploatare, a unor modele matematice și optimizarea procesului de peletizare.** A fost propus un model matematic ce exprimă densitatea finală a peletelor, ca fiind determinată de către presiunea finală aplicată în timpul procesului, umiditatea inițială a materialului și densitatea inițială a materialului și un model matematic, obținut prin analiză dimensională utilizând teorema  $\Pi$ , care exprimă densitatea peletelor care este influențată de presiune, căldură, densitatea inițială a materialului, viteza de peletizare și volumul inițial al materialului. S-au realizat cercetări experimentale utilizând un stand experimental pentru o singură peletă cu două matrițe de peletizare (cu orificiul de 8 mm și de 10 mm), pentru 3 umidități ale materiei prime (10%; 13%; 16%), 3 viteze de peletizare (1,3 mm/s; 2,1 mm/s; 2,8 m/s), 3 temperaturi ale matriței (70 °C; 80 °C; 90 °C) și 3 forțe diferite de compactare (10 kN; 20 kN; 30 kN). Parametrii de ieșire urmăriți, cei care exprimă calitatea peletelor și eficiența procesului de peletizare, au fost: energia consumată pentru obținerea peletelor lungimea peletelor, volumul peletelor, densitatea peletelor, umiditatea peletelor, durabilitatea peletelor în timp. Metodologia de realizare a cercetărilor experimentale prin intermediul standului presupune parcurgerea următoarelor etape: se cântărește rumegușul; se pornește încălzirea matriței și se așteaptă atingerea temperaturii dorite; se introduce rumegușul în matriță; se poziționează pistonul în interiorul orificiului de presare și se fixează în capul de presare al mașinii de forță; se introduce viteza și forța de peletizare în programul software; se inițiază procesul de peletizare a biomasei concomitent cu pornirea măsurării energiei consumate; procesul este oprit automat în momentul atingerii forței maxime de peletizare setate; moment în care se oprește și măsurarea energiei consumate. A fost realizată validarea celor două modele propuse atât pe datele experimentale obținute pe stand, cât și pe un set de date obținute pe o mașină de peletizat cu matriță inelară. De asemenea, a fost realizată modelarea statistică și optimizarea procesului de peletizare a biomasei.

## Abstract

Over the last few decades, the replacement of fossil fuels with those from renewable energy sources has become a major concern worldwide, with a role in reducing greenhouse gas emissions and pollution. Biomass is the renewable resource with the largest spread on the surface of the earth and has the advantage that it can be easily used by a broad spectrum of the population. Pelleting is one of the best ways to use biomass as a fuel, the process resulting in solid biofuels with characteristics similar to wood destined for burning.

**The general objective of the theoretical and experimental researches is the experimental determination in the laboratory of the influence of the entry and command parameters on the output (qualitative) of the pellets, with the help of an automated stand, respectively the experimental validation, under operating conditions, of mathematical models and the optimization of the pelleting process.**

A mathematical model expressing the final density of the pellets was proposed, as determined by the maximum force applied during the process, the initial moisture of the material and the initial density of the material, and a mathematical model obtained through dimensional analysis using the  $\Pi$  theorem, which expresses the density of the pellets that is influenced by pressure, heat, the initial density of the material, the speed of pelleting and the initial volume of the material. Experimental researches were conducted using a single pellet stand, on two pelleting dies (with 8 and 10 mm orifice diameter), for 3 raw material moistures (10%; 13%; 16%), 3 pelleting speeds (1.3 mm/s; 2.1 mm/s; 2.8 m/s), 3 die temperatures (70 °C; 80 °C; 90 °C) and 3 different compression forces (10 kN; 20 kN; 30 kN). The output parameters followed, those that express the quality of the pellets and the efficiency of the pelleting process, were: the energy consumed to obtain pellets, the length, volume, density and moisture of the pellets and their durability over time. The methodology for conducting the experimental researches on the stand involves the following stages: weighing the sawdust; starting the heating of the die and waiting for the desired temperature to be reached; inserting the sawdust into the die; positioning the piston inside the pressing orifice and fixing it in the head of the force machine; the pelleting speed and the force are introduced in the software program; the process is initiated concomitantly starting the measurement of the energy consumed; the process is automatically stopped when the maximum pelleting force is reached, also stopping the measurement of the consumed energy. The validation of the two models proposed was performed both on the experimental data obtained on the stand, as well as on a set of data obtained on a ring die pelleting machine. Also, the statistical modeling and optimization of the biomass pelleting process was performed.

## CUPRINS

<b>CUVÂNT ÎNAINTE</b>	<b>6</b>	<b>5</b>
<b>SIMBOLURI ȘI NOTAȚII</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCERE. ROLUL ȘI IMPORTANȚA DENSIFICĂRII BIOMASEI. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT</b>	<b>10</b>	<b>9</b>
1.1. Introducere	10	9
1.2. Resursele de biomasă	11	9
1.3. Utilizarea biomasei în scopuri energetice	11	10
1.4. Proprietățile biomasei pentru densificare	12	10
1.5. Densificarea biomasei prin peletizare	13	10
1.6. Obiectivele tezei de doctorat	17	11
<b>2. STUDIUL PROPRIETĂȚILOR ȘI CARACTERISTICILOR BIOMASEI UTILIZATE ÎN PROCESUL DE PELETIZARE</b>	<b>18</b>	<b>12</b>
2.1. Resursele de biomasă	18	12
2.2. Direcții principale de utilizare energetică a biomasei în România	21	13
2.3. Proprietățile biomasei legate de procesul de compactare - peletizare	22	13
2.3.1. Proprietățile fizice ale biomasei	23	13
2.3.2. Proprietățile chimice ale biomasei	27	14
2.4. Proprietățile materialului din biomasă necesare în vederea densificării	30	-
2.5. Concluzii	33	-
<b>3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND DENSIFICAREA BIOMASEI PRIN PELETIZARE</b>	<b>35</b>	<b>15</b>
3.1. Considerații generale asupra densificării biomasei	35	15
3.2. Tipuri generale de echipamente de densificare a biomasei	41	17
3.2.1. Echipamente de peletizat cu matriță plană	41	17
3.2.2. Echipamente de peletizat cu matriță inelară	47	17
3.3. Stadiul actual al cercetărilor teoretice privind procesul de peletizare	52	18
3.4. Stadiul actual al cercetărilor experimentale privind procesul de peletizare	57	19
3.5. Soluții constructive de echipamente de peletizare din brevete de invenție	62	19
3.6. Concluzii	68	-
<b>4. CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PELETIZARE A BIOMASEI</b>	<b>70</b>	<b>20</b>
4.1. Generalități	70	20
4.2. Contribuții la modelarea comprimării în cadrul procesului de peletizare	77	21
4.3. Concluzii	82	-
<b>5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PROCESUL DE PELETIZARE A BIOMASEI PE STAND</b>	<b>84</b>	<b>22</b>
5.1. Obiectivele cercetărilor experimentale	84	22
5.2. Pregătirea materialului pentru efectuarea determinărilor experimentale	84	22
5.3. Metodologia de lucru privind procesul de peletizarea a biomasei din rumegușul de brad	86	22

5.3.1.	Caracterizarea fizico-chimică a biomasei utilizată pentru experimentări	86	-
5.3.2.	Planul experimental referitor la procesul de compactare a biomasei și metoda utilizată	92	23
<b>5.4.</b>	<b>Aparatură și echipamentele de lucru utilizate pentru determinările experimentale</b>	<b>93</b>	<b>24</b>
5.4.1.	Aparatură folosită pentru pregătirea materialului utilizat în procesul de peletizare	93	24
5.4.2.	Aparatură folosită pentru determinarea proprietăților fizico-chimice ale biomasei	93	24
<b>5.5.</b>	<b>Aparatură folosită în procesul de peletizare</b>	<b>94</b>	<b>24</b>
<b>5.6.</b>	<b>Rezultate experimentale ale procesului de peletizare a rumegușului de brad</b>	<b>100</b>	<b>25</b>
5.6.1.	Rezultate experimentale ale procesului de compactare	100	25
5.6.2.	Analiza statistică a rezultatelor experimentale	106	27
5.6.3.	Analiza variațiilor parametrilor mășurați cu parametrii regimului de lucru	123	29
<b>5.7.</b>	<b>Evaluarea evoluției în timp a lungimii peletelor</b>	<b>128</b>	<b>30</b>
<b>5.8.</b>	<b>Validarea unor modele matematice clasice de compactare a materialelor pulverulente cu datele experimentale obținute</b>	<b>142</b>	<b>33</b>
<b>5.9.</b>	<b>Concluzii</b>	<b>148</b>	<b>34</b>
<b>6.</b>	<b>CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PELETIZARE A BIOMASEI PE BAZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE</b>	<b>151</b>	<b>34</b>
6.1.	Validarea modelelor cu datele experimentale obținute utilizând standul pentru o singură peletă	151	34
6.2.	Validarea modelelor matematice utilizând o mașină de peletizat cu matriță inelară	157	36
6.3.	Modelarea statistică și optimizarea procesului de peletizare a biomasei	167	40
6.4.	Concluzii	177	45
<b>7.</b>	<b>CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. RECOMANDĂRI ȘI PERSPECTIVE</b>	<b>179</b>	<b>45</b>
7.1.	Concluzii privind cercetările teoretice și experimentale	179	45
7.2.	Contribuții personale	182	48
7.3.	Recomandări și perspective	182	48
	<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>183</b>	<b>-</b>
	<b>ANEXE</b>	<b>191</b>	<b>-</b>



## CUVÂNT ÎNAINTE

În decursul ultimelor decenii, înlocuirea combustibililor fosili cu cei proveniți din surse regenerabile de energie a devenit o preocupare majoră la nivel mondial, cu rol în reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și a poluării în general. Biomasa reprezintă resursa regenerabilă cu cea mai mare răspândire pe suprafața pământului și are avantajul că poate fi utilizată cu ușurință de către un spectru larg al populației. Peletizarea reprezintă unul din cele mai bune moduri de utilizare a biomasei drept combustibil, în urma procesului rezultând biocombustibili solizi cu caracteristici similare lemnului destinat arderii.

Teza de doctorat „*Cercetări privind optimizarea procesului de densificare a biomasei*” prezintă o sinteză a cercetărilor experimentale efectuate de autoare în domeniul compactării biomasei lemnoase reprezentate de rumeguș din brad prin peletizare, utilizând un dispozitiv special realizat de către autoare în vederea efectuării experimentelor, respectiv modelarea fenomenului peletizării în vederea producerii unor pelete cu atribute calitative bune.

Lucrarea este structurată în 7 capitole, dezvoltate în 182 pagini, conține 181 figuri și grafice, 120 relații matematice, 51 tabele precum și o bibliografie alcătuită din 158 referințe. De asemenea, lucrarea cuprinde și o listă de notații (2 pagini), iar la finalul ei, 4 anexe (30 pagini), unde sunt prezentate pe larg datele obținute în cadrul cercetărilor experimentale, analiza datelor și programele de peletizare din software-ul mașinii de peletizare).

**Obiectivul general al cercetărilor teoretice și experimentale îl constituie determinarea experimentală în laborator a influenței parametrilor de intrare și control asupra celor de ieșire (calitativi) ai peletelor, cu ajutorul unui stand automatizat, respectiv validarea experimentală, în condiții de exploatare, a unor modele matematice și optimizarea procesului de peletizare.**

În **capitolul 1**, intitulat „*Introducere. Importanța și obiectivele tezei de doctorat*” sunt prezentate pe scurt aspecte generale privind operația de compactare a biomasei prin peletizare, respectiv factorii de influență ai procesului. De asemenea, sunt prezentate atât importanța, cât și obiectivele specifice prin care este posibilă atingerea obiectivului principal, atât din punct de vedere teoretic, cât și din punct de vedere experimental.

În **capitolul 2**, „*Studiul proprietăților și caracteristicilor biomasei utilizate în procesul de peletizare*”, sunt prezentate noțiuni introductive privind: resursele regenerabile și importanța utilizării lor, tipurile de biomasă și direcțiile de utilizare, proprietățile fizice și chimice ale acesteia, precum și proprietățile biomasei care influențează procesul de densificare a acesteia prin procesul de peletizare. În finalul capitolului se prezintă concluziile referitoare la importanța și proprietățile biomasei.

În **capitolul 3**, „*Stadiul actual al cercetărilor privind densificarea biomasei prin peletizare*”, se prezintă considerațiile teoretice asupra soluțiilor constructive de echipamente de peletizare a biomasei, analiza procesului de lucru al mașinilor de peletizat cu matriță plană, respectiv inelară, cercetările teoretice și experimentale realizate pe plan mondial asupra peletizării biomasei și modelele matematice care descriu procesul. Capitolul se încheie cu prezentarea unor soluții constructive noi identificate în brevete de invenție internaționale. Capitolul se finalizează cu prezentarea concluziilor soluțiilor utilizate în obținerea biocombustibililor solizi prin peletizare.

În **capitolul 4**, „*Cercetări teoretice privind modelarea matematică a procesului de peletizare a biomasei*” sunt prezentate noțiuni teoretice asupra modelării procesului de compactare, cu detalierea celor mai cunoscute modele pentru acest tip de proces. A fost propus

un model matematic ce exprimă densitatea finală a peletelor, ca fiind determinată de către puterea finală aplicată în timpul procesului, umiditatea inițială a materialului și densitatea inițială a materialului și un model matematic, obținut prin analiză dimensională utilizând teorema  $\pi$ , care exprimă densitatea peletelor care este influențată de presiune, căldură, densitatea inițială a materialului, viteza de peletizare și volumul inițial al materialului, acestea fiind ulterior validate prin determinări experimentale.

**Capitolul 5**, „*Cercetări experimentale asupra procesului de peletizare a biomasei pe un stand pentru o singură peletă*” cuprinde cercetările experimentale proprii, realizate la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Mașini și Instalații Destinate Agriculturii și Industriei Alimentare – INMA București. Se prezintă obiectivele și metodica determinărilor experimentale de peletizare a biomasei în laborator, standul experimental proiectat și realizat special pentru realizarea probelor și aparatura, utilizate pentru realizarea cercetărilor experimentale, precum și determinarea caracteristicilor fizice ale materialului din biomasă. Sunt descrise etapele cercetărilor experimentale pe standul construit pentru peletizarea biomasei reprezentată de rumeguș de brad. Pentru validarea experimentală a modelului matematic obținut în capitolul anterior, au fost realizate câte 243 de probe (pelete) pentru fiecare matriță utilizată (cu orificiul de peletizare de 8 și de 10 mm), în cadrul cărora au fost variați următorii parametri: umiditatea materialului, temperatura matriței, forța de comprimare și viteza de peletizare. Ca date de ieșire ale procesului de peletizare a rumegușului de brad au fost înregistrate: energia consumată, lungimea peletelor (calculându-se ulterior densitatea) și umiditatea peletelor. Probele obținute au fost monitorizate timp de 90 de zile, timp în care au fost realizate 14 măsurări ale peletelor, pentru a se determina evoluția în timp a lungimii și implicit a densității. Capitolul se încheie cu prezentarea concluziilor referitoare la factorii de influență majoră asupra calității peletelor obținute în cadrul cercetărilor experimentale.

**În capitolul 6**, „*Cercetări privind optimizarea procesului de peletizare a biomasei pe baza rezultatelor experimentale*”, obiectivul principal a fost reprezentat de validarea modelelor matematice propuse în capitolul 4, pe baza experimentelor realizate atât utilizând standul pentru o singură peletă, cât și pe o mașină de peletizat cu matriță inelară. Structura sistemică cu ajutorul căreia s-a realizat descrierea procesului de peletizare a rumegușului de brad în matrița cilindrică, este o descriere modernă și potrivită proceselor tehnologice, deoarece furnizează instrumente de predicție și optimizare utile în exploatarea rațională a tehnologiilor. În finalul capitolului sunt prezentate concluzii asupra validării modelor și a optimizării procesului.

**Capitolul 7**, „*Concluzii generale. Contribuții. Recomandări și perspective*”, prezintă concluziile generale desprinse în urma realizării cercetărilor teoretice și experimentale cu privire la densificarea biomasei prin peletizare. De asemenea, sunt prezentate contribuțiile personale cu privire la procesul studiat și la experimentele realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și noi direcții de cercetare și recomandări, care pot reprezenta subiecte pentru studii teoretice și experimentale ce pot abordate de către alți cercetători.

Autoarea consideră că prezenta teză de doctorat reprezintă o contribuție modestă la clarificarea unor aspecte importante legate de optimizarea procesului de densificare a biomasei prin peletizare, acestea putând fi aprofundate în cadrul unor cercetări ulterioare.

## SIMBOLURI ȘI NOTAȚII

<i>SRE</i>	surse regenerabile de energie
<i>EE</i>	eficiență energetică
<i>ET</i>	energie termică
$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitate
$\rho_a$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitatea aparentă
$\rho_v$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitatea în vrac
<i>m</i> [ $\text{kg}$ ]	masă
<i>V</i> [ $\text{m}^3$ ]	volum
$V_a$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul aparent
$V_v$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul în vrac
$\alpha_M$ [ $^\circ$ ]	unghiul de taluz natural
$Q_i$ [ $\text{MJ}$ ]	puterea calorică inferioară
<i>LC</i> [%]	conținut de lignină raportat la starea uscată și lipsită de cenușă
$C_f$ [%]	carbon fix
$F_{CF}$ [%]	fracția de carbon fix
$F_v$ [%]	fracția de substanțe volatile
$F_i$ [%]	fracția de inerte
$\lambda$ [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	conductivitatea termică
$D_p$ [ $\text{m}$ ]	diametru peletă
$L_p$ [ $\text{m}$ ]	lungime peletă
<i>C</i> [%]	conținut de cenușă al peletelor
<i>DM</i>	durabilitate mecanică pelete
<i>DV</i>	densitate în vrac pelete
<i>r</i> [ $\text{m}$ ]	raza rolei de peletizare
<i>R</i> [ $\text{m}$ ]	raza matriței de peletizare
$E_c$ [ $\text{Wh}$ ]	energia consumată
$I_{AVE}$ [ $\text{A}$ ]	curentul mediu
<i>U</i> [ $\text{V}$ ]	tensiunea electrică
<i>MSR</i> [-]	metodologia suprafețelor de răspuns
<i>RNA</i> [-]	rețea neuronală artificială
<i>p</i> [ $\text{MPa}$ ]	presiunea de peletizare
<i>D</i> [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitatea relativă a comprimatului
$\rho_f$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitatea finală
$V_0$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul la presiunea 0
<i>V</i> [ $\text{m}^3$ ]	volumul la presiunea <i>p</i>
$V_s$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul materialului solid liber de goluri
$V_R$ [ $\text{m}^3$ ]	raportul volumului
$V_1$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul la presiunea 1
<i>c</i> [-]	gradul de reducere a volumului
$\mu$ [-]	coeficientul de frecare
$L_c$ [ $\text{m}$ ]	lungime canal peletizare
$p_m$ [ $\text{MPa}$ ]	presiunea medie
$\rho_r$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	densitatea relativă a rumegușului compactat
$V_\infty$ [ $\text{m}^3$ ]	volumul net al pulberilor
$p_0$ [ $\text{MPa}$ ]	presiunea înaintea comprimării
$\theta$ [ $^\circ\text{C}$ ]	temperatura matriței pe durata procesului
$U_i$ [%]	umiditatea materiei prime

$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	densitatea materiei prime
$\varnothing_m$ [m]	diametrul orificiilor matriței
$F_{max}$ [kN]	forța maximă aplicată (forța de comprimare)
$V$ [m/s]	viteza de peletizare
$L$ [m]	lungimea peletei
$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	densitatea peletei
$U_p$ [%]	umiditatea peletei
$V_p$ [m <sup>3</sup> ]	volumul peletei
$Q$ [J]	cantitatea de căldură
$CU$ [%]	conținut de umiditate al amestecului de biomasă
$V_d$ [%]	conținut de materii volatile
$M_{ad}$ [%]	umiditatea, ca procentaj din masa totală a materialului, determinată pentru proba de analizat
$A_d$ [%]	conținut de cenușă
$g$ [mm]	granulație rumeguș
$dF$ [kN]	forțele elementare de frecare ce acționează asupra materialului
$L_c$ [mm]	perimetrul secțiunii transversale a cilindrului presare
$\beta$ [-]	coeficient de expansiune laterală
$A_c$	aria cilindrului de presare
$P_0$ [MPa]	presiunea atmosferică
$e_g$ [-]	eroarea globală
$e_{max}$ [-]	eroarea maximă
$c$ [J/g °C]	capacitatea termică masică
$m$ [g]	masa sistemului (masa probei de biomasă)
$\Delta T$ [°C]	variația de temperatură datorată schimbului de căldură
$R^2$ [-]	coeficient de determinare
$q$ [kWh]	consumul specific de energie electrică
$P_c$ [kW]	puterea consumată
$Q_p$ [kg/h]	cantitatea de produs procesat
$\eta_{me}$ [-]	randamentul motorului electric de acționare

## CAPITOLUL 1

### INTRODUCERE. ROLUL ȘI IMPORTANȚA DENSIFICĂRII BIOMASEI. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

#### 1.1. Introducere

În prezent, cercetările în domeniul obținerii biocombustibililor solizi reprezintă o preocupare principală în domeniul ingineriei mecanice, având ca scop major optimizarea proceselor de densificare, îmbunătățirea calității produselor din biomasă, minimizarea costurilor, creșterea randamentelor echipamentelor de comprimare, precum și contribuția la protejarea mediului înconjurător.

