

# STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR CU PRIVIRE LA INFLUENȚA VARIABILELOR DE PRODUCȚIE ASUPRA CALITĂȚII BIOCOMBUSTIBILILOR DENSIFICAȚI ÎN FORMĂ DE PELEȚI

*Andrei Gudîma, cercet. șt., Grigore Marian, dr. hab., prof. univ., Andrei Pavlenco, drd.  
Universitatea Agrară de Stat din Moldova.*

## INTRODUCERE

Activitățile agricole generează o cantitate importantă de reziduuri care pot fi valorificate prin producerea biocombustibililor solizi. Peleții sunt una din formele cele mai răspândite de biocombustibili solizi densificați dar și cu cele mai pretențioase cerințe de calitate. Din acest motiv, multe din reziduurile agricole nu pot fi procesate în peleți calitativi prin metodele tradiționale folosite astăzi în industria biocombustibililor solizi.

Scopul general al acestui studiu este analiza stadiului actual cu privire la metodele existente de sporire a calității peleților de foc produși din biomasă autohtonă în acord cu politicile de dezvoltare a surselor regenerabile de energie. Importanța și actualitatea studiului realizat sunt justificate de volumul mare de reziduuri agricole existente în Republica Moldova, de rolul pe care-l are valorificarea acestora asupra producerii biocombustibililor solizi și protecției mediului în condițiile Republicii Moldova.

În lucrare, în rezultatul sintetizării datelor din literatura de specialitate și a cercetărilor experimentale proprii, sunt formulate direcțiile posibile de sporire a calității peleților de foc produși din biomasă autohtonă.

## 1. CALITATEA PELEȚILOR ȘI FACTORII CARE O INFLUENȚEAZĂ

### 1.1. Generalități cu privire la calitatea peleților de foc

În ciuda situației privind producerea și consumul de peleți în țările dezvoltate, la noi în Republica Moldova, dezvoltarea acestei ramuri este destul de modestă. Acest lucru ar putea fi explicat, parțial, prin costuri semnificative ale investițiilor necesare pentru lansarea afacerii, dar, nu în ultimul rând, și prin calitatea peleților produși din materie primă autohtonă.

Cerințele de calitate deferă în funcție de destinația peleților, fiind grupați în două categorii:

peleți pentru consum neindustrial și peleți pentru consum industrial. Cerințele față de peleții pentru consum neindustrial sunt mai rigide și sunt reglementate de către standardul ISO 17225. Standardul reglementează următoarele caracteristici obligatorii ale peleților: conținutul de umiditate, conținutul de cenușă, densitatea în vrac, conținutul de elemente fine, durabilitatea, puterea calorică inferioară la recepție, conținutul de elemente chimice.

**Tabelul 1.** Cerințe minime referitoare la principalii parametri de calitate ai peleților din biomasă lemnoasă, conform ISO 17225.

| Proprietăți     | Unități de măsură | ENplus A1      | ENplus A2 | ENplus B |
|-----------------|-------------------|----------------|-----------|----------|
| Diametru        | mm                | 6 ±1 sau 8 ±1  |           |          |
| Lungimea        | mm                | 3,15 < L ≤ 40  |           |          |
| Umiditate       | %                 | ≤ 10           |           |          |
| Cenușă          | %                 | ≤ 0,7          | ≤ 1,2     | ≤ 2,0    |
| Durabilitatea   | %                 | ≥ 98,0         | ≥ 97,5    |          |
| Fracție fină    | %                 |                | ≤ 1,0     |          |
| Temperatura     | °C                | ≤ 40           |           |          |
| NCVd            | MJ/kg             | ≥ 16,5         |           |          |
| Densit. în vrac | Kg/m <sup>3</sup> | 600 ≤ BD ≤ 750 |           |          |
| Aditivi         | %                 | ≤ 2            |           |          |
| Azot, N         | %                 | ≤ 0,3          | ≤ 0,5     | ≤ 1      |
| Sulf, S         | %                 | ≤ 0,04         | ≤ 0,05    |          |
| Clor, Cl        | %                 | ≤ 0,02         |           | ≤ 0,03   |
| T. fuz. cenușă  | °C                | ≥ 1200         | ≥ 1100    |          |
| Arsen, As       | mg/kg             | ≤ 1            |           |          |
| Cadmium         | mg/kg             | ≤ 0,5          |           |          |
| Crom            | mg/kg             | ≤ 10           |           |          |
| Cupru           | mg/kg             | ≤ 10           |           |          |
| Plumb           | mg/kg             | ≤ 10           |           |          |
| Mercur          | mg/kg             | ≤ 0,1          |           |          |
| Nichel          | mg/kg             | ≤ 10           |           |          |
| Zinc            | mg/kg             | ≤ 100          |           |          |

PS. Procentajul se prezintă în procente din masa probei

Din Tabelul 1 se evidențiază un șir de proprietăți fizice și chimice ale peleților, proprietăți care pot obține diferite valori în funcție de o mulțime de factori de influență prezenți în diferite etape ale ciclului de producere.