Încurajarea cercetărilor în domeniul peletizării biomasei urmărește determinarea și utilizarea unor soluții optime în proiectarea, realizarea, dar și utilizarea mașinilor de peletizat, cu rezultat final în obținerea unor produse finale – pelete de o calitate cât mai bună, care să corespundă standardelor în domeniu.

Este important să se coreleze cercetările în domeniu cu tendințele actuale de a se renunța la combustibilii fosili și a se utiliza energie regenerabilă, cu atribute de ardere cât mai bune și cu o durabilitate cât mai mare.

Realizarea de cercetări teoretice și experimentale în domeniul peletizării biomasei urmărește creșterea calității produselor finite, corelată cu scăderea costurilor și a impactului asupra mediului.

Pentru a obține biocombustibili solizi cu densitate și durabilitate adecvate, trebuie să existe o corelare foarte bună între proprietățile fizico-chimice ale biomasei utilizate ca materie primă și caracteristicile echipamentelor de peletizat (tipul de matriță, dimensiunea orificiilor, tipul de acționare asupra materialului, viteza de peletizare, etc.).

#### 1.2. Resursele de biomasă

Biomasa reprezintă o sursă regenerabilă de energie promițătoare pentru țara noastră, atât din punct de vedere al abundenței, cât și din prisma posibilităților multiple de utilizare.

O parte importantă din biomasa utilizată pentru obținerea de bioenergie are ca origine material vegetal și produse animaliere. O primă clasificare a biomasei poate fi făcută după originea biomasei în funcție de sector, cum ar fi: agricultură, silvicultură, industrie și sectorul urban. Un alt tip de clasificare poate fi făcut în funcție de natura sa: culturi energetice, reziduuri din agricultură sau silvicultură și diferite tipuri de deșeuri, [9, 23].

Din punct de vedere al utilizării în scopuri energetice, biomasa este împărțită în următoarele tipuri:

- Culturi energetice:
  - o culturi ierboase anuale (cereale, floarea soarelui, etc.);
  - o culturi ierboase perene (stuf, trestie, iarba elefantului, etc.);
  - o culturi lignocelulozice (salcie, plop, miscanthus, etc);
- Reziduuri agricole (paie, coji, tulpini de floarea soarelui, rapiță, etc);
- Reziduuri forestiere (rumeguș din tăieri de pomi, crengi, frunze, etc.);
- Reziduuri zootehnice (gunoi de grajd).

Biomasa poate fi folosită pentru obținerea de:

- Hrană;
- Furaje;
- Materii prime și auxiliare pentru diferite industrii;

**Energie.**



### 1.3. Utilizarea biomasei în scopuri energetice

Diversele tipuri de reziduuri lemnoase (rumeguș, crengi de la toaletarea pomilor, coarde de viță de vie, coji de nuci, alune, etc.) sau agricole (paie de cereale, coceni și ciocălăi de porumb, tulpini de plante leguminoase, etc.) sunt adecvate pentru a fi utilizate pentru obținerea de energie. Prin utilizarea acestor tipuri de deșeuri, se evită transformarea lor în deșeuri neutilizate și se asigură utilizarea completă a unor resurse importante, putând în final să scadă sau, în anumite cazuri unde există suficiente resurse de biomasă, să înlocuiască cererea pentru combustibili fosili cum ar fi cărbunele, petrolul sau gazul. Este necesară o planificare minuțioasă la nivel național și local, precum și instalarea de infrastructuri pentru producția de biocombustibili pentru utilizarea eficientă a biomasei, [13, 68, 92, 114].

Combustibilul solid sub formă de pelete și brichete este produs din reziduurile agricole și forestiere (paie de cereale, coceni, ciocălăi și tulpini de porumb, paie și păstăi de soia, rapiță, coarde de viță de vie, resturile tehnologice din întreținerea livezilor, crengi, rumeguș, coajă de copac, etc.), ambele tipuri reprezentând o alternativă eficientă la combustibilii clasici.

Deosebirea majoră față de combustibilii clasici constă în dimensiunile reduse și în forma regulată a peletelor și brichetelor, permițându-le astfel să fi folosite drept combustibil pentru instalații automatizate de obținere a energie termice.

### 1.4. Proprietățile biomasei pentru densificare

Proprietățile biomasei afectează puternic calitatea materiei prime pentru densificare și în cele din urmă utilizarea ei în aplicațiile de combustie, [12, 18]. Aceste proprietăți includ densitatea, dimensiunea particulelor, curgerea, umiditatea, puterea calorică, conținutul de cenușă și culoarea, reprezentând caracteristici foarte importante pentru proiectarea sistemelor de manipulare, transport, depozitare și a echipamentelor de conversie a biomasei.

**Tabelul 1.1.** Caracteristicile biomasei și impactul asupra lanțului de procesare-utilizare, [83]

Proprietăți	Aplicarea în lanțul de procesare
<b>Densitatea</b>	Logistică pentru transportul și depozitarea biomasei în diferite forme: așchii de lemn, brichete, pelete, etc.
<b>Dimensiunea particulei</b>	Parametri de proiectare pentru conversia eficientă
<b>Unghiul de taluz natural</b>	Parametri de proiectare pentru manipulare și depozitare
<b>Umiditate</b>	Parametri de proiectare pentru procesele de uscare și conversie termică
<b>Puterea calorică</b>	Eficiența recuperării energetice
<b>Conținutul de cenușă</b>	Estimarea riscului potențial de formare a zgurei sau a depunerilor în timpul combustiei / gazeificării
<b>Culoarea</b>	Controlul calității și estimarea rapidă a proprietăților combustibilului

### 1.5. Densificarea biomasei prin peletizare

Densificarea biomasei constă în două etape:

- Compactare sub presiune a materialului pentru reducerea volumului și aglomerarea particulelor;
- Activarea ligninei existente în materialul lemnos prin această presiune rezultând “lipirea” materialului fără a mai fi nevoie de un agent de lipire suplimentar.

Procesul de obținere a peletelor presupune ca biomasa să fie tratată la presiuni mari și forțată să treacă prin orificiile, în general cilindrice, ale unei matrițe speciale. În cazul existenței unor condiții favorabile, biomasa „fuzionează”, rezultând un produs solid. Procesul de obținere este denumit „extrudare”. Unele tipuri de biomasă (în general cele lemnoase) conduc în mod natural la obținerea de pelete bune din punct de vedere calitativ, dar pentru alte tipuri de biomasă (majoritatea tipurilor de biomasă agricolă) poate fi necesară utilizarea de „lianți” pentru a menține peletele într-o formă legată după răcire.

## 1.6. Obiectivele tezei de doctorat

### Obiective generale

Obiectivul general al lucrării îl constituie studiul teoretic și experimental al influenței parametrilor de intrare și control asupra celor de ieșire (calitativi) ai peletelor din biomasă prin intermediul unui stand automatizat, validarea experimentală, în condiții de exploatare, a unor modele matematice pentru optimizarea procesului de peletizare.

### Obiective specifice

Pe parcursul tezei sunt prezentate unele rezultate personale obținute prin cercetări experimentale în laborator pe stand și în condiții de exploatare pe o mașină de peletizare, îndeplinirea obiectivului principal al tezei de doctorat necesitând realizarea următoarelor obiective specifice:

- Studiul proprietăților și caracteristicilor biomasei utilizate în procesul de peletizare;
- Analiza unor lucrări științifice în domeniu, atât teoretice, cât și experimentale;
- Studiul prospectiv al echipamentelor și instalațiilor de compactare a biomasei prin peletizare;
- Studiul soluțiilor constructive de echipamente de peletizat din brevete de invenție;
- Identificarea unor modele matematice consacrate pentru a estima densitatea sau volumul peletelor prin parametrii de intrare și comandă ai procesului;
- Stabilirea factorilor care influențează procesul de peletizare și densitatea peletelor, în funcție de caracteristicile materiei prime (biomasa);
- Dezvoltarea unor modele matematice proprii pentru estimarea densitatea peletelor din biomasă lemnoasă;
- Proiectarea, realizarea și calibrarea standului experimental pentru cercetări în laborator;
- Realizarea de cercetări experimentale de peletizare utilizând standul experimental;
- Determinarea densității peletelor obținute pentru două dimensiuni ale orificiului de presare prin intermediul standului de experimentări;
- Monitorizarea evoluției lungimii peletelor în timp;
- Realizarea de determinări experimentale în condiții de exploatare, pe o mașină de peletizat cu matriță inelară;
- Validarea modelelor matematice propuse pe baza rezultatelor obținute prin cercetările experimentale realizate pe standul pentru o singură peletă și pe mașina de peletizat cu matriță inelară;
- Elaborarea unui set de recomandări pentru un proces de peletizare optimizat;
- Diseminarea pe scară largă a rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale asupra procesului de peletizare prin publicarea de lucrări științifice în reviste de profil și în volumele unor conferințe de specialitate.

## CAPITOLUL 2

### STUDIUL PROPRIETĂȚILOR ȘI CARACTERISTICILOR BIOMASEI UTILIZATE ÎN PROCESUL DE PELETIZARE

#### 2.1. Resursele de biomasă

Conform definiției oferită de Directiva 2009/28/CE, biomasa este “fracțiunea biodegradabilă a produselor, deșeurilor și reziduurilor de origine biologică din agricultură (inclusiv substanțe vegetale și animale), silvicultură și industriile conexe, inclusiv pescuitul și acvacultură, precum și fracțiunea biodegradabilă a deșeurilor industriale și municipale”. Aceasta înseamnă că, în condițiile unei procesări industriale adecvate, biomasa proaspăt recoltată poate fi convertită în produse similare cu gazul natural sau cu combustibilii lichizi sau solizi. Reprezintă resursa regenerabilă cea mai abundentă de pe planetă. Prin aplicarea unor variate procese de transformare, cum ar fi arderea, gazeificarea sau piroliza, biomasa poate fi transformată în “bio-combustibili” pentru transport, “bio-căldură” sau “bio-electricitate”. Biomasa se enumeră printre primele forme de energie utilizată de om, odată cu descoperirea focului, [20,51].

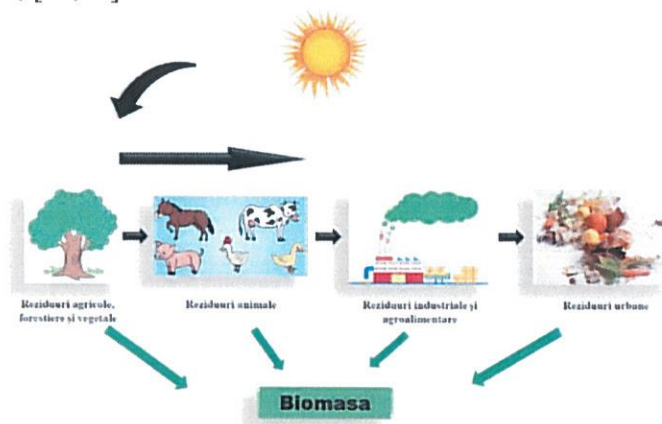


Fig. 2.1. Sursele de obținere a biomasei, [77]

Biomasa este compusă din o serie de blocuri de construcție formate din glucide obținute din bioxidul de carbon și apa din sol. În acest fel, prin fotosinteză, energia solară este păstrată în structura chimică a biomasei. Prin arderea biomasei, se produce o reacție între carbonul din plante și oxigenul care întreține arderea, formându-se dioxid de carbon și apă. Procesul acesta este ciclic, dioxidul de carbon putând participa într-un nou proces de formare a biomasei.

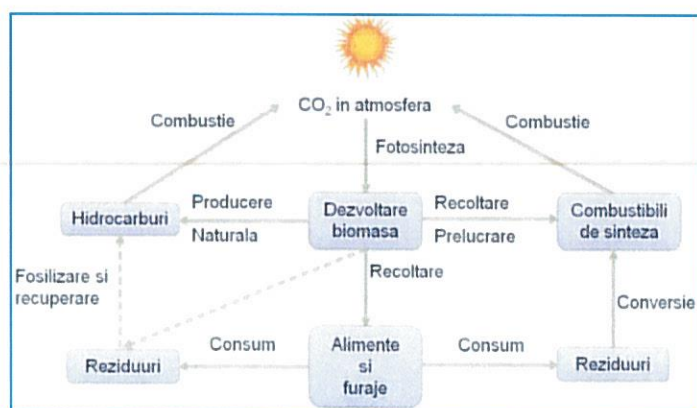


Fig. 2.2. Circuitul energiei din biomasă, [7]

Biomasa conține 7-34% lignină și 66-93% glucide reprezentate de celuloză și hemiceluloză, [120].

Energia înglobată în biomasă se poate elibera metode multiple, toate reprezentând în esență procesul chimic de ardere.

## 2.2. Direcții principale de utilizare energetică a biomasei în România

Principalele tipuri de procese de conversie ale biomasei sunt:

- **fizice** (peletizare, brichetare etc.);
- **biologice / biochimice** (fermentație aerobă, anaerobă sau alcoolică);
- **termice** (combustie, piroliză, gazeificare, hidrogenare);
- **chimice** (biodiesel), [54].

Obținerea de energie (bioenergie) din biomasă se realizează prin:

- ardere directă, generând căldură;
- ardere prin piroliză, generând singaz;
- fermentare, rezultând în biogaz ( $\text{CH}_4$ ) sau bioetanol ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ );
- transformare chimică cu generare de esteri, de exemplu, metil esteri (biodiesel) și glicerol; în etapa următoare, biodieselul purificat se poate arde în motoarele diesel; de asemenea, uleiul vegetal se poate arde în motoarele diesel ca atare sau în amestec cu motorina în diferite proporții, dar cu calități inferioare biodieselului.
- degradare enzimatică (etanol sau biodiesel), [53].

## 2.3. Proprietățile biomasei legate de procesul de compactare - peletizare

Proprietățile inerente ale biomasei sunt cele care determină atât alegerea modului de conversie, cât și orice probleme ce pot apărea în urma procesării. În mod egal, alegerea sursei de biomasă este influențată de forma în care este necesară energia și această interconexiune între cele două aspecte este cea care aduce flexibilitatea în utilizarea biomasei.

### 2.3.1. Proprietățile fizice ale biomasei

#### A) Dimensiunile și distribuția granulometrică a amestecului

În general, densitatea și durabilitatea peletelor este invers proporțională cu mărimea particulelor, deoarece particulele mici au o zonă de suprafață mai mare în timpul densificării;

Absența particulelor grosiere în masa de material va afecta în mod semnificativ eficiența producției mașinilor de peletizat. Un procent prea mare de particule foarte mici poate bloca mașinile de peletizare, afectând capacitatea de producție. Materialul măcinat mai grosier tinde să conducă la obținerea de pelete mai puțin durabile, deoarece acestea pot crea fisuri naturale în pelete, care sunt apoi sensibile la rupere.

#### B) Conținutul de umiditate al amestecului de biomasă

- facilitează gelatinizarea amidonului, denaturarea proteinei, și procesele de solubilizare a fibrelor în timpul comprimării;
- influențează în mare măsură conținutul de umiditate al produselor rezultate în urma densificării;
- acționează ca un liant în timpul procesului densificare și crește legarea prin forțe de tip van der Waals, crescând astfel aria de contact a particulei.

#### C) Densitatea

Densitatea reprezintă o caracteristică importantă a biomasei, ce influențează în mod direct materia primă ce urmează să fie procesată. Dimensiunile și formele neuniforme ale biomasei în stare brută, incluzând frunzele și tulpinile conduc la costuri mari de transport, depozitare și alimentare a materialului în fiecare unitate a operației de conversie.

#### D) unghiul de taluz natural

Unghiul de taluz natural reprezintă un indicator ce caracterizează curgerea materialului,



care este o funcție a formei particulelor, forțelor de frecare și a coeziunii. Acesta este definit ca unghiul pe care îl face suprafața liberă a unei mase de material granular lăsat să cadă pe o suprafață, cu planul orizontal.

*E) puterea calorifică inferioară (căldura de ardere)*

Reprezintă numărul de unități de căldură eliberate prin arderea completă a unei unități de masă; aceasta diferă de la specie la specie fiind mai mare la cele cu un conținut mai mare de lignină (rășinoase) și mai scăzută la foioase și la biomasa agricolă.

### **2.3.2. Proprietățile chimice ale biomasei**

*A) conținutul de cenușă*

Reprezintă produsul rămas în urma combustiei și este compusă din substanțe anorganice ne-combustibile (săruri minerale). Acestea rămân ca reziduuri sub formă de praf depozitat în locurile unde au ars combustibilii; conținutul de cenușă este o caracteristică foarte importantă a calității, pentru că cenușa provoacă probleme în procesarea și combustia biomasei.

*B) Conținutul de substanțe volatile*

Volatilele sunt componentele, cu excepția umidității, care sunt eliberate la temperaturi înalte în lipsa aerului.

*C) conținutul de carbon fix și inerte*

Este carbonul care se găsește în materialul rămas după ce materialele volatile sunt degajate; conținutul de carbon fix în biomasa agricolă este cuprins, în general, în intervalul: 15-25% și în biomasa lemnoasă între 14-23%.

*D) Conținutul de metale grele*

O importanță deosebită în valorificarea energetică a combustibililor din biomasă – de tip deșeu – este reprezentată de conținutul în metale grele; metalele grele au un impact negativ asupra mediului, urmărindu-se ca ponderea lor să fie cât mai mică.

*E) Conținutul de amidon și proteine*

Amidonul se înmoaie și își mărește volumul în prezența căldurii și a umidității printr-un proces cunoscut sub numele de gelatinizare; proteinele, la fel ca amidonul, se înmoaie sub acțiunea căldurii și a presiunii și cresc rezistența peletelor.

*F) Conținutul de fibre*

În biomasă există fibre solubile în apă și fibre insolubile în apă. În general, fibrele solubile cresc vâscozitatea materialului și au efect pozitiv asupra structurii peletelor, în timp ce fibrele insolubile se pot încurca una în alta.

*G) Conținutul de lipide*

Ajută în procesul de peletizare deoarece acționează ca un lubrifianț, dar o creștere prea mare a conținutului de lipide rezultă într-o scădere a proprietăților mecanice ale peletelor.

*H) Celuloza*

Este o polizaharidă ce reprezintă o componentă structurală importantă a peretelui celular primar al plantelor verzi.

*I) Hemiceluloza*

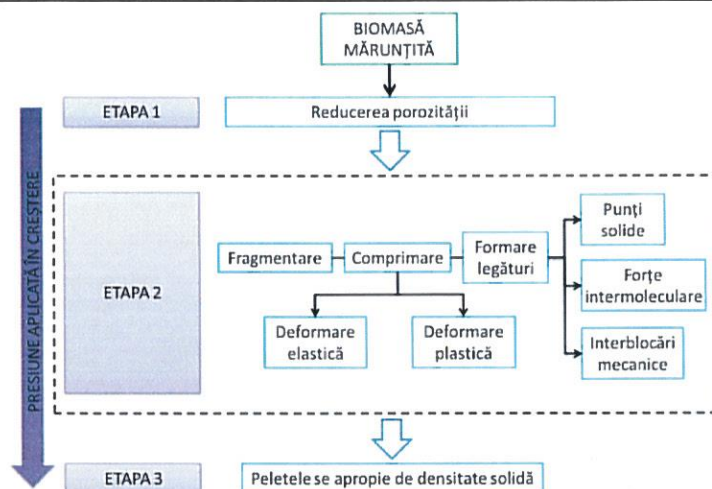
Țesutul lemnos combină suprafața microfibrilelor de celuloză, și legate între ele, constituie fibrele dure rețelele de celule interconectate.

*J) Lignina*

Este o parte componentă a lemnului, al treilea după celuloză și hemiceluloză. Lignina este deosebit de importantă în formarea pereților celulari, în special în lemn și scoarță, deoarece acestea le conferă rigiditate și le ajută să nu putrezească ușor.

Procesul de formare a peletelor constă în supunerea biomasei la presiuni înalte, timp în care particulele sunt forțate să se aglomereze. Procesul de compresie este, de regulă, obținut prin trei etape distincte.





### CAPITOLUL 3

## STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND DENSIFICAREA BIOMASEI PRIN PELETIZARE

### 3.1. Considerații generale asupra densificării biomasei

Peletele reprezintă biocombustibilul solid produs în mod normal din deșeuri lemnoase și agricole. Se prezintă ca granule cilindrice de mărimi standard, cu diametre cuprinse în general între 5 și 8 mm (uneori ajungând chiar și până la 25 mm) și cu lungime variabilă, de la 5 până la aproximativ 40 de mm și capete neregulate (rupte), [103]. Au rezistență mecanică mare și caracteristici bune de ardere. Procesul de obținere a peletelor este similar cu cel de producere a brichetelor, cu excepția faptului că biomasa trece prin orificii (găuri) mult mai mici, iar produsul finit, are dimensiuni mult mai mici. Peletele sunt utilizate cel mai des când este necesară automatizarea procesului de alimentare a instalației de ardere.

O peletă de calitate înaltă este uscată, tare și durabilă, cu cantități mici de cenușă rămase după ardere. Potrivit standardelor în vigoare, peletele trebuie să îndeplinească condițiile prezentate în tabelul 3.3.



Fig. 3.1. Mostre de pelete

Operația efectivă de peletizare reprezintă o mică parte din fluxul tehnologic de obținere a peletelor.

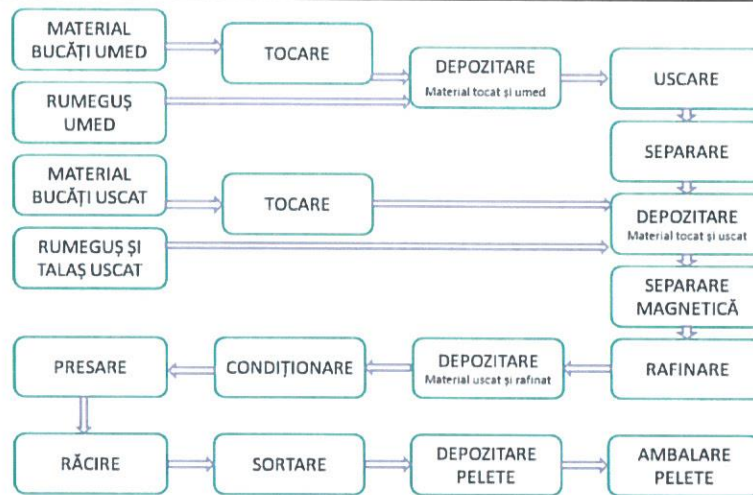


Fig. 3.2. Fluxul tehnologic de peletizare, [69, 86]

Mașinile de peletizat au ca organ principal matrița, caracterizată de raportul dintre lungime și diametru ( $L/D$ ). Lungimea se referă la adâncimea orificiului iar diametrul se referă la diametrul canalelor (orificiilor) matriței. În general, durabilitatea peletelor crește odată cu creșterea raportului  $L/D$  datorită creșterii forțelor de frecare rezultate din frecarea crescută dintre material și matriță.

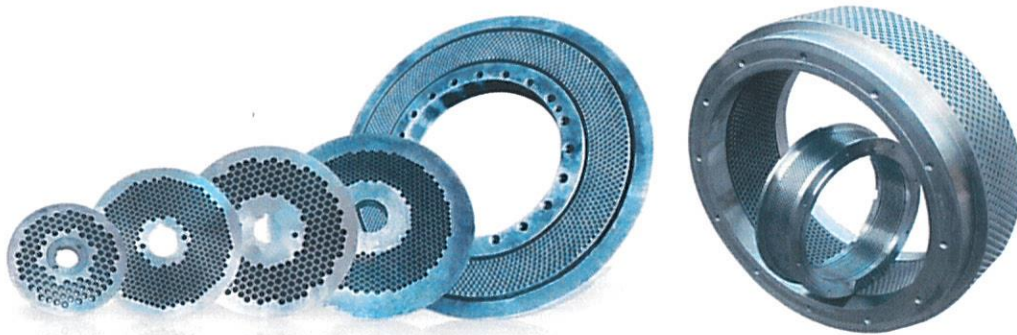


Fig. 3.3. Exemple de matrițe. stânga – plană; dreapta - inelară

Rolele de presare pot avea o formă cilindrică sau de trunchi de con. Suprafețele rolor sunt riflate sau pot fi prevăzute cu diferite forme de amprente. În timpul mișcării, rolele presează materialul în orificiile matriței. Fiecare orificiu al matriței este activ numai pe perioada în care se află în dreptul unei role de presare.



Fig. 3.4 Exemple de role de presare



### 3.2. Tipuri generale de echipamente de densificare a biomasei

#### 3.2.1. Echipamente de peletizat cu matriță plană

În general, există două tipuri de echipamente cu matriță plană pe piață, cel cu matriță rotativă și role fixe și cel cu role rotative și matriță fixă. Primul tip are o rolă staționară și o matriță rotativă și al doilea tip are matrița staționară, în timp ce ansamblul cu role se rotește.

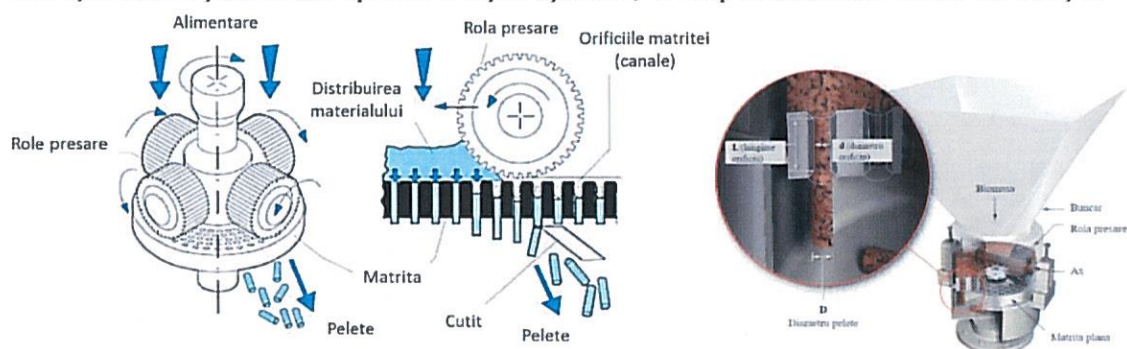


Fig. 3.5. Schema și principiul mașinii de peletizat cu matriță plană, [39]

Echipamentele de peletizat cu matriță plană sunt folosite pentru a procesa materiale cu forțe mari de adeziune, producând pelete destinate atât utilizării ca biocombustibili, cât și pentru hrana animalelor. Acestea sunt utilizate în unități mici și mijlocii. Sunt caracterizate de o funcționare sigură, au mobilitate mare, produc un zgomot redus, au un consum mic de energie. De asemenea, au o productivitate mică, comparativ cu echipamentele de peletizat cu matriță inelară.

#### 3.2.2. Echipamente de peletizat cu matriță inelară

Mașinile de peletizat cu matriță inelară au fost concepute pe baza designului matriței inelare. Principiul de bază al acestui echipament este reprezentat de operația prin care materialul este distribuit pe suprafața interioară a unei matrițe inelare perforate, acesta ajungând în dreptul fiecărei role de presare, este forțat să treacă prin orificiile matriței, formând astfel pelete.

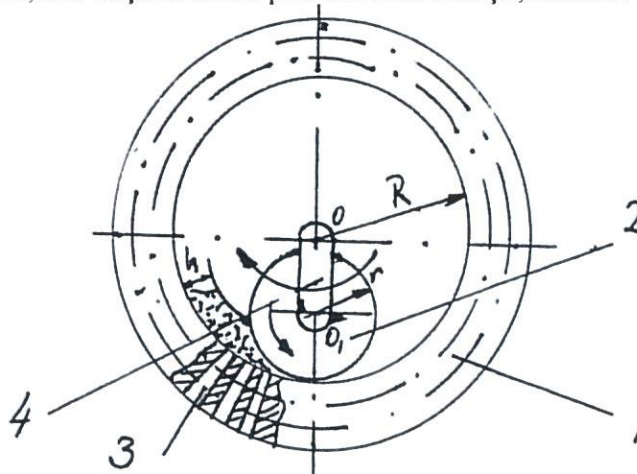


Fig. 3.6. Principiul de funcționare al mașinii de peletizat cu matriță inelară, [14]  
1. matrița inelară; 2. rola de presare; 3. orificii de peletizare; 4. ax rolă

Formarea peletelor are loc de fapt la "linia de contact" dintre role și matriță. Toate celelalte activități legate de această acțiune, cum ar fi condiționarea materialului (uscarea, mărunțire), răcirea peletelor, etc., practic sprijină acel moment în sistem. Pentru a înțelege procesul și pentru a îmbunătăți calitatea generală a peletelor, trebuie să se aibă o înțelegere aprofundată a ceea ce se întâmplă la punctul de prindere a materialului de către role.

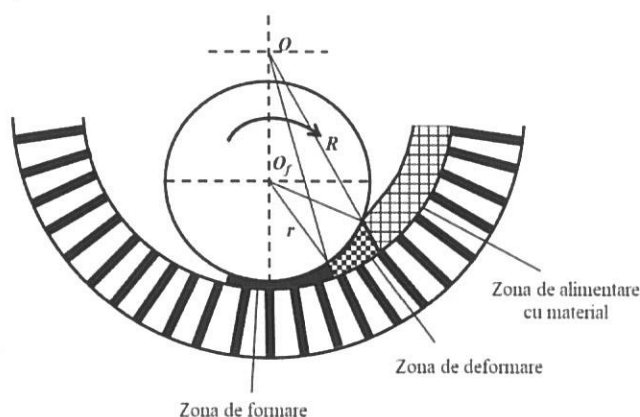


Fig. 3.7. Schema mecanismului de peletizare la mașinile de peletizat cu matriță inelară, [82]

**Zona de alimentare cu material:** în această zonă, materialul cade pe suprafața interioară a matriței. Materialul nu este afectat în mod semnificativ de către mecanica ce afectează materialele. Densitatea materialului în această zonă este de  $0,4-0,7 \text{ g/cm}^3$ .

**Zona de deformare:** sub acțiunea rotației roților de presare, biomasa intră treptat în zona în care materialul este comprimat gradual sub acțiunea forței de extrudare, formând deplasarea relativă în interiorul masei de material. Pe măsură ce forța exercitată de către role crește, distanța dintre particule scade rapid. Deformarea plastică și deformarea elastică se desfășoară concomitent. În această zonă, densitatea biomasei este de  $0,9-1,0 \text{ g/cm}^3$ .

**Zona de formare:** în această zonă, distanța dintre particulele de material se reduce și mai mult, dată fiind creșterea forței de extrudare, zona de contact dintre particule crescând rapid. Densitatea materialului în această zonă poate ajunge la  $1,2-1,4 \text{ g/cm}^3$ , [82, 129].

### 3.3. Stadiul actual al cercetărilor teoretice privind procesul de peletizare

Studiul unui sistem este important pentru a înțelege relațiile dintre componentele acestuia sau pentru a prezice modul în care va funcționa sistemul în cazul schimbării sau adăugării unor parametri. Uneori este posibil să se facă experimente cu sistemul însuși, dar nu în toate cazurile. Studiul sistemelor se face în multe cazuri prin modelarea sistemului.

✚ În cadrul articolului [99], se determină un model predictiv pentru consumul de energie utilizând metodologia suprafețelor de răspuns.

Autorii au dezvoltat un model predictiv privind consumul de energie în peletarea asistată de raze ultraviolete (UV-A). Datele experimentale obținute au fost utilizate pentru optimizarea parametrilor de proces prin intermediul metodologiei suprafețelor de răspuns (MSR), care a avut ca obiectiv determinarea parametrilor optimi de lucru ai sistemului.

Softul utilizat a înregistrat curentul mediu ( $I_{AVE}$ ). Tensiunea ( $U$ ) a fost 120 V. Energia consumată poate fi calculată utilizând următoarea ecuație:

$$E_c = U \cdot I_{AVE} \cdot \frac{120}{3600}, (\text{Wh})$$

Puterea ultrasonică, dimensiunea orificiilor matriței și masa peletei au afectat în mod semnificativ consumul de energie, acesta crescând când acești trei parametri au crescut.

Efectele masei peletelor asupra consumului de energie au fost mai semnificative la nivelul superior al puterii cu ultrasunete și la cel mai înalt nivel al dimensiunii orificiilor matriței.

### 3.4. Stadiul actual al cercetărilor experimentale privind procesul de peletizare

*Frodesona S.* et al. prezintă o serie de cercetări experimentale de peletizare a șapte tipuri de biomasă, pentru a se observa efectul umidității asupra calității peletelor obținute.

În cadrul cercetărilor au fost testate 6 niveluri ale umidității: 0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% și 15%. Peletizarea s-a desfășurat utilizând un dispozitiv pentru o singură peletă cu dimensiuni ale orificiului de presare de 8 mm.

Pentru peletele obținute s-au făcut măsurători pentru determinarea densității și durtății. În urma studiului, s-a constatat că pentru biomasa lemnoasă, cea mai mică densitate a fost înregistrată pentru probele de fag, iar cea mai mică durtate s-a obținut pentru probele de molid. Pentru toate probele, s-a observat că atât densitatea, cât și durtatea au avut cele mai mici valori pentru umiditățile cu valorile cele mai scăzute și cele mai crescute (0, 2, 4 % și 15%).

### 3.5. Soluții constructive de echipamente de peletizare din brevete de invenție

**Mașina de peletizat cu matriță dublă** [147], este o invenție din anul 2013, din SUA, care se raportează la domeniul mașinilor de peletizat și în particular la mașinile cu matriță dublă, având două matrițe care se rotesc în sens contrar ce se întrepătrund prin dinți ce se interblochează, comprimând alternativ materialul în camere de peletizare dispuse opus în timp ce matrițele sunt în mișcarea de contra-rotatie, trăgând materialul din linia de contact în jos între matrițe

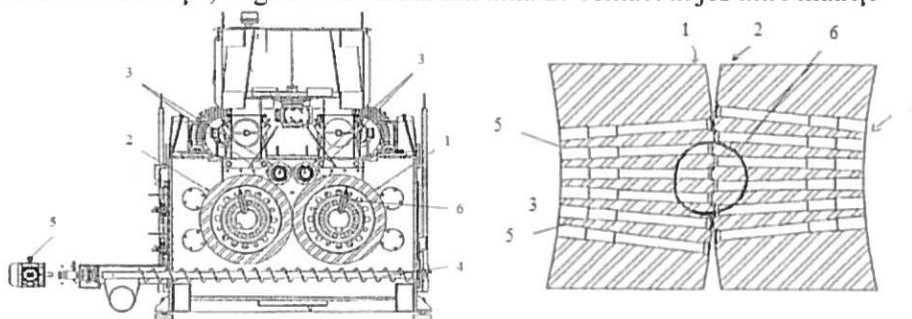


Fig. 3.8. Mașină de peletizat cu matriță dublă, [147]

**Sistem pentru formarea peletelor** [150] este o invenție din anul 2011 pentru producerea de pelete din biomasă agricolă sau lemnoasă pentru a fi utilizate în cazane de ardere sau alte echipamente similare, sistemul cuprinzând mijloace atât pentru formarea peletelor din, dar și mijloace pentru preprocesarea lemnului și / sau a altor tipuri de biomasă pentru a fi transformate în granule. Sistemul este format din:

- un sistem de formare a peletelor;
- un modul de procesare a biomasei.

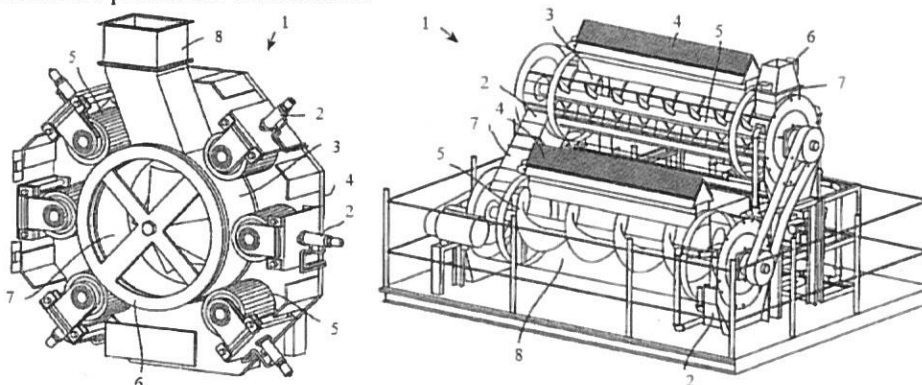


Fig. 3.9. Sistem de formare a peletelor, [150]



## CAPITOLUL 4

### CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PELETIZARE A BIOMASEI

#### 4.1. Generalități

Modelele de compresie ajută la dezvăluirea comportamentului biomasei / particulelor în timpul procesului de compactare (peletizare) și poate ajuta la optimizarea parametrilor necesari pentru a obține pelete de bună calitate. Peletele pot fi formate fie prin utilizarea aglomerărilor prin presiune, în care particulele se îmbină între ele cu sau fără ajutorul lianților.

##### Modelul Jones

Jones (1960), [55], exprimă datele de presiune-densitate a pulberilor compactate sub forma ecuației (4.1):

$$\ln \rho = m \ln(p) + b \quad (4.1)$$

unde:  $\rho$  - densitatea în vrac (masa volumică) a amestecului – kg/m<sup>3</sup>;  
 $p$  - presiunea de comprimare aplicată – MPa;  
 $m$  și  $b$  - constantele modelului.

$$b = \ln\left(\frac{1}{1 - \rho_0}\right) \quad (4.2)$$

unde:  $\rho_0$  = densitatea relativă a amestecului de pulberi (kg/ m<sup>3</sup>).

##### Modelul Heckel

Ecuația modelului Heckel, [43], este utilizată pentru exprimarea densității din punct de vedere al fracțiunilor ca o funcție a presiunii aplicate:

$$\ln \frac{1}{1 - D} = mp + b \quad (4.3)$$

unde:  $D$  – densitatea relativă a comprimatului (raportul dintre densitatea produsului comprimat și cea a materialului pulverulent).

##### Modelul Cooper-Eaton

Cooper și Eaton (1962), [17], au studiat comportamentul în timpul compactării a patru tipuri de pulberi ceramice. Pentru fiecare caz s-a presupus că densificarea este atinsă prin două procese probabilistice aproape independente și anume umplerea golurilor care au aceeași dimensiune ca particulele și umplerea golurilor cu dimensiuni mai mici decât cele ale particulelor. În baza acestor presupuneri, s-a dat următoarea ecuație (4.5):

$$\frac{V_0 - V}{V_0 - V_s} = a_1 e^{\frac{k_1}{p}} + a_2 e^{\frac{k_2}{p}} \quad (4.5)$$

unde:  $V_0$  - volumul la presiunea 0, m<sup>3</sup>;  
 $V$  - volumul la presiunea  $p$ , m<sup>3</sup>;  
 $V_s$  - volumul materialului solid liber de goluri, m<sup>3</sup>;  
 $a_1$ ,  $a_2$ ,  $k_1$  și  $k_2$  - constantele modelului Cooper-Eaton.