Proprietățile reglementate de către normele internaționale ENPlus sunt clasificate în proprietăți fizice și proprietăți chimice. Proprietățile fizice sunt importante pentru performanța finală a sistemului de combustie și logistica peleților, iar proprietățile chimice sunt responsabile pentru puterea de ardere, fiabilitatea centralelor termice și impactul asupra mediului.

Asigurarea indicatorilor calitativi ai peleților, produși din materie primă autohtonă, în conformitate cu cerințelor ENPlus, este destul de problematică. Unul dintre principalii factori care creează probleme la producerea peleților de foc din materie primă autohtonă este gradul de densificare a particulelor de biomasă. La rândul său, gradul de densificare este influențat de un șir de variabile dependente de caracteristicile materiei prime care sunt foarte eterogene și necesită o abordare specială în procesul de condiționare primară și finală. Din acest motiv, este foarte important să se cunoască factorii care influențează sistemul de densificare a peleților și valorile optime ale acestora, iar în consecință calitatea integrală a produsului finit.

Variabilele procesului de densificare pot fi grupate în trei clase distincte: variabilele materiei prime; compoziția biomasei; variabilele procesului.

## **1.2. Calitatea peleților funcție de variabilele materiei prime**

### **1.2.1. Variabilele de influență a calității materiei prime**

Variabilele materiei prime, care influențează cel mai mult calitatea peleților, includ originea biomasei, conținutul de umiditate, dimensiunile, forma și distribuția particulelor [3].

În conformitate cu standardul SMV EN 14961-1, biomasa folosită în calitate de materie primă la producerea peleților este clasificată în următoarele categorii:

- rezultată din producția forestieră și pomicultură (lemn, reziduuri din tăierea lemnului, rumeguș, copaci, arbuști, așchii, coajă, etc.), din exploatarea și curățarea pădurilor, îngrijirea plantațiilor pomicole, grădinilor, parcurilor, viilor, mentenanța drumurilor etc.;

- reziduuri rezultate din producția agricolă, din procesele agricole, deșeuri urbane organice;

- culturi energetice crescute special pentru scopuri energetice.

Datele noastre preliminare [2, 4], cele prezentate în literatura de specialitate de către alți autori [5, 6], precum și experiența producătorilor de peleți demonstrează că din potențialul rezultat din activități agricole, doar o parte de reziduuri sunt folosite la producerea peleților. Această situație este dictată de faptul că o mare parte din reziduurile enumerate posedă anumite caracteristici calitative care nu se înscriu în cerințele normative ENPlus. Mai mult ca atât, proprietățile calitative ale biomasei provenite din reziduuri agricole sunt influențate de un șir de factori specifici condițiilor concrete de cultivare, depozitare, procesare.

În această situație este argumentat un studiu complex, mai profund, al factorilor care influențează calitatea biomasei agricole și posibilitatea folosirii acesteia la producerea peleților de foc.

### **1.2.2. Influența umidității materiei prime asupra calității peleților de foc**

Atât biomasa vegetală, folosită în calitate de materie primă, cât și peleții, obținuți din această biomasă, în natură, sunt materiale higroscopice. Prin urmare, aceste materiale au capacitatea de a face schimb de umiditate cu atmosfera, iar ca rezultat au și proprietatea de a-și schimba anumite calități, în special, puterea calorică, durabilitatea, stabilitatea în timpul transportării și păstrării [7, pp. 46-53].

Rezultatele experimentale, obținute de către cercetătorii din Universitatea de Științe Agricole din Suedia *Christofer Rhern, Rolf Gref* [8 p. 15], au scos în evidență variația absorbției de umiditate, densități particulelor și a rezistenței la compresiune a peleților produși din molid funcție de umiditatea inițială a biomasei și temperatura peletizării. În baza cercetărilor experimentale, s-a demonstrat că, pentru peleții obținuți din biomasă lemnoasă, ce-a mai bună durabilitate mecanică și densitate a particulelor se obține la temperaturi ridicate și conținut scăzut de umiditate. De asemenea, s-a constatat că rezistența mecanică este direct influențată de densitatea particulelor care, la rândul său, este puțin dependentă de forța de presare, indicând faptul că presiunea în matriță nu are nevoie să fie mai mare de 50 MPa.