## 4.2. Contribuții la modelarea comprimării în cadrul procesului de peletizare

**Primul model** (4.6) propus pleacă de la modelul lui Jones, [55], bazat pe determinarea densității peletelor în funcție de presiunea aplicată asupra biomasei, dar ia în considerare factorul de corecție care ține seama de umiditatea materiei prime.

$$\rho_p(\rho_0, p, U_i) = a \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^b U_i^c \quad (4.6)$$

unde:

- $a, b$  și  $c$  sunt parametri de model, adimensionali;
- $p_0$  este presiunea atmosferică;
- $p$  se calculează folosind forța maximă în procesul de comprimare și caracteristicile geometrice ale matriței:

$$p = \frac{4F_{max}}{\pi d^2} \quad (4.7)$$

Al **doilea model**, care reprezintă o variantă mai completă a studiului asupra procesului, a fost determinat cu ajutorul teoriei analizei dimensionale – metoda  $\Pi$ .

La studiul procesului de presare a materialelor din biomasă s-a aplicat teoria analizei dimensionale, pentru modelarea matematică a acestui proces. Din teoria analizei dimensionale a fost aplicată teorema  $\Pi$ , enunțată de către Buckingham, [8].

Din cercetările teoretice ale procesului de comprimare prin peletizare a materialelor pulverulente din biomasă, au fost considerați în studiu un număr de 8 parametri principali care influențează procesul de presare, prezentați în tabelul 4.1.

**Tabelul 4.1.** Parametrii procesului de peletizare luați în considerare în analiza dimensională

Parametrul	Denumire	Notăție	Unitate măsură	Dimensiune fizică
1	Cantitatea de căldură	$Q$	kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
2	Presiunea de comprimare	$p$	N/m <sup>2</sup>	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
3	Umiditate inițială a materialului	$U_p$	%	-
4	Densitatea peletelor	$\rho_p$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
6	Masa volumică a materiei prime	$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
7	Volumul inițial de materie primă	$V_0$	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
8	Viteza de peletizare	$v$	m/s	LT <sup>-1</sup>

Astfel s-a determinat o **a doua relație**, care reprezintă o variantă mai complexă, ținând seama atât de umiditatea materiei prime, cât și de temperatura matriței în timpul procesului de peletizare este dată în formula (4.8):

$$\rho_p(\rho_0, p, U_i) = \rho_0 \left( \frac{Q}{\rho_0 v^2 V_0} \right)^a \left( \frac{p}{p_0} \right)^b U_i^c \quad (4.8)$$

În modelul (4.8), a fost introdus parametrul de comandă temperatura matriței într-un factor adimensional considerând temperatura ca având natură energetică (factorul al doilea din membrul drept, care se ridică la puterea  $a$ ).

## CAPITOLUL 5

### Cercetări experimentale privind procesul de peletizare a biomasei pe stand

#### 5.1. Obiectivele determinărilor experimentale

Principalul obiectiv al cercetărilor experimentale pe standul experimental a fost reprezentat de determinarea experimentală parametrilor de ieșire în funcție de parametrii de intrare și comandă. Acest lucru s-a realizat prin realizarea următoarelor obiective specifice:

- pregătirea materiei prime în vederea peletizării;
- conceperea, realizarea și pregătirea standului de testări experimentale pentru realizarea cercetărilor în cadrul prezentei teze de doctorat;
- determinarea proprietăților fizico-chimice ale materiei prime;
- realizarea cercetărilor experimentale utilizând două matrițe de peletizare (cu orificiul de 8 mm și de 10 mm), pentru 3 umidități ale materiei prime (10%; 13%; 16%), trei viteze de peletizare (1,3 mm/s; 2,1 mm/s; 2,8 m/s), 3 temperaturi ale matriței (70 °C; 80 °C; 90 °C) și 3 forțe diferite de compactare (10 kN; 20 kN; 30 kN);
- determinarea umidității și densității probelor realizate;
- urmărirea în timp a lungimii peletelor pentru 90 de zile, și calculul densității finale a acestora.

#### 5.2. Pregătirea materialului pentru efectuarea determinărilor experimentale

În vederea efectuării cercetărilor experimentale asupra peletizării biomasei, a fost pregătit materialul de peletizat constând în rumeguș de brad. Pentru transformarea în rumeguș a fragmentelor de brad, sunt necesare utilaje pentru tocarea grosieră și mărunțire. Rumegușul a fost ulterior sitat la dimensiuni < 2 mm și a fost realizată distribuția granulometrică a acestuia.

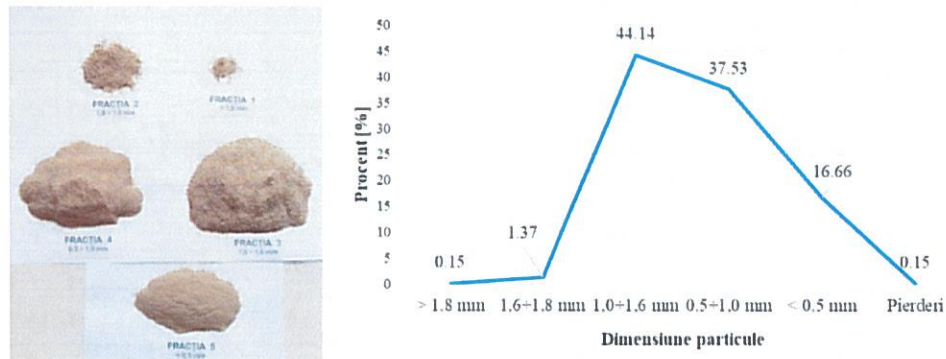


Fig. 5.1. Distribuția fracțiilor pentru rumegușul < 2 mm

#### 5.3. Metodologia de lucru privind procesul de peletizare a biomasei din rumeguș de brad

##### A) Determinarea umidității biomasei

Umiditatea a fost determinată prin uscare utilizând o etuvă tip UFE 500, Model: 100 – 800, Memmert – Germania, în conformitate cu standardul SR EN ISO 18134-1:2016.

Pentru determinarea rapidă a umidității în timpul probelor de peletizare în vederea ajustării umidității la valorile dorite, s-a utilizat o termobalanță SHIMADZU MOC63u.



Fig. 5.2. Determinarea umidității probelor la etuvă (stânga) și la termobalanță (dreapta)

### B) Determinarea masei volumice a materialului

Densitatea în vrac a probelor de rumeguș de brad a fost determinată prin metoda cilindrului, în conformitate cu standardul SR EN ISO 17828:2016.

Tabelul 5.1. Valorile determinate ale densității rumegușului de brad

Umiditate [%]	Densitate în vrac [ $\text{kg/m}^3$ ]
	Media a trei probe
10	136,08
13	142,18
16	147,37

### 5.3.2. Planul experimental referitor la procesul de compactare a biomasei și metoda utilizată

Pe parcursul procesului de peletizare a biomasei s-au urmărit o serie de parametri de intrare și comandă ai procesului de compactare, respectiv parametri de ieșire ai calității produsului finit (pentru peletele de rumeguș de brad).

**Astfel, pentru fiecare probă peletizată au fost stabilite și determinate următoarele date de intrare:**

- granulația materiei prime: < 2 mm;
- umiditatea materiei prime ( $U_i$ ): 10%, 13% și 16%;
- densitatea materiei prime ( $\rho_0$ ): 136,08  $\text{kg/m}^3$ ; 142,18  $\text{kg/m}^3$ ; 147,37  $\text{kg/m}^3$ ;

**Parametrii de comandă pentru procesul de compactare al biomasei au fost:**

- diametru orificiilor matriței ( $\varnothing_m$ ): 8 mm, 10 mm;
- forța maximă aplicată ( $F_{max}$ ): 10 kN, 20 kN și 30 kN.
- viteza de peletizare ( $v$ ): 1,3 mm/s; 2,1 mm/s; 2,8 mm/s;
- temperatura matriței pe durata procesului ( $\theta$ ): 70°C, 80°C, 90°C.

**Pentru fiecare proces de peletizare au fost determinate următoarele date de ieșire (calitate) a peletelor obținute:**

- energia consumată ( $E_c$ );
- lungimea peletei ( $L$ );
- densitatea peletei ( $\rho_p$ );
- umiditatea peletei ( $U_p$ );
- volumul peletei ( $V_p$ ).



## 5.4. Aparatură și echipamentele de lucru utilizate pentru determinările experimentale

### 5.4.1. Aparatură folosită pentru pregătirea materialului utilizat în procesul de peletizare a biomasei

#### Moară cu ciocănele TCU

Pentru tocarea grosieră a biomasei reprezentată de fragmente de tulpină de brad, s-a utilizat o moară cu ciocănele

#### Tocător de resturi vegetale TRV-0 – INMA București

După ce a fost tocat grosier, materialul a fost tocat la dimensiuni mai mici de 2 mm utilizând un tocător pentru resturi vegetale.

#### Sistemul de sitare tip AS 200 basic – Retsch, Germania

Acest sistem se utilizează pentru separarea pe fracții și determinarea fracțiilor granulometrice ale amestecurilor pulverulente.

### 5.4.2. Aparatură folosită pentru determinarea proprietăților fizico-chimice ale biomasei

Etuvă de laborator UFE 500 Model 100–800 – Memmert, Germania, utilizată pentru determinarea umidității materialelor, permite încălzirea pe toate cele patru suprafețe, acest lucru asigurând o distribuție uniformă a temperaturii în interiorul etuvei

Termobalanța Shimadzu model MOC63u – Shimadzu, Japonia, emite radiații electromagnetice infraroșii de unde scurte și medii (lungime 2 – 3.5  $\mu\text{m}$ ).

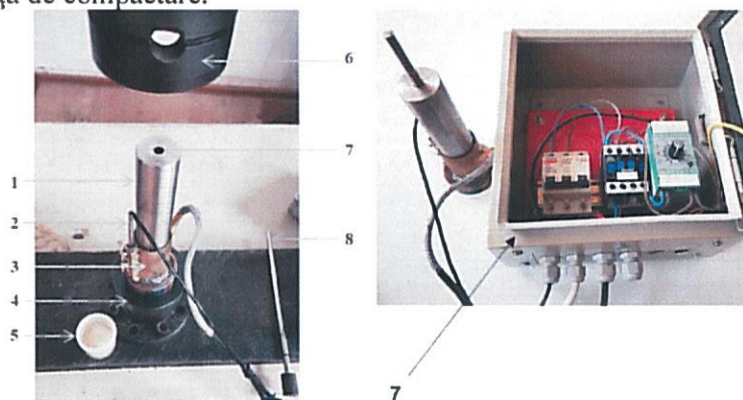
#### Balanța analitică Model: AV 220 Shimadzu- Japonia

#### Cuptor de calcinare Naberterm Seria L, GmbH, Germania

### 5.5. Aparatură folosită în procesul de peletizare

Standul experimental pentru o singură peletă, realizat special pentru efectuarea cercetărilor experimentale din cadrul tezei, este reprezentat de un dispozitiv de peletizare (fig. 5.3.) cuplat la o mașină de forță de o capacitate maximă de 100 kN, (fig. 5.4.).

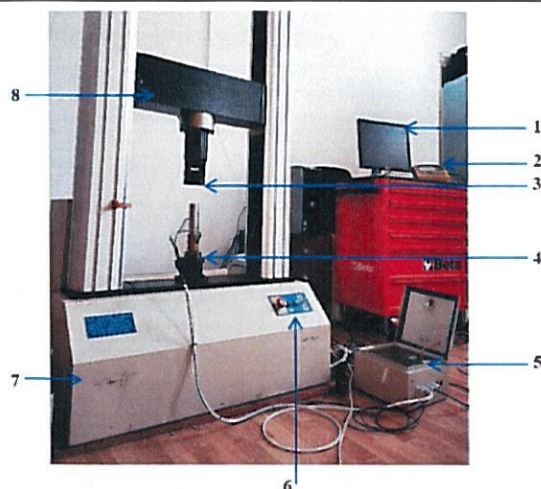
Mașina de forță este la rândul ei asistată de un calculator, astfel oferindu-se posibilitatea, prin intermediul unui program software specializat, de a se varia viteza de peletizare și forța de compactare.



**Fig. 5.3.** Dispozitiv de peletizare utilizat pentru realizarea experimentărilor

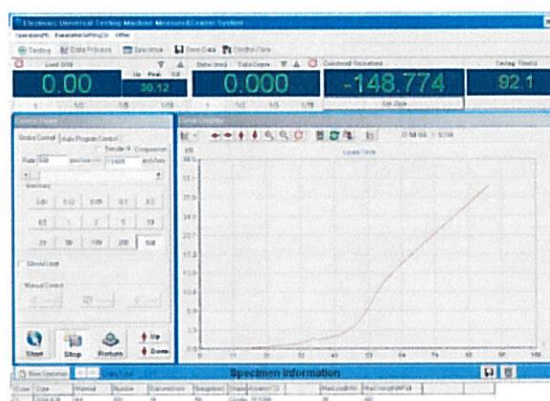
1.– matriță interschimbabilă ( $\varnothing$  8, 10 mm pentru orificiul de peletizare); 2. senzor temperatură; 3. rezistență de încălzire; 4. placă blocare; 5. cap presare; 6. piston; 7. cutie automatizare și control temperatură.





**Fig. 5.4.** Mașina de forță cuplată la instalația de peletizare

- 1.– computer; 2. analizor de fază și frecvență; 3. cap presare; 4. dispozitiv peletizare; 5. cutie automatizare și control temperatură; 6. control mașină forță; 7. carcasă; 8. greutate.



**Fig. 5.5.** Exemplu de curbă forță – timp generată de software pentru o probă de peletizare

Pentru măsurarea consumului energetic pentru fiecare probă, a fost utilizat un analizor de fază și frecvență.

Dimensiunile peletelor la ieșirea din proces au fost determinate utilizând un șubler electronic.

#### **Modul de obținere a unei probe de peletizare pe stand**

Metodologia de realizare a cercetărilor experimentale prin intermediul standului presupune parcurgerea următoarelor etape:

- se cântăresc 2,5 grame de rumeguș pentru matrița de 10 mm, respectiv 1,65 pentru cea de 8 mm;
- se pornește încălzirea matriței și se așteaptă atingerea temperaturii dorite;
- se introduce rumegușul în matriță cu ajutorul unei pâlnii metalice;
- se poziționează pistonul în interiorul orificiului de presare;
- se fixează pistonul în capul de presare al mașinii de forță;
- se introduce viteza și forța de peletizare în program;
- se inițiază procesul de peletizare a biomasei concomitent cu pornirea măsurării energiei consumate;
- procesul este oprit automat în momentul atingerii forței maxime de peletizare setate, moment în care se oprește și măsurarea energiei consumate.

### **5.6. Rezultate experimentale ale procesului de peletizare a rumegușului de brad**

#### **5.6.1. Rezultate experimentale ale procesului de peletizare**

În urma derulării procesului, au fost obținute două seturi a câte 243 de probe pentru fiecare din cele două matrițe utilizate (cu orificii de peletizare de 8 și 10 mm). Exemple de probe de pelete sunt prezentate în figura 5.6.

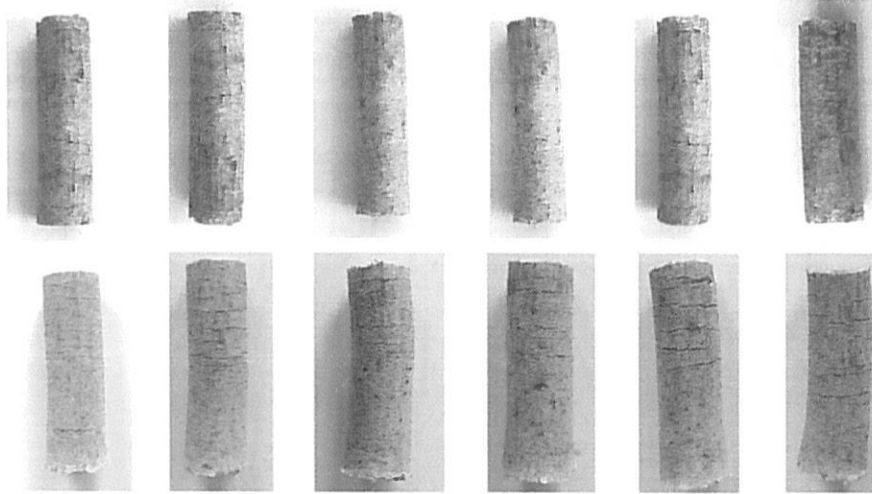


Fig. 5.6. Probe de pelete obținute (sus – pelete de 8 mm; jos – pelete de 10 mm)

Pentru parametrii de ieșire ai procesului de peletizare a fost realizată o distribuție sub formă de histogramă pentru cele 243 probe obținute pentru fiecare matriță.

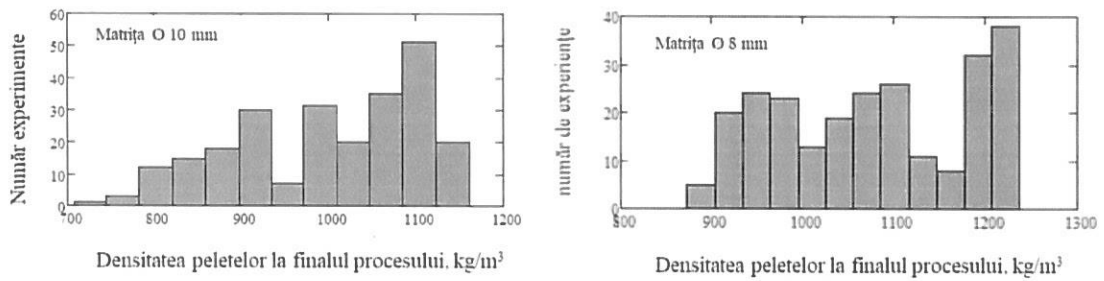


Fig. 5.7. Distribuția densității peletelor pentru cele două seturi de probe obținute

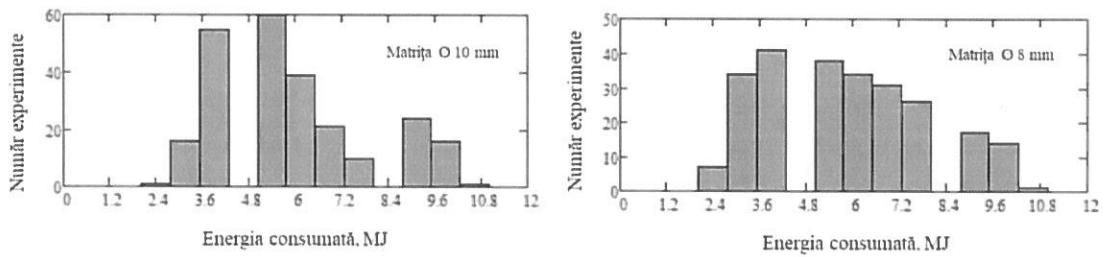


Fig. 5.8. Distribuția energiei consumate pentru cele două seturi de probe obținute

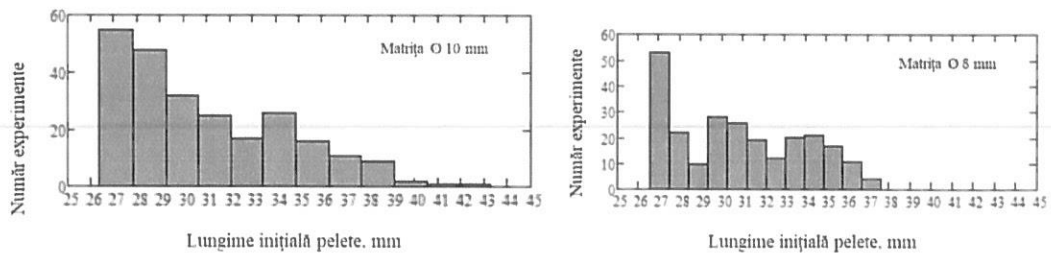


Fig. 5.9. Distribuția lungimii peletelor pentru cele două seturi de probe obținute

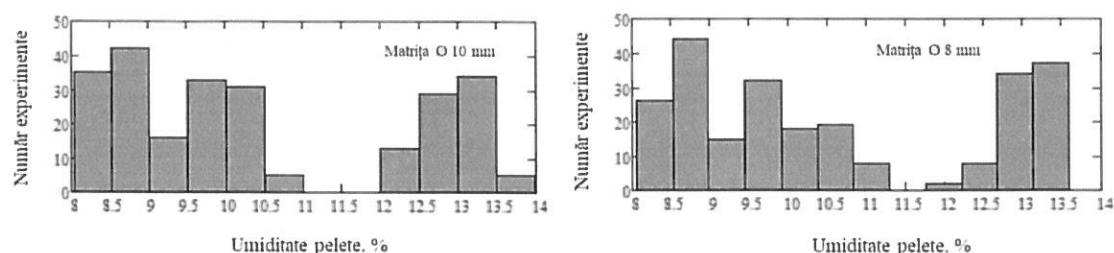


Fig. 5.10. Distribuția umidității peletelor pentru cele două seturi de probe obținute

### 5.6.2. Analiza statistică a rezultatelor experimentale

Pentru obținerea unor relații de natură empirică între parametrii procesului de peletizare, s-a realizat analiza statistică a datelor experimentale. Inițial se realizează analiza statistică elementară (pentru valorile principalilor estimatori ai parametrilor implicați în proces și corelațiile dintre aceștia).

Valorile corelației între cei zece parametri implicați în proces (parametri cu variație acceptabilă, adică iau un număr satisfăcător de valori diferite) sunt date în tabelele 5.12 și 5.13.

**Tabelul 5.2.** Corelații între parametrii variabili implicați în proces pentru matrița de 10 mm

Corelații	$\rho_0$	$\rho_p$	$F_{max}$	$U_i$	$\theta$	$v$	$E_c$	$V_p$	$L$	$U_p$
$\rho_0$		-0,78	0	0,999	0	0	-0,236	0,768	0,763	0,938
$\rho_p$	-0,78		0,333	-0,796	-0,007	-0,112	0,446	-0,994	-0,993	-0,878
$F_{max}$	0	0,333		0	0	0	0,644	-0,301	-0,305	-0,098
$U_i$	0,999	-0,796	0		0	0	-0,242	0,785	0,78	0,949
$\theta$	0	-0,007	0	0		0	-0,027	0,028	0,023	-0,089
$v$	0	-0,112	0	0	0		-0,112	0,135	0,134	0,085
$E_c$	-0,236	0,446	0,644	-0,242	-0,027	-0,112		-0,43	-0,432	-0,314
$V_p$	0,768	-0,994	-0,301	0,785	0,028	0,135	-0,43		0,999	0,871
$L$	0,763	-0,993	-0,305	0,78	0,023	0,134	-0,432	0,999		0,867
$U_p$	0,938	-0,878	-0,098	0,949	-0,089	0,085	-0,314	0,871	0,867	

**Tabelul 5.3.** Corelații între parametrii variabili implicați în proces pentru matrița de 8 mm

Corelații	$\rho_0$	$\rho_p$	$F_{max}$	$U_i$	$\theta$	$v$	$E_c$	$V_p$	$L$	$U_p$
$\rho_0$		-0,75	0	0,999	0	0	-0,287	0,762	0,762	0,942
$\rho_p$	-0,75		0,295	0,762	-0,119	-0,024	0,395	-0,996	-0,996	-0,783
$F_{max}$	0	0,295		0	0	0	0,569	-0,281	-0,281	0,080
$U_i$	0,999	-0,762	0		0	0	-0,287	0,773	0,772	0,953
$\theta$	0	-0,119	0	0		0	-0,116	0,121	0,121	-0,059
$v$	0	-0,024	0	0	0		-0,379	0,020	0,020	0,143
$E_c$	-0,287	0,395	0,569	-0,287	-0,116	-0,379		-0,390	-0,390	-0,389
$V_p$	0,763	-0,996	-0,281	0,773	0,121	0,020	-0,390		0,999	0,799
$L$	0,762	-0,996	-0,281	0,772	0,121	0,020	-0,390	0,999		0,799
$U_p$	0,942	-0,783	0,080	0,953	-0,059	0,143	-0,389	0,799	0,799	

Se remarcă valoarea mare a corelației dintre masa volumică a materiei prime și umiditatea acesteia, dintre masa volumică a materiei prime și umiditatea inițială a peletelor, dintre umiditatea inițială a materiei prime și umiditatea inițială a peletelor, dintre volumul și lungimea peletelor (deoarece sunt legate geometric), dintre volumul inițial al peletelor și lungimea sau umiditatea acestora. Corelații inverse de mare intensitate se înregistrează între



masa volumică a materiei prime și densitatea peletelor, volumul, lungimea și umiditatea peletelor și densitatea inițială a peletelor, densitatea și umiditatea peletelor la finalul procesului.

A fost realizată o reprezentare grafică comparativă a rezultatelor obținute în urma determinării parametrilor de ieșire a peletelor imediat după ieșirea din matrită, pentru cele două matrite utilizate (de 8 și de 10 mm) în funcție de parametrii de intrare și comandă.

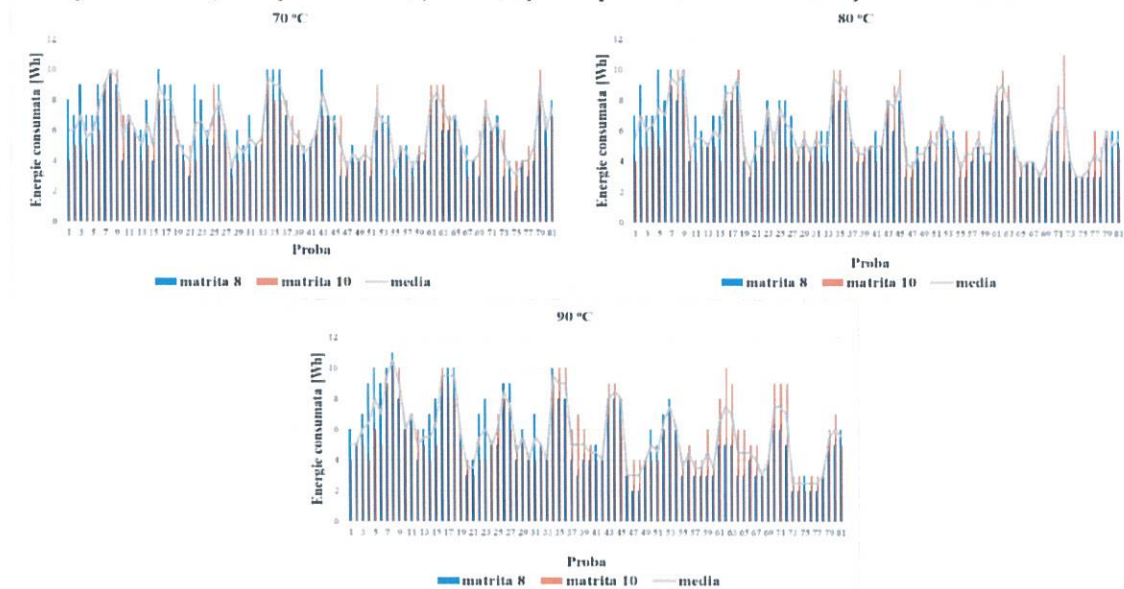


Fig. 5.11. Variația energiei consumate în funcție de temperatura matritei, pentru cele două matrite

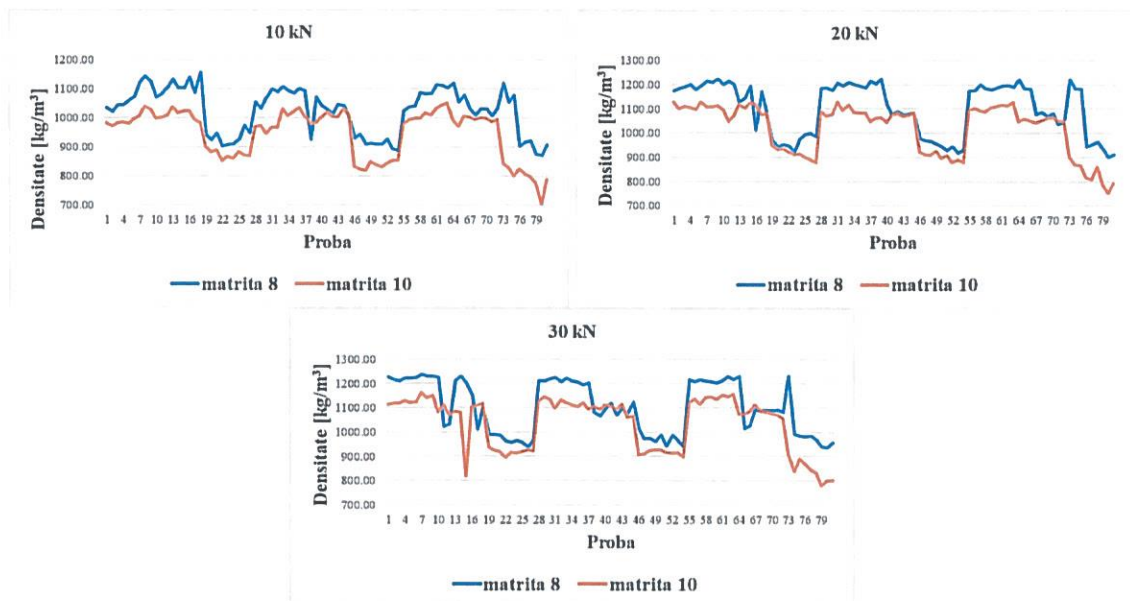


Fig. 5.12. Variația densității peletelor în funcție de forța de comprimare, pentru cele două matrite

În figura 5.13 sunt prezentate exemple de curbe forță de comprimare – deplasare pentru cele trei forțe (10, 20, 30 kN) utilizate în timpul realizării experimentelor.

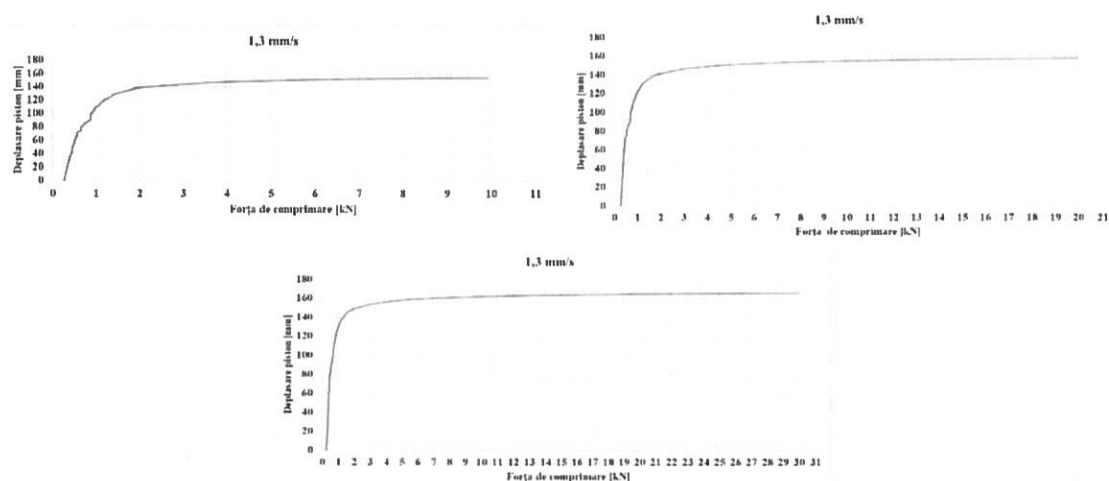


Fig. 5.13. Exemplu de curbă forță-deplasare

### 5.6.3. Analiza variațiilor parametrilor mășurați cu parametrii regimului de lucru

În tabelul 5.4. sunt prezentate trei seturi de date experimentale pentru densitatea peletelor în cazul menținerii constante a temperaturii (70 °C), umidității inițiale a materialului (10, 13 și 16%) și a vitezei de peletizare (2,8 mm/s) și varierea numai a forței de compactare, pentru ambele matrițe de peletizare utilizate.

**Tabelul 5.4.** Densitatea peletelor cu varierea forței de compactare și menținerea celorlalți parametri constanți, pentru temperatura de 70 °C

Proba	Temperatura [°C]	Umiditatea inițială [%]	Viteza de peletizare [mm/s]	Forța de comprimare [kN]	Densitatea peletelor [kg/m <sup>3</sup> ]	
					Matrița 8 mm	Matrița 10 mm
1	70	10	2,8	10	1022,61	980,61
2					1036,82	992,70
3					1041,09	997,88
4				20	942,47	1093,85
5					945,18	1101,33
6					977,32	1091,51
7				30	988,14	1119,46
8					992,61	1137,78
9					985,17	1116,20
10		13		10	1118,42	991,41
11					1055,83	971,58
12					1078,02	1005,42
13				20	1220,29	1047,77
14					1185,04	1059,02
15					1182,48	1051,73
16				30	1228,51	1075,39
17					1015,02	1074,26
18					1029,02	1084,54
19		16		10	921,22	844,46
20					935,71	827,11
21					937,45	801,75
22				20	942,47	901,97
23					945,18	869,67
24					977,32	865,73
25				30	988,14	908,67
26					992,61	840,29
27					985,17	888,61



În figurile 5.14.-5.16. sunt prezentate grafic rezultatele obținute pentru densitate cu varierea forței de compactare și menținerea constantă a celorlalți parametri, comparativ pentru cele două matrițe de peletizare utilizate.

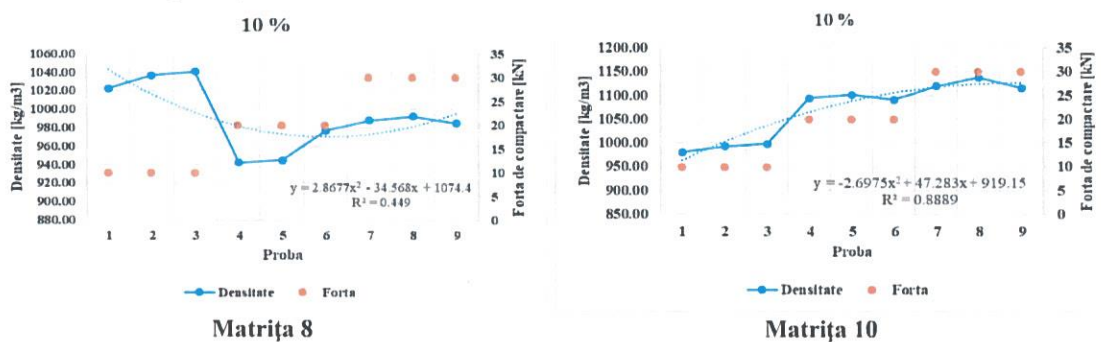


Fig. 5.14. Densitatea peletelor la  $\theta=70$  oC,  $v = 2,8$  mm/s și  $o_{Ui} = 10$  %

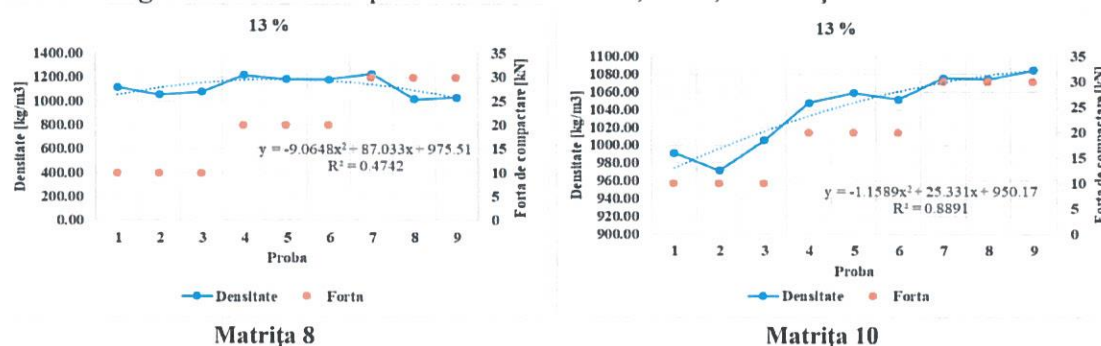


Fig. 5.15. Densitatea peletelor la  $\theta=70$  oC,  $v = 2,8$  mm/s și  $o_{Ui} = 13$  %

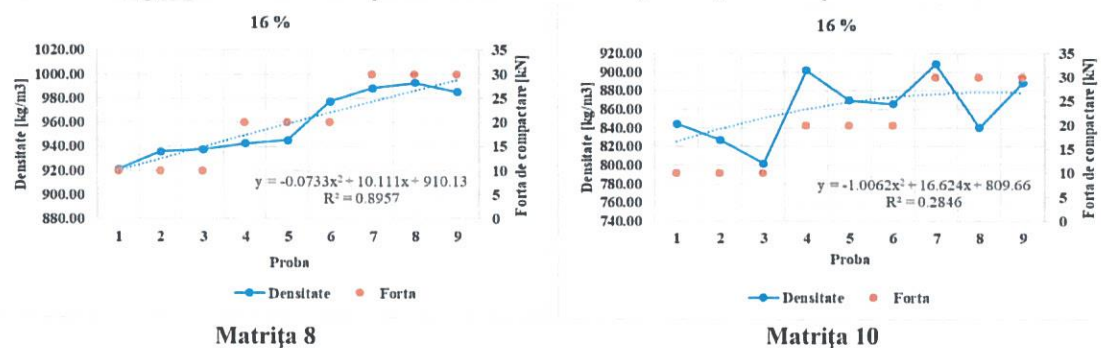


Fig. 5.16. Densitatea peletelor la  $\theta=70$  oC,  $v = 2,8$  mm/s și  $o_{Ui} = 16$  %

Din figurile 5.14-5.16, în cazul matriței de 10 mm, se poate observa o corelare puternică a densității obținute cu forța de compactare în cazul umidității inițiale a materialului de 10 %, o corelare bună pentru umiditatea inițială de 13 % și o corelare scăzută în cazul umidității de 16 %. Pentru matrița de 8 mm, rezultatele arată cea mai bună corelare în cazul umidității de 16 %, și corelări scăzute pentru celelalte două umidități.

### 5.7. Evaluarea evoluției în timp a lungimii peletelor

Pentru fiecare probă a fost măsurată atât lungimea, cât și diametrul, dar având în vedere că în cazul diametrului nu s-au înregistrat variații, a fost luată în considerare numai lungimea. Monitorizarea s-a desfășurat pe o perioadă de 90 de zile, realizându-se o măsurare la fiecare 7 zile, rezultând un total de 14 măsurări pentru fiecare probă.



Fig. 5.17. Detaliu din timpul măsurătorilor lungimii peletelor

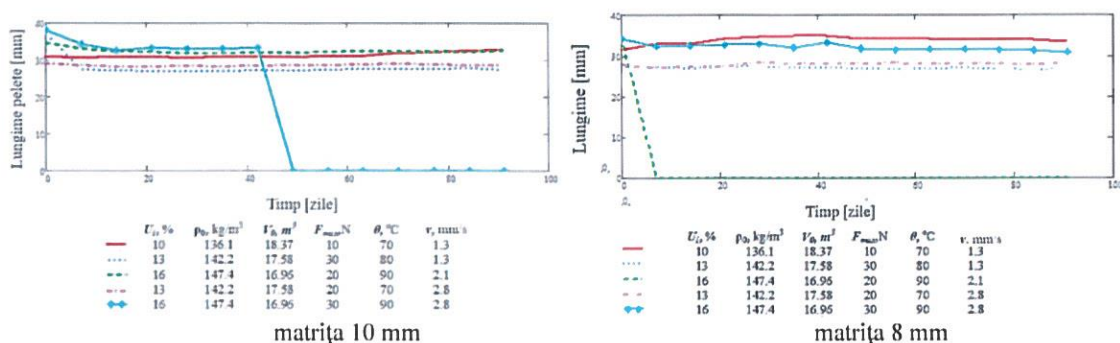


Fig. 5.18. Exemple de variații în timp a lungimii unor pelete obținute cu ce 2 matrițe

Curbele rămân mărginite în intervalul 25 - 40 mm. Este prezentată câte o singură excepție de la acest comportament pentru fiecare matriță, curbe care conform graficului ating lungimea zero, în sensul că peletele se dezintegrează în perioada de urmărire. Prin urmare, o parte dintre pelete își pierd consistența și devin inutilizabile.

În figura 5.19. sunt prezentate exemple de pelete care s-au rupt pe perioada de urmărire comparativ cu aspectul acestora în ziua obținerii.



Fig. 5.19. Exemple de pelete care s-au dezintegrat (rupt) în timpul urmăririi evoluției  
sus – peletele în ziua obținerii ; jos – peletele dezintegrate

Tabelul 5.5. Repartiția peletelor degradate în 90 de zile după formare pentru matrița de 10 mm

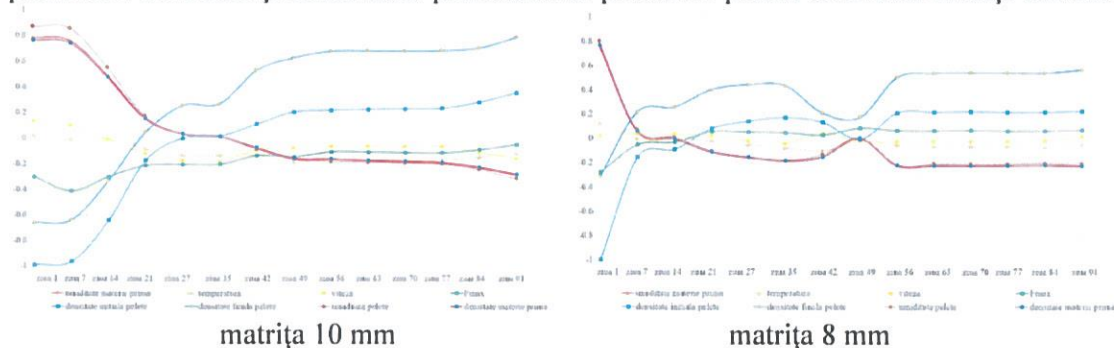
Umiditate inițială, %	10	13	16
Număr pelete cu eșec	1	0	24
<b>Masă volumică materie primă, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>136,10</b>	<b>142,20</b>	<b>147,40</b>
Număr pelete cu eșec	1	0	24
<b>Volum inițial materie primă, cm<sup>3</sup></b>	<b>16,90</b>	<b>17,58</b>	<b>18,37</b>
Număr pelete cu eșec	24	0	1
<b>Forța maximă de comprimare, kN</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
Număr pelete cu eșec	10	8	7
<b>Temperatura, °C</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>
Număr pelete cu eșec	5	9	11
<b>Viteza de peletizare, mm/s</b>	<b>1,3</b>	<b>2,1</b>	<b>2,8</b>
Număr pelete cu eșec	6	3	16



**Tabelul 5.6.** Repartiția peletelor degradate în 90 de zile după formare pentru matrița de 8 mm

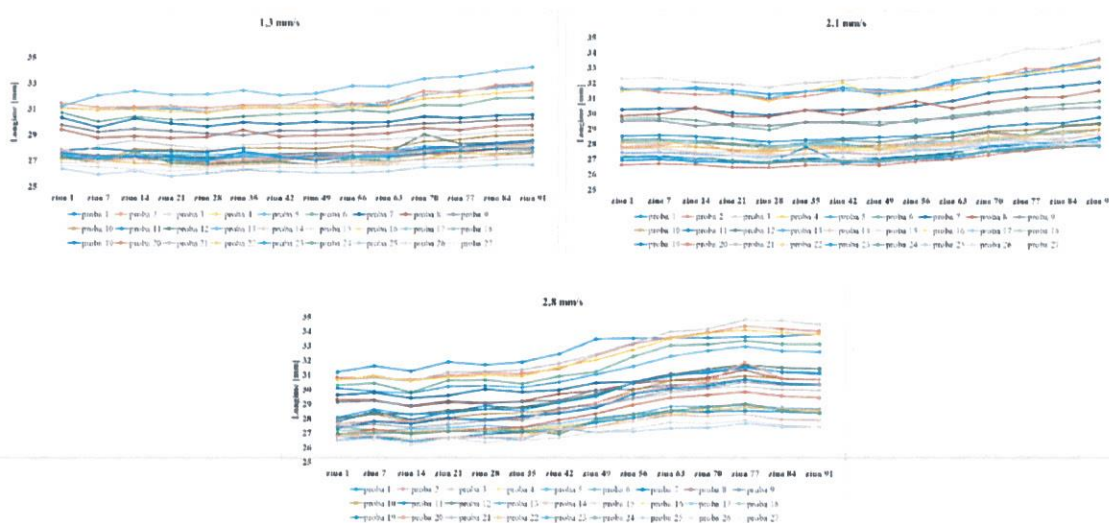
Umiditate inițială, %	10	13	16
Număr pelete cu eșec	0	5	20
Masă volumică materie primă, kg/m <sup>3</sup>	136,1	142,2	147,4
Număr pelete cu eșec	0	5	20
Volum inițial materie primă, cm <sup>3</sup>	16,9	17,58	18,37
Număr pelete cu eșec	25	0	1
Forța maximă de comprimare, kN	10	20	30
Număr pelete cu eșec	15	5	5
Temperatura, °C	70	80	90
Număr pelete cu eșec	7	9	9
Viteza de peletizare, mm/s	1,3	2,1	2,8
Număr pelete cu eșec	7	11	7

În figura 5.20. este prezentată corelația în timp a evoluției lungimii peletelor cu parametrilor de intrare și comandă ai procesului de peletizare pentru cele două matrițe utilizate.



**Fig. 5.20.** Corelația în timp cu parametri de intrare și comandă ai procesului de peletizare

În figura 5.21. este prezentată comparativ variația evoluției lungimii peletelor obținute cu o umiditate inițială de 10% pentru cele trei viteze de peletizare utilizate, pentru probele realizate cu matrița de 10 mm.



**Fig. 5.21.** Evoluția lungimii peletelor obținute cu o umiditate de 10 %, la cele trei viteze de peletizare utilizate, pentru matrița de 10 mm

În figura 5.22. este prezentată comparativ variația evoluției lungimii peletelor obținute cu o umiditate inițială de 10% pentru cele trei viteze de peletizare utilizate, pentru probele realizate cu matrița de 8 mm.

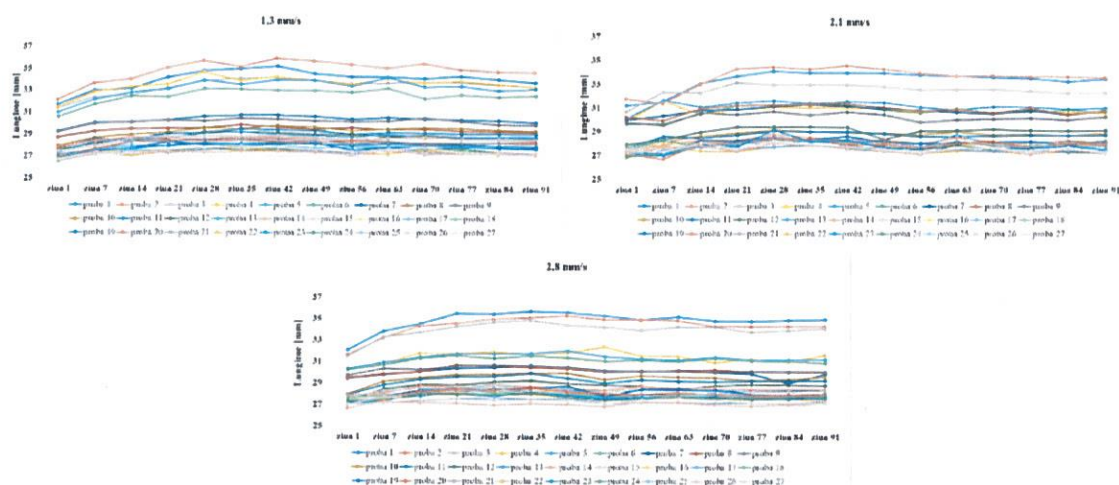


Fig. 5.22. Evoluția lungimii peletelor obținute cu o umiditate de 10 %, la cele trei viteze de pelletizare utilizate, pentru matrița de 8 mm

### 5.8. Validarea unor modele matematice clasice de compactare a materialelor pulverulente cu datele experimentale obținute

#### A) Modelul Jones

Prima relație investigată este formula lui Jones, care după calcularea parametrilor de model, devine:

$$\rho_p(\rho_0, P) = \rho_0 e^{1.321 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0.081}} \quad (5.1)$$

O comparație grafică între datele experimentale și datele calculate este prezentată în figura 5.23.

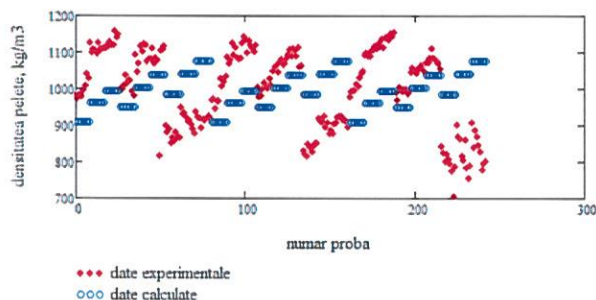


Fig. 5.23. Reprezentare grafică comparativă a datelor experimentale și a datelor calculate cu ajutorul modelului Jones

#### B) Modelul Heckel

După calcularea parametrilor de model, modelul Heckel are forma:

$$\rho_p(\rho_0, P) = \frac{\rho_0}{1 - e^{-0.00000552 \frac{P}{P_0} - 0.17}} \quad (5.2)$$

O comparație grafică între datele experimentale și datele calculate pentru modelul Heckel este prezentată în figura 5.24.



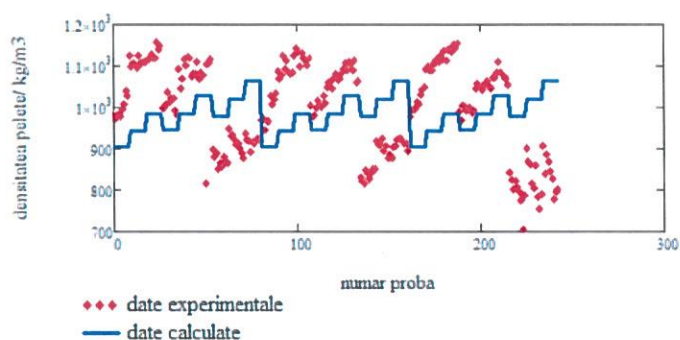


Fig. 5.24. Representare grafică comparativă a datelor experimentale și a datelor calculate cu ajutorul modelului Heckel

### 5.9. Concluzii

În urma analizei rezultatelor experimentale, s-a constatat că:

- în medie, energia consumată pentru producerea unei pelete a fost mai mare pentru matrița de 10 mm decât pentru cea de 8 mm;
- în aceleași condiții de obținere, peletele de 8 mm au avut o umiditate mai mare decât cele de 10 mm;
- peletele obținute cu material de umiditate 16 % au avut cea mai mare lungime pentru ambele matrițe, cu mai mult de 5 mm față de cele obținute cu material de umiditate 10%;
- peletele obținute cu matrița de 8 mm au avut per total o densitate mai mare decât cele obținute cu matrița de 10 mm, media densității peletelor de 8 mm fiind de 1075,22 kg/m<sup>3</sup>, iar cea a peletelor de 10 mm fiind de 999,66 kg/m<sup>3</sup>;
- cea mai mare influență asupra densității medii a peletelor a avut-o umiditatea materialului, în medie densitatea crescând de la 964,30 kg/m<sup>3</sup> (8 mm) și 870,10 kg/m<sup>3</sup> (10 mm) la umiditatea de 16% la 1099,54 kg/m<sup>3</sup> (8 mm) și 1051,16 kg/m<sup>3</sup> (10 mm) la umiditatea de 13%, ajungând la 1161,83 kg/m<sup>3</sup> (8 mm) și 1077,73 kg/m<sup>3</sup> (10 mm).

Urmărirea evoluției caracteristicilor fizice ale peletelor în timp este un test obligatoriu pentru estimarea calității peletelor.

O concluzie importantă este aceea că umiditatea mare a materiei prime conduce la obținerea unei umidități mari a peletelor, ceea ce provoacă majoritatea dezagregărilor peletelor. În aceeași situație este masa volumică a materiei prime. Creșterea acesteia conduce la pelete cu densitate mai mare, dar care se pot dezintegra mai ușor.

## CAPITOLUL 6

### Cercetări privind optimizarea procesului de peletizare a biomasei pe baza rezultatelor experimentale

#### 6.1. Validarea modelelor cu datele experimentale obținute utilizând standul pentru o singură și optimizarea procesului

În urma realizării cercetărilor experimentale de peletizare a rumegușului de brad utilizând standul de peletizare pentru o singură peletă și a analizei și interpretării acestora, s-a putut realiza testarea preciziei modelelor propuse în capitolul 4.

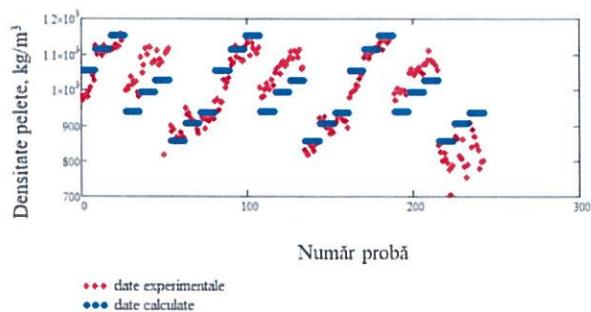
##### Modelul 1

Prin înlocuirea valorilor parametrilor de model în modelul 1, s-a obținut:

$$\rho_p(\rho_0, P, U_i) = 1,698\rho_0 \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^{0,081} U_i^{-0,61} \quad (6.1)$$

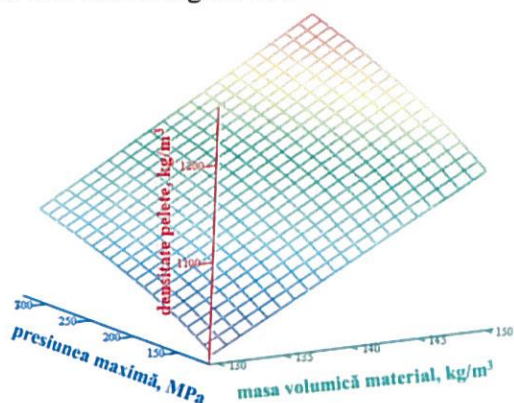
Figura 6.1 prezintă o comparație grafică între datele experimentale și datele calculate.





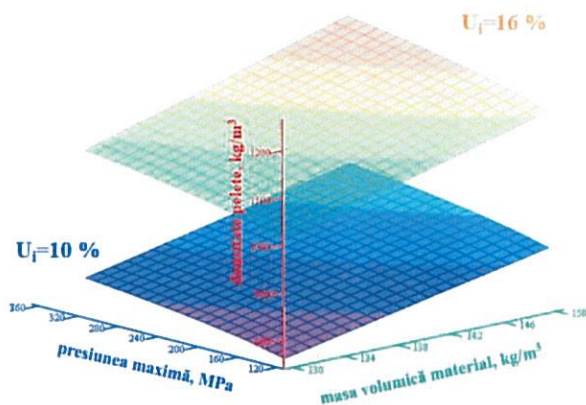
**Fig. 6.1.** Reprezentare grafică comparativă a datelor experimentale și a datelor calculate cu ajutorul ajutorul **modelului 1**

Reprezentarea grafică a dependenței densității peletelor de umiditatea rumegușului și presiunea maximă aplicată este dată în figura 6.2.



**Fig. 6.2.** Dependența densității peletelor de umiditatea materialului pentru valori fixe ale masei volumice a materiei prime și ale presiunii maxime

În figura 6.3 este reprezentată sub formă de suprafață și de izoclină, dependența densității peletelor de două variabile (conform formulei (6.1)), masa volumică a materialului și presiunea maximă realizată în instalația de comprimare, pentru intervalul de umiditate utilizat.



**Fig. 6.3.** Dependența densității peletelor de masa volumică a rumegușului și de presiunea maximă aplicată, pentru limitele intervalului de umiditate considerat pentru experimente

### Modelul 2

Prin înlocuirea valorilor parametrilor modelului în modelul 2, am obținut:

$$\rho_p(\rho_0, p, U_i) = \rho_0 \left( \frac{Q}{\rho_0 v^2 V_0} \right)^{0,097} \left( \frac{p_i}{p_0} \right)^{0,133} U_i^{-0,514} \quad (6.2)$$

Figura 6.4. prezintă o comparație grafică între datele experimentale și datele calculate utilizând modelul 2.

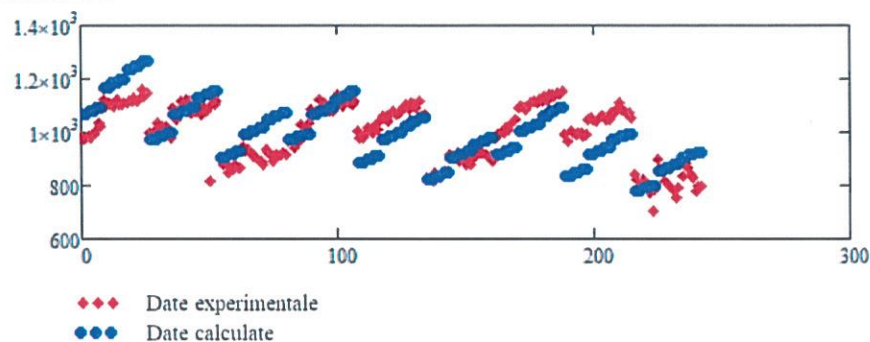


Fig. 6.4. Reprezentare grafică comparativă a datelor experimentale și a datelor calculate cu ajutorul **modelului 2**

Reprezentarea grafică a dependenței densității peletelor de umiditatea rumegușului și de presiunea maximă aplicată este dată în figura 6.5.

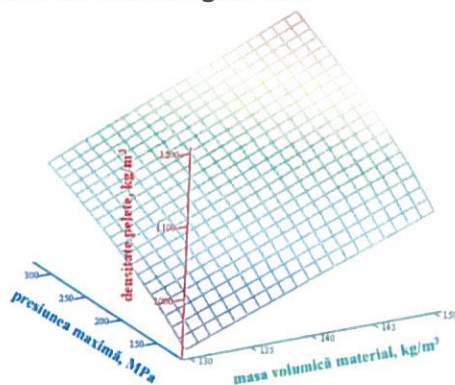


Fig. 6.5. Dependența densității peletelor de presiunea maximă și de masa volumică a rumegușului

## 6.2. Validarea modelelor matematice utilizând o mașină de peletizat cu matriță inelară

În vederea validării modelelor matematice propuse, s-au realizat probe experimentale de peletizare a rumegușului de brad utilizând o presă de peletizare cu matriță cilindrică și două role de presare (fig. 6.6), în care s-a introdus biomasa pe la partea superioară, procesul efectiv de peletizare realizându-se la punctul de contact dintre rolele de presare și matriță.

*Presa de peletizare* cu matriță inelară fixă și role de presare antrenate de un ax rotor este un echipament destinat pentru obținerea de pelete ce pot fi utilizate în centrale destinate producerii de căldură și de apă caldă menajeră, pentru fermele de dimensiuni mici și mijlocii, precum și pentru gospodării, urmărindu-se asigurarea unei independențe energetice.

Masa de material din tocătura de biomasă solidă este introdusă în buncărul transportorului de alimentare al presei, de aici este transportată prin separatorul magnetic și conducta de alimentare în cicloul presei de peletizare de către rafinator. Evacuarea din cicloul în vederea alimentării presei de peletizat se face prin intermediul unui șibăr și a unei valve rotative.





**Fig. 6.6.** Echipament de peletizare cu matriță inelară utilizat pentru realizarea experimentărilor

1. mini buncăr alimentare material; 2. motor cuțit tăiere pelete; carcasă matriță peletizare;  
4. motor buncăr alimentare; 5. panou comandă; 6. motor principal presă

Au fost realizate 6 de probe (câte 2 probe pentru cele trei umidități ale rumegușului de brad: 10 %, 13% și 16%) obținute din rumeguș de brad cu dimensiuni mai mici mai mici de 2 mm. Rumegușul a avut aceleași caracteristici ca cel utilizat pentru realizarea cercetărilor experimentale pe standul pentru o singură peletă.

Utilizând mașina de peletizat, peletele din rumeguș de brad au fost obținute după metodologia următoare:

1. A fost determinată umiditatea inițială a materiei prime cu ajutorul termobalanței.
2. A fost măsurată masa necesară (10 kg pentru fiecare probă) pentru introducerea în presa de peletizare cu ajutorul unei balanțe.
3. Au fost demontate carcasa și cuțitul de tăiere pelete pentru a permite montarea dozei de măsurare a forței pe matrița inelară și a fost montată o pâlnie de alimentare cu material;
4. A fost montată doza tensometrică pe matrița cilindrică;
5. Doza a fost conectată la un sistem de achiziție date (MGCPlus – HBM, Germania), care la rândul lui a fost conectat la un computer pentru a înregistra datele;
6. A fost realizat procesul de peletizare propriu-zis cu ajutorul presei de peletizare;
7. A fost măsurată dimensiunea a 40 pelete din fiecare mostră de pelete.
8. Au fost cântărite cele 40 pelete din fiecare mostră pentru determinare ulterioară a densității.



**Fig. 6.7.** Pelete obținute cu mașina de peletizat cu matriță inelară

În urma realizării cercetărilor experimentale pe mașina de peletizat cu matriță inelară fixă și a realizării măsurătorilor și calculelor de densitate, au fost obținute următoarele rezultate, prezentate în tabelele 6.1 - 6.3.

**Tabelul 6.1.** Rezultatele obținute în urma realizării cercetărilor experimentale pe mașina de peletizat cu matriță inelară pentru umiditatea de 10%, temperatura de 90 °C, masa volumică a materialului de 136,08 kg/m<sup>3</sup> și presiunea de peletizare de 107 Mpa

Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>
1	1074,38	11	1145,12	21	1178,37	31	1152,13
2	1123,98	12	1121,47	22	1147,93	32	1198,78
3	1184,52	13	1152,32	23	1109,74	33	1138,29
4	1147,48	14	1147,81	24	1142,11	34	1183,09
5	1082,13	15	1141,16	25	1098,00	35	1149,33
6	1063,95	16	1083,19	26	1148,54	36	1161,95
7	1104,84	17	1142,30	27	1139,52	37	1150,21
8	1081,56	18	1108,22	28	1110,12	38	1123,18
9	1112,74	19	1074,85	29	1097,44	39	1141,04
10	1142,89	20	1156,08	30	1189,91	40	1139,90

**Tabelul 6.2.** Rezultatele obținute în urma realizării cercetărilor experimentale pe mașina de peletizat cu matriță inelară pentru umiditatea de 13%, temperatura de 90 °C, masa volumică a materialului de 142,18 kg/m<sup>3</sup> și presiunea de peletizare de 107 Mpa

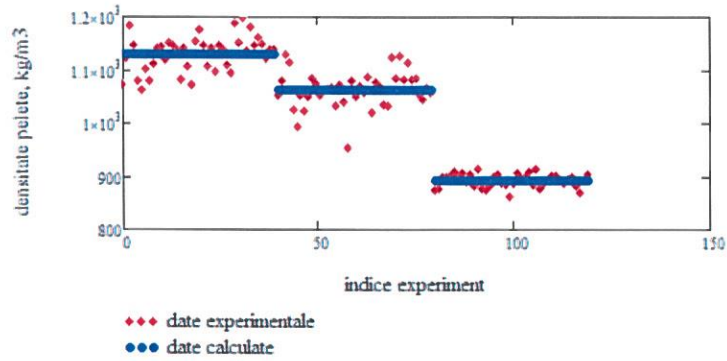
Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>
1	1054,36	11	1076,42	21	1050,85	31	1087,29
2	1081,22	12	1055,38	22	1071,35	32	1127,86
3	1131,65	13	1061,23	23	1058,52	33	1084,18
4	1115,34	14	1065,50	24	1088,11	34	1116,16
5	1026,61	15	1068,50	25	1022,91	35	1084,29
6	995,69	16	1035,08	26	1079,73	36	1086,56
7	1054,88	17	1073,84	27	1072,83	37	1057,42
8	1025,51	18	1042,62	28	1037,97	38	1046,16
9	1050,76	19	954,70	29	1035,55	39	1069,40
10	1085,66	20	1080,52	30	1127,15	40	1060,46

**Tabelul 6.3.** Rezultatele obținute în urma realizării cercetărilor experimentale pe mașina de peletizat cu matriță inelară pentru umiditatea de 16%, temperatura de 90 °C, masa volumică a materialului de 147,37 kg/m<sup>3</sup> și presiunea de peletizare de 105 Mpa

Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Proba	$\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>
1	877,31	11	883,94	21	888,93	31	904,33
2	878,85	12	914,85	22	907,83	32	903,63
3	901,85	13	878,48	23	898,29	33	893,84
4	901,20	14	875,92	24	900,47	34	889,25
5	902,85	15	884,28	25	910,78	35	897,43
6	910,72	16	901,87	26	886,71	36	901,72
7	904,28	17	907,20	27	917,24	37	884,62
8	909,75	18	889,84	28	879,39	38	871,59
9	891,28	19	885,40	29	888,86	39	893,74
10	907,28	20	864,96	30	894,62	40	905,70

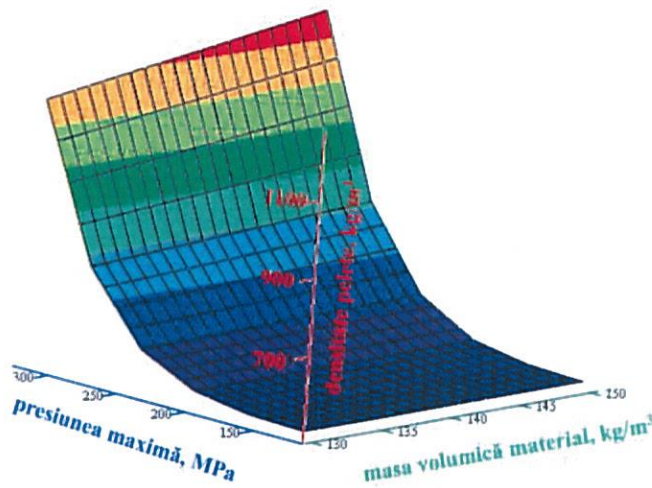
Figura 6.8 prezintă o comparație grafică între datele experimentale și datele calculate utilizând relația 6.1.





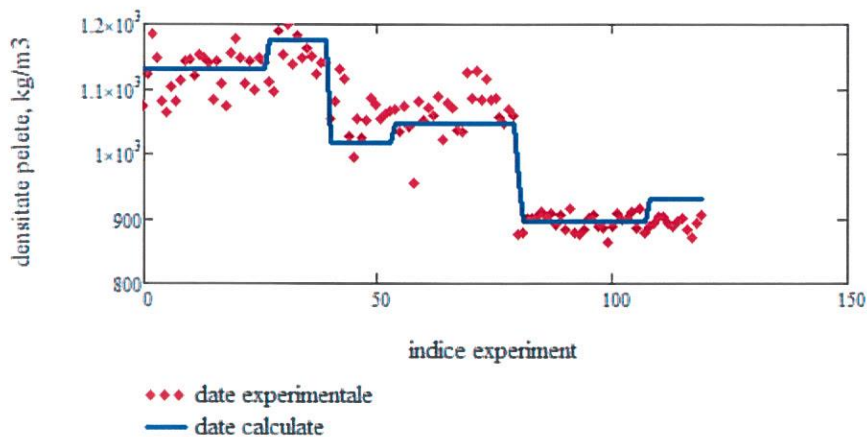
**Fig. 6.8.** Reprezentare grafică comparativă a datelor experimentale obținute cu mașina de peletizare și a datelor calculate cu ajutorul relației (6.7)

În figura 6.9 este prezentată dependența densității peletelor de parametrii de intrare și comandă, pentru relația 6.1.



**Fig. 6.9.** Dependența densității peletelor de presiunea maximă și de masa volumică a rumegușului pentru probele realizate pe mașina de peletizat cu matriță inelară

Figura 6.10 prezintă o comparație grafică între datele experimentale și datele calculate utilizând relația 6.2.



**Fig. 6.10.** Reprezentare grafică comparativă a datelor experimentale obținute cu mașina de peletizare și a datelor calculate cu ajutorul relației (6.12)

În figura 6.11. este prezentată dependența densității peletelor de presiune și masa volumică a materiei prime, pentru relația 6.2.

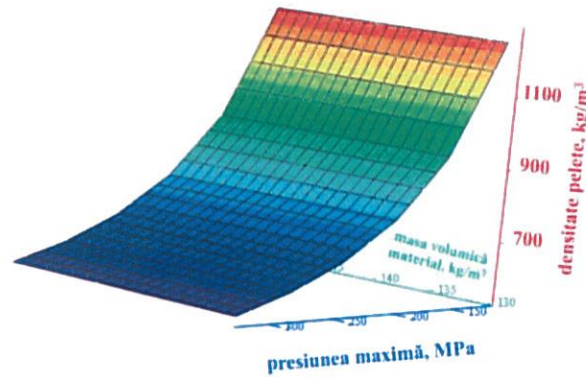


Fig. 6.11. Dependența densității peletelor de presiunea maximă și de masa volumică a rumegușului pentru probele realizate pe mașina de peletizat cu matriță inelară

### 6.3. Modelarea statistică a proceselor de peletizare a biomasei

Formularea problemei în termenii teoriei sistemelor, impune o sortare a parametrilor care descriu matematic sistemul, de tipul celei din tabelul 6.4.

Tabelul 6.4. Parametrii procesului de peletizare și ai peletelor obținute în organizarea de tip sistem

Tip parametri	Denumire parametru	Notație	Unitate măsură	Dimensiune fizică
Intrare	Granulația materiei prime	$g$	m	L
	Masa volumică materiei prime	$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
	Umiditate rumeguș	$U_i$	%	-
	Volumul inițial al materiei prime	$V_0$	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
Comandă	Diametru matriță	$\varnothing_m$	m	L
	Forță maximă aplicată	$F_{max}$	kN	MLT <sup>-2</sup>
	Viteza de deplasare a pistonului	$v$	m/s	LT <sup>-1</sup>
	Temperatura matriței	$\theta$	°C	
	Forța de extragere a peletei	$F_e$	kN	MLT <sup>-2</sup>
Ieșire	Energia consumată	$E_c$	Wh	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
	Lungime pelete	$L$	m	L
	Densitate pelete	$\rho_p$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
	Umiditate pelete	$U_p$	%	-
	Volum pelete	$V_p$	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>

O selecție a parametrilor de intrare și comandă pe baza influenței acestora asupra parametrilor de ieșire, poate reduce numărul de argumente a fiecărei funcții parametru de ieșire. Măsura influenței poate fi luată, în primă aproximație, valoarea corelației dintre seriile numerice realizate de aceștia în cadrul experiențelor.

Estimările corelațiilor parametrilor de ieșire în raport cu parametrii de intrare și comanda considerați în acest proces, sunt date în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5. Matricea corelațiilor intrare/ieșire

	$\rho_0$	$U_i$	$V_0$	$F_{max}+F_e$	$v$	$\theta$
$E_c$	-0,236000	-0,242000	0,232000	0,644000	-0,112000	-0,027000
$L$	0,763000	0,780000	-0,753000	-0,305000	0,134000	0,023000
$\rho_p$	-0,779655	-0,796201	0,770537	0,333332	-0,111758	-0,007409
$U_p$	0,937586	0,948841	-0,931050	-0,098442	0,085247	-0,089060
$V_p$	0,768073	0,785466	-0,758530	-0,301463	0,134581	0,027897

Ținând seama de valorile corelațiilor din tabelul 6.4, s-au considerat pentru parametrii de ieșire următoarele dependențe:

$$E_c = E_c(F_{max}, F_e) \quad (6.3)$$

$$L = L(U_i, \rho_0, V_0, F_{max}) \quad (6.4)$$

$$\rho_p = \rho_p(U_i, \rho_0, V_0, F_{max}) \quad (6.5)$$

$$U_p = U_p(U_i, \rho_0, V_0) \quad (6.6)$$

$$V_p = V_p(U_i, \rho_0, V_0, F_{max}) \quad (6.7)$$

Calculul de regresie s-a făcut pentru toate modelele exprimate sub forma unor polinoame de ordinul 1 sau 2, folosind pentru interpolare datele obținute în urma experimentărilor și programul Mathcad.

#### A) Regresia polinomială pentru densitatea peletelor

Considerând structura funcției densitate a peletelor de forma (6.5), s-a obținut expresia regresiei liniare:

$$\rho_p(U_i, \rho_0, V_0, p) = -18784,920 - 357,766 U_i + 171,590 \rho_0 - 9,504 V_0 + 3,41 \cdot 10^{-7} p \quad (6.8)$$

În sprijinul predicției realizate pledează și coeficientul de determinare  $R^2 = 0,862$ . Pentru creșterea preciziei de estimare, se poate calcula regresia liniară în raport cu toate cele șase variabile de intrare și comandă variată în cadrul programului de experimentare, tot sub forma unui polinom de gradul întâi. Se obține expresia:

$$\rho_p(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) = -18737,058 - 357,766 U_i + 171,590 \rho_0 - 9,504 V_0 + 3,41 \cdot 10^{-7} p - 19414,676 v - 0,097 \theta \quad (6.9)$$

Eroarea globală a regresiei (6.9) ajunge la valoarea  $\varepsilon_g = 0,00242$ , iar eroarea maximă crește la valoarea  $\varepsilon_{max} = 0,29087924$ , în raport cu regresia pe sistemul redus de variabile, (6.8). Coeficientul de determinare este mai bun la regresia (6.9) decât cel al regresiei (6.8),  $R^2 = 0,874$ .

Tot pentru densitatea peletelor la ieșirea din procesul de formare, se poate calcula polinomul de gradul al doilea în varianta setului de variabile redus. Expresia acestuia este:

$$\begin{aligned} \rho_p(U_i, \rho_0, V_0, p) = & -17391,251 + 245,906 U_i + 210,165 \rho_0 - 3,877 V_0 + \\ & + 0,000018P - 1,668 U_i \rho_0 + 0,041 U_i V_0 + 0,0000002025078 U_i P + 0,01008 \rho_0 V_0 - \\ & + 0,0000001335 \rho_0 P + 0,000000068 V_0 P - 3,573 U_i^2 - 0,550131 \rho_0^2 - 0,000107 V_0^2. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Termenul în puterea a doua a presiunii este negativ, dar înmulțit cu un factor neglijabil,  $10^{-15}$ . Regresia pătratică (6.10), realizează următoarele performanțe:  $\varepsilon_g = 0,002244$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,26145721$ ,  $R^2 = 0,892$ .

#### B) Regresia polinomială pentru energia consumată

Pentru energia consumată, regresia polinomială de gradul întâi redusă are doar două argumente, conform selecției de corelație (tabelul 6.5.) fiind dată de relația:

$$E_c(p) = 2,65 + 0,00000001251 p + 0,00000001123 p_e \quad (6.11)$$

cu legătură între forța maximă  $F_{max}$  și presiunea maximă dată de  $p = \frac{4F_{max}}{\pi \varnothing^2}$  și cu forța de extragere a peletei  $F_e$  și presiunea de extragere  $p_e$ . Precizia acestei relații este dată de valorile:  $\varepsilon_g = 0,017$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,6439$ ,  $R^2 = 0,414$ . Formula polinomului de regresie de gradul al doilea, este practic tot de gradul întâi, deoarece coeficientul termenului de gradul al doilea în presiunea de comprimare este sub limita neglijabilă de  $10^{-15}$ :

$$E_c(p) = 8,37037037 - 0,000000041403088 p \quad (6.12)$$

Performanțele acestei relații sunt măsurate de valorile:  $\varepsilon_g = 0,014$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,6854725$ ,  $R^2 = 0,575$ . Considerarea regresiei liniare dependentă de toate cele șase argumente variabile experimental nu îmbunătățește precizia:  $\varepsilon_g = 0,016$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,6101372$ ,  $R^2 = 0,503$ . Performanțe puțin mai bune se obțin considerând regresia polinomială de gradul al doilea, pentru întreg setul de variabile:  $\varepsilon_g = 0,011$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,56400485$ ,  $R^2 = 0,742$ .

### C) Regresia polinomială pentru lungimea peletelor

Regresia liniară pentru parametrul lungimea peletelor la ieșirea din procesul de comprimare, pentru setul redus de variabile, este dată de expresia:

$$L(U_i, \rho_0, V_0, p) = -3,664 - 0,000002978 U_i + 0,013 \rho_0 + 10226,285 V_0 - 10^{-11} p. \quad (6.13)$$

cu performanțele de precizie estimate de valorile:  $\varepsilon_g = 0,003028$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,30457$ ,  $R^2 = 0,831$ .

Regresia liniară de ordinul întâi pentru lungimea peletelor la ieșirea din procesul de formare, pentru întreg setul de variabile considerat, este dată de ecuația:

$$L(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) = 0,726 + 0,0134 U_i - 0,006042 \rho_0 + 0,000334 V_0 - 10^{-11} p + 0,778 v + 0,00001007 \theta. \quad (6.14)$$

Performanțele acestui model sunt descrise de următoarele caracteristici:  $\varepsilon_g = 0,00283$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,28575897$ ,  $R^2 = 0,852$ .

Regresia liniară de gradul al doilea în setul redus de variabile este caracterizat prin următoarele valori:  $\varepsilon_g = 0,00283$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,28575897$ ,  $R^2 = 0,852$ . Pentru regresia liniară de gradul al doilea în setul complet de variabile, se obțin estimările de precizie:  $\varepsilon_g = 0,002851$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,32654358$ ,  $R^2 = 0,85$ .

### D) Regresia polinomială pentru umiditatea peletelor

Regresia liniară a umidității peletelor are expresia:

$$U_p(U_i, \rho_0, V_0) = 231,414 + 4,416 U_i - 1,961 \rho_0 + 1,11 V_0. \quad (6.15)$$

și evaluarea de precizie:  $\varepsilon_g = 0,002549$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,16885892$ ,  $R^2 = 0,95$ . Precizia regresiei pătratice pentru umiditatea peletelor, în varianta setului redus de parametri, are o evaluare de precizie slabă și nu poate fi luată în considerare.

Regresia liniară pe setul complet de variabile are expresia:

$$U_p(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) = 232,954 + 4,416 U_i - 1,962 \rho_0 + 0,111 V_0 - 0,0000000017 P + 259,31 v - 0,02 \theta \quad (6.16)$$



Evaluarea preciziei formulei (6.16) este:  $\varepsilon_g=0,001804$ ,  $\varepsilon_{max}=0,12492327$ ,  $R^2=0,975$ .

Regresia pătratică de ordinul al doilea este caracterizată de o precizie încă și mai bună:  $\varepsilon_g=0,001588$ ,  $\varepsilon_{max}=0,11079441$ ,  $R^2=0,981$ .

### E) Regresia polinomială pentru volumul peletelor

Regresia liniară a volumului peletelor la ieșirea din procesul de formare, pentru setul redus de variabile, are expresia:

$$V(U_i, \rho_0, V_0, p) = -0,0002986 - 0,00000000023 U_i + 0,000001 \rho_0 + 8,333 V_0. \quad (6.17)$$

Performanțele de precizie ale relației (6.17) sunt date de  $\varepsilon_g=0,002957$ ,  $\varepsilon_{max}=0,3042955$ ,  $R^2=0,838$ . Pentru regresia de gradul al doilea, având setul redus de variabile, evaluarea preciziei este data de următoarele valori:  $\varepsilon_g=0,00277$ ,  $\varepsilon_{max}=0,28586421$ ,  $R^2=0,857$ .

Regresia liniară de gradul întâi cu setul complet de variabile, pentru volumul peletelor la ieșirea din proces are expresia:

$$V(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) = 0,000059 + 0,000001 U_i - 0,0000004917 \rho_0 + 0,00000002719 V_0 + 0,00006352 v + 0,00000000988 \theta. \quad (6.18)$$

Performanțele regresiei (6.18) sunt date de:  $\varepsilon_g=0,002774$ ,  $\varepsilon_{max}=0,32612782$ ,  $R^2=0,857$ . Regresia liniară de ordinul al doilea cu setul complet de variabile are performanței de precizie mai bune:  $\varepsilon_g=0,001957$ ,  $\varepsilon_{max}=0,28689592$ ,  $R^2=0,929$ .

În tabelul 6.6 sunt concentrate caracteristicile de precizie pentru toate relațiile de interpolare investigate, pentru fiecare parametru de ieșire ca funcție de parametri de intrare și comandă.

**Tabelul 6.6.** Estimatorii de precizie ai legilor de dependență ai parametrilor de ieșire (calitativi) de parametrii de intrare și comandă

Parametrul	Grad regresie	Varianta	$\varepsilon_g$	$\varepsilon_{max}$	$R^2$
$\rho_p$	1	Redusă	0,002538	0,27598956	0,862
		Completă	0,002420	0,29087924	0,874
	2	Redusă	0,002244	0,26145721	0,892
		Completă	0,001703	0,26425000	0,938
$E_c$	1	Redusă	0,017000	0,64390000	0,831
		Completă	0,016000	0,61013720	0,503
	2	Redusă	0,014000	0,68547250	0,575
		Completă	0,011000	0,56400485	0,742
$L$	1	Redusă	0,003028	0,30457000	0,831
		Completă	0,002830	0,28575897	0,852
	2	Redusă	0,002830	0,28575897	0,852
		Completă	0,002851	0,32654358	0,850
$U_p$	1	Redusă	0,002549	0,16885892	0,950
		Completă	0,001804	0,12492327	0,975
	2	Redusă	-	-	-
		Completă	0,001588	0,11079441	0,981
$V$	1	Redusă	0,002957	0,3042955	0,838
		Completă	0,002774	0,32612782	0,857
	2	Redusă	0,002770	0,28586421	0,857
		Completă	0,001957	0,28689592	0,929

În figura 6.12. se reprezintă grafic dependența densității peletelor de umiditatea materiei prime, în varianta regresiei liniare și pătratică, cu număr redus de argumente și cu setul complet

de argumente. Se observă un optim teoretic al umidității de intrare a materialului de peletizat, aflat în jurul valorii de 11%.

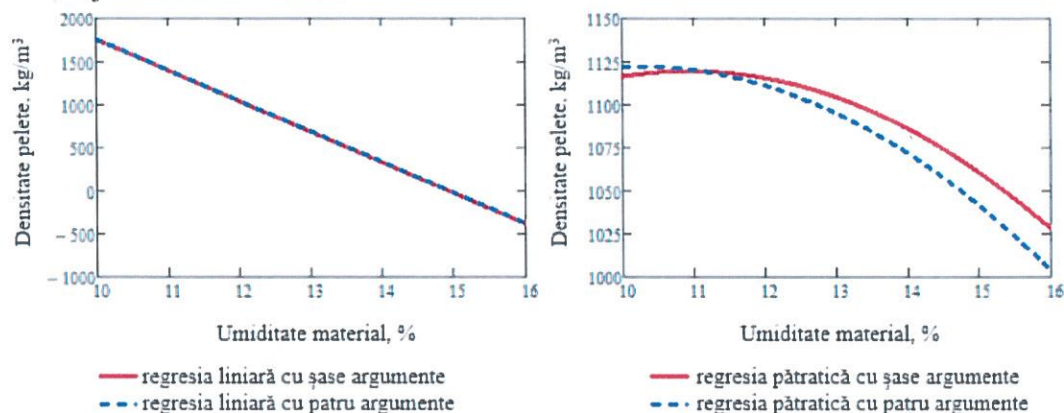


Fig. 6.12. Dependenta densității peletelor de umiditatea materiei prime, în diferite variante de regresie, pentru valorile constante:  $\rho_0=140\text{kg/m}^3$ ,  $V_0=0,00001837\text{ m}^3$ ,  $p = 300\text{ MPa}$ ,  $v = 0,002\text{m/s}$ ,  $\theta=80^\circ\text{C}$

Energia consumată în procesul de peletizare depinde cel mai intens de presiunea de comprimare și de presiunea necesară extragerii peletei din matriță. Totuși și umiditatea influențează semnificativ energia consumată. În figura 6.13. s-a reprezentat variația energiei consumate cu presiunea de lucru (implicit cu forța de comprimare și forța de extragere), pentru patru valori ale umidității materiei prime. **Se observă astfel un punct optim de funcționare din punct de vedere al procesului de lucru, corespunzător valorii de 270 MPa pentru care consumul de energie este constant indiferent de umiditatea materiei prime.**

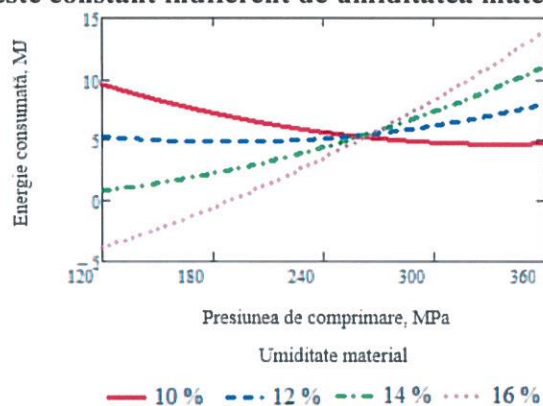


Fig. 6.13. Dependenta energiei consumate de presiunea maximă aplicată, pentru diverse valori ale umidității, celelalte variabile fiind păstrate constante:  $V_0=0,00001837\text{ m}^3$ ,  $p = 300\text{ MPa}$ ,  $v = 0,002\text{ m/s}$ ,  $\theta = 80\text{ }^\circ\text{C}$

De asemenea, consumul energetic  $E_c$ , poate fi optimizat folosind una dintre variantele de regresie neliniară de obținere a modelului multiparametru de variație a acestuia.

Se formează funcția consum energetic pe unitatea de masă de peletă ( $E_{cmp}$ ), prin combinația a trei funcții calitative din setul de cinci pe care le avem la dispoziție, astfel încât modelul obținut să fie corect din punct de vedere dimensional:

$$E_{cmp}(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) = \frac{E_c(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta)}{\rho_p(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta) V(U_i, \rho_0, V_0, p, v, \theta)}, \text{ (J/kg)} \quad (6.19)$$

În figura 6.14. se prezintă variația energiei consumate în funcție de presiunea de comprimare pentru 5 umidități ale materialului, obținându-se un punct de optim situat în jurul valorii presiunii de 250 MPa, pentru care energia consumată este constantă indiferent de umiditate.

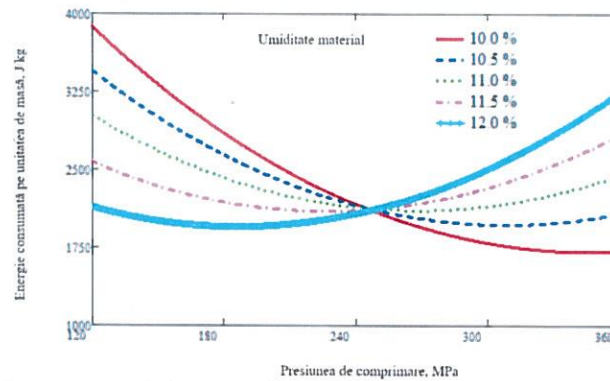


Fig. 6.14. Variația consumului energetic specific unității de masă a peletelor  $E_{cmp}$ , cu presiunea de comprimare pentru cinci valori ale umidității materialului

#### 6.4. Concluzii

Cele două legi de dependență testate și calibrate pe datele experimentale (modelul 1 și modelul 2 prezentate în capitolul 4) sunt liniare în funcție de densitatea materiei prime. Prin urmare densitatea peletelor depinde linear de densitatea și volumul materiei prime introdusă în procesul de peletizare. Dependența densității peletelor este neliniară în raport cu presiunea relativă și prin urmare și cu forța maximă de presare a materialului în matriță. Dependența densității peletelor este de asemenea neliniară și în raport cu umiditatea materiei prime la introducerea în process, precum și în raport cu temperatura matriței.

Studiul statistic de interpolare arată că precizii bune sunt posibile folosind seturi reduse de variabile, dar și seturile complete. Parcurgerea studiului de regresie polinomială reliefează faptul că parametrii de calitate (ieșire) variază monoton în raport cu parametrii de intrare și de comandă, în limitele domeniului de lucru acoperit experimental. Performanțele de precizie pot orienta cercetătorii și utilizatorii rezultatelor spre alegerea unei variante convenabile de interpolare în sensul îmbunătățirii regimurilor de lucru.

După realizarea cercetărilor experimentale pe stand și validarea celor două modele matematice propuse în cadrul capitolului 4, datele obținute au arătat o corelare puternică între datele experimentale și cele estimate teoretic,  $R = 0,837$  pentru modelul 1 și  $R = 0,711$  pentru modelul 2.

Pentru datele obținute pe mașina de peletizat cu matrița inelară, a existat o corelare și mai puternică între datele experimentale și cele estimate teoretic,  $R = 0,911$  pentru modelul 1 și  $R = 0,847$  pentru modelul 2.

## CAPITOLUL 7

### CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. PERSPECTIVE

#### 7.1. Concluzii asupra cercetărilor teoretice și experimentale

Ca urmare a cercetărilor teoretice și experimentale realizate în cadrul prezentei teze de doctorat „Cercetări privind optimizarea procesului de densificare a biomasei”, se pot desprinde următoarele concluzii generale:

1. Densificarea biomasei depinde de interacțiunea complexă între proprietățile materialului și parametrii caracteristici echipamentelor utilizate pentru densificare.
2. Mașinile de peletizare a biomasei realizează compactarea prin forțarea trecerii materialului prin orificiile unei matrițe speciale.
3. Pentru ca *materialul* să treacă prin orificiile matriței și să formeze pelete, acesta trebuie să aibă următoarele proprietăți:



- capacitate de curgere și coeziune adecvate;
  - mărirea particulei (dacă materialul este prea fin, rezultă o curgere ridicată, dar o coeziune scăzută; dacă materialul este prea grosier, are o coeziune bună, dar o curgere scăzută, putându-se ajunge chiar la blocarea echipamentelor);
  - forțe superficiale de adeziune (importante pentru aglomerarea materialului și pentru rezistența în timp a peletelor);
  - adezivitate (dată de compoziția chimică a biomasei, foarte important fiind conținutul de lignină al materiei prime);
  - duritate (existența unor particule prea dure în masa de material crează dificultăți de aglomerare);
  - distribuirea particulelor (este necesară o cantitate suficientă de particule fine pentru a lega împreună particulele mai mari);
  - umiditatea corespunzătoare în funcție de natura materialului (valori mai mici pentru biomasa lemnoasă și mai mari pentru biomasa agricolă);
  - rezistență mecanică la compresiune.
4. Pentru a se asigura o bună desfășurare a procesului și o calitate adecvată a peletelor obținute, există o serie de *parametri de comandă și control* care trebuie luați în seamă:
- forța de comprimare (trebuie asigurată o forță de comprimare suficient de mare pentru a forța materialul să treacă prin orificiile matriței);
  - temperatura de lucru în timpul procesului (este necesar a se dezvolta o temperatură suficient de mare încât să se gelatinizeze amidonul și să se activeze lignina, care conduc la legarea peletelor, dar nu foarte mare astfel încât să nu se producă fenomenul de aprindere în timpul comprimării);
  - viteza de peletizare sau timpul de retenție (o viteză prea mare face ca materialul nu să aibă suficient timp să formeze legături și astfel se obțin produse de calitate inferioară, ce se distrug în timp scurt după obținere);
  - uzura elementelor echipamentelor utilizate (o uzură mare a elementelor duce la îngreunarea procesului, la calitate redusă și chiar la eșecul procesului).
5. Modelele matematice elaborate pentru procesul de compactare ajută la prezentarea comportamentului particulelor în timpul procesului de compactare și pot contribui la optimizarea parametrilor pentru a obține produse de bună calitate. Mai multe tipuri de ecuații care exprimă relația între parametrii de compactare a materiilor prime sunt disponibile în literatura de specialitate.
6. Ținând cont de parametrii care influențează procesul de peletizare, a fost propus un model matematic ce exprimă densitatea finală a peletelor ca fiind determinată de către presiunea finală aplicată în timpul procesului, umiditatea inițială a materialului și densitatea inițială a materialului, dar și un model matematic obținut prin analiză dimensională, utilizând teorema  $\Pi$ , care exprimă densitatea peletelor ca fiind determinată de presiune, căldură, densitatea inițială a materialului, viteza de peletizare și volumul inițial al materialului.
7. Cercetările experimentale realizate pe un stand pentru o singură peletă sunt utilizate pentru a simula condițiile de peletizare dintr-o presă, permițând o analiză amănunțită a factorilor care influențează calitatea peletelor obținute, oferind posibilitatea realizării unui număr mare de experimente, variind cu ușurință parametrii de intrare și de comandă.
8. În cadrul tezei s-au realizat cercetări experimentale utilizând două matrițe cu un singur canal, cu orificii de peletizare de 8 mm, respectiv 10 mm. Materialul utilizat a fost rumeguș de brad cu dimensiuni ale particulelor  $< 2$  mm.
9. Parametrii de *intrare și comandă*, aleși conform planului experimental, au fost: umiditatea materialului  $U_i$  (10%; 13%; 16%), temperatura din timpul procesului  $\theta$  (70 °C; 80 °C; 90 °C), forța de compactare  $F_{max}$  (10 kN; 20 kN; 30 kN) și viteza de peletizare  $v$  (1,3 mm/s; 2,1 mm/s;



- 2,8 mm/s). Pentru fiecare dintre parametrii de intrare și de comandă s-au considerat câte trei valori diferite (rezultând în total câte 243 de experimente pentru fiecare matriță utilizată).
10. Parametrii de ieșire, cei care exprimă calitatea peletelor și eficiența procesului de peletizare se exprimă prin:
    - lungimea peletelor la ieșirea din proces;
    - volumul peletelor la ieșirea din proces;
    - densitatea peletelor la ieșirea din proces;
    - umiditatea peletelor la ieșirea din proces;
    - durabilitatea peletelor în timp;
    - energia consumată pentru obținerea peletelor.
  11. Ca urmare a realizării cercetărilor experimentale și analizei datelor experimentale obținute, au fost realizate o serie de corelații între parametrii procesului de lucru care dau primele informații certe despre intensitatea legăturii dintre diferite variabile ce descriu procesul de comprimare a pulberii de biomasă. Rezultatele corelațiilor au fost puse în evidență și s-au explicat consecințele valorilor componentelor matricii corelațiilor asupra intensității legăturii între corelații.
  12. S-au remarcat legături intense între densitatea și presiunea relativă de compactare, și a ambelor cu umiditatea materiei prime.
  13. S-a remarcat că o umiditate mare a materiei prime (de 16%) conduce la obținerea unei umidități mari a peletelor, pierderea în umiditate prin procesul de peletizare fiind în medie de 2,94 % pentru matrița de 8 mm și 3,06% pentru cea de 10 mm, ceea ce provoacă majoritatea dezagregărilor peletelor. Același comportament îl are și masa volumică a materiei prime, unde creșterea acesteia conduce la obținerea unor pelete care se dezintegrează mai ușor.
  14. Energia consumată  $E_c$  depinde moderat de forța de compactare  $F_{max}$  și nesemnificativ de ceilalți parametri de intrare și comandă. În medie,  $E_c$  a avut valori mai mari pentru matrița de 10 mm pentru  $U_i = 10\%$  și  $16\%$  (cu 5,6%) și mai mici pentru  $U_i = 13\%$  (cu 11,05%).
  15. Dependențele celor mai mulți parametri calitativi sunt în raport cu parametrii de intrare (umiditatea materialului) și mai puțin cu parametrii de comandă. Dependența de viteza de comprimare și temperatura matriței au fost slabe pentru toți parametrii.
  16. După realizarea cercetărilor experimentale, datele obținute au arătat o corelare puternică între datele experimentale și cele estimate teoretic,  $R=0,837$  pentru modelul 1 și  $R=0,711$  pentru modelul 2.
  17. Interacțiunea dintre parametrii procesului de peletizare a fost studiată folosind metoda modelării statistice, mai precis a regresiiilor polinomiale. Corelațiile dintre parametrii de ieșire (cei care indică calitatea procesului de peletizare) și parametrii de intrare și comandă, arată că cei cinci parametri de ieșire sunt în relații puternice numai cu o parte dintre parametrii de intrare și comandă. Parametrii lungimea peletei ( $L_p$ ), densitatea peletei ( $\rho_p$ ), umiditatea peletei ( $U_p$ ) și volumul peletei ( $V_p$ ) depind puternic de masa volumică a materialului ( $\rho_0$ ), umiditatea materialului ( $U_i$ ), volumul materialului ( $V_0$ ) și slab de forța maximă de comprimare ( $F_{max}$ ), cu excepția lui  $U_p$  care nu prezintă vreo relație cu  $F_{max}$ , conform calculului corelației.
  18. A fost observat un optim teoretic al umidității de intrare a materialului de peletizat, aflat în jurul valorii de 11%.
  19. S-a observat un punct optim de funcționare din punct de vedere al procesului de lucru, corespunzător valorii de 270 MPa pentru care consumul de energie este constant indiferent de umiditatea materiei prime.
  20. Pentru energia consumată pe unitatea de masă, a fost obținut un punct de optim situat în jurul valorii presiunii de 250 MPa, pentru care energia consumată este constantă indiferent de umiditate.

21. Pentru datele obținute pe mașina de peletizat cu matrița inelară, a existat o corelare puternică între datele experimentale și cele estimate teoretic,  $R = 0,911$  pentru modelul  $\rho_p(\rho_0, p, U_d) = a\rho_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^b U_d^c$  și  $R = 0,847$  pentru modelul  $\rho_p(\rho_0, p, U_d) = \rho_0 \left(\frac{Q}{\rho_0 v^2 V_0}\right)^a \left(\frac{p}{p_0}\right)^b U_d^c$ .

### 7.2. Contribuții personale

Ca urmare a cercetărilor teoretice și experimentale realizat în cadrul prezentei teze, se desprind o serie de contribuții personale ale autoarei, dintre care se pot aminti:

1. Realizarea unei analize sintetice a literaturii de specialitate în ceea ce privește stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale în domeniul compactării biomasei, în general, și a peletizării biomasei, în particular, prin studierea unui număr de peste 300 lucrări de specialitate din țară și din străinătate din care 132 se regăsesc în bibliografia prezentei teze de doctorat, celelalte fiind date în rapoartele semestriale la doctorat.
2. Dezvoltarea a doi algoritmi matematici privind densitatea peletelor din biomasă în funcție de parametrii de intrare și comandă ai procesului.
3. Realizarea unui stand experimental pentru o singură peletă în vederea efectuării cercetărilor experimentale de densificare a biomasei.
4. Dezvoltarea unei metodologii de experimentare pentru peletizarea biomasei utilizând standul experimental.
5. Caracterizarea fizico-chimică a biomasei utilizate în procesul de peletizare prin determinarea conținutului de umiditate, cenușă, materii volatile, putere calorică inferioară.
6. Realizarea cercetărilor experimentale și prelucrarea datelor experimentale.
7. Validarea modelelor matematice privind densificarea biomasei, atât pe standul experimental, cât și pe o mașină de peletizare cu matriță inelară.
8. Realizarea modelării statistice și optimizarea procesului de peletizare a biomasei;
9. Formularea unui set de concluzii și recomandări ce se pot dovedi utile specialiștilor din domeniul biocombustibililor, aducând contribuții la aprofundarea cunoștințelor în domeniul densificării biomasei.
10. Rezultatele obținute din studiile și cercetările realizate în cadrul prezentei teze de doctorat au fost valorificate prin elaborarea și publicarea unui număr de 14 lucrări științifice (2 ISI, 4 ISI Proceedings, 8 BDI, 5 comunicări) în reviste de specialitate, în volume ale unor conferințe naționale și internaționale, prin prezentarea a 5 dintre acestea în cadrul unor manifestări științifice naționale și internaționale sub formă de prezentare orală sau poster, în calitate de autor și coautor.
11. Depunerea unei cereri naționale de brevet cu titlul „*Kit de optimizare a procesului de lucru al echipamentelor de peletizat cu matriță inelară*”, înregistrată la Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci cu numărul A00592 / 20.08.2018.

### 7.3. Recomandări și perspective

Cercetările ar putea continua prin:

1. perfecționarea standului pentru densificarea biomasei în laborator prin diversificarea matrițelor utilizate și prin modificarea modului de încălzire a matrițelor;
2. cercetări teoretice și experimentale privind densificarea biomasei prin realizarea unor teste în amănunt pentru determinarea durabilității mecanice a peletelor obținute;
3. cercetări experimentale privind densificarea biomasei utilizând biomasă agricolă, pentru verificarea modelelor matematice și pentru acest tip de biomasă.