*Robert Samuelsson, Sylvia H. Larsson, Mikael Thyrel, Torbjörn A. Lestander* [9], studiind formarea legăturilor de coeziune dintre particulele materiei prime, la fabricarea peleților din pin, au stabilit că calitatea optimă a peleților se obține în cazul conținutul de umiditate a materiei prime de 11 - 13 % după o depozitare de 120 zile. Conform cercetărilor realizate în Austria de către *Obernberger și Thek*

[10], un conținut de umiditate a materiei prime în limitele 8 – 12 % asigură o calitate ridicată a peletelor fabricați din diferite tipuri de biomasă lemnoasă.

Analizând influența umidității biomasei asupra durabilității peleților, *Tumularu et al.* [3 p. 26-28], au stabilit că densificarea particulelor poate fi realizată prin trei căi: a) prin micșorarea temperaturii de vitrificare (sticlizitate); b) prin promovarea unor punți solide de legătură; c) prin creșterea suprafețelor de contact ale particulelor datorită forțelor *van der Waals*.

În cercetările realizate în continuare de *Yancey, Tumularu et al.* [25] s-a arătat posibilitatea procesării biomasei obținute din reziduuri de porumb cu conținut inițial de umiditate sporit. Astfel, analizând cheltuielile specifice pentru diferite operații, autorii au arătat posibilitatea obținerii peleților densificați din biomasă de porumb cu umiditatea inițială în diapazonul 28-38%. Pentru aceasta au fost folosite operații cum ar fi preîncălzirea materiei prime în cicloane (uscătoare rotative) amplasate în serie, care usucă biomasa până la 15%. Ei au arătat că pentru uscarea biomasei de la 30% până la 15% se folosește 70% din energia consumată pentru procesare, pe când pentru peletizarea propriu zisă a peleților – doar 7%.

Cercetările, realizate de către *Kaliyan, N. și Morey, R.V.* [12], referitoare la caracteristicile de densificare a biomasei provenite din reziduuri de porumb a scos în evidență că mărirea conținutului de umiditate în bază umedă de la 10 la 15% sporește durabilitatea peleților de la 62 la 84%, iar pentru densificarea biomasei lemnoase, *Li, Yadong și Liu, Henry* postulează valoarea conținutului de umiditate în diapazonul 6 – 12% [13], pe când *Obernberger, I. și Thek, G* [14], pentru același tip de biomasă, recomandă conținutul de umiditate în limitele 8 – 12%.

Efectul conținutului de umiditate asupra durabilității peleților produși din paie de grâu a fost studiat de către *O'Dogherty, M. J și Wheeler, J. A.* [31]. Acești autori susțin că intervalul optim al umidității se află în limitele 10 – 20%.

În baza celor analizate se poate concluziona că umiditatea inițială a biomasei participă la formarea structurii peleților. Presiunea densificării formează condiții favorabile pentru apariția legăturilor intermoleculare datorită apropierii dintre particule. Totodată conținutul de umiditate din biomasă poate avea rol de ranforsare sau, invers, de slăbire a acestor legături.

În cazul conținutului optim de umiditate, atracția intermoleculară se pronunță mai activ, contribuind la formarea unor legături de adeziune și coeziune stabile. Dacă conținutul de umiditate este mai mic ca cel necesar, atunci se micșorează suprafața de contact al particulelor acoperite cu

straturi fluide de apă, ce rezultă rezistență scăzută a peleților. În acest caz sunt necesare presiuni mai mari pentru formarea contactului util, condiții realizarea cărora, din punct de vedere tehnologic, este destul de problematică. Totodată, presiunea excesivă poate duce la îngroșarea filmului de apă în rezultatul evacuării umidității higroscopice din capilarele interioare deformate. Surplusul de umiditate, de asemenea, influențează negativ durabilitatea peleților din cauza creșterii grosimii filmului de apă și reducerii forțelor de adeziune ale particulelor.

De aici rezultă importanța cunoașterii umidității inițiale optime, dar și modul de condiționare a umidității pentru asigurarea caracteristicilor de calitate scontate ale produsului finit. De adăugat că, datele referitoare la conținutul optim de umiditate la densificarea biomasei în peleți, acoperă o gamă largă de valori, chiar pentru una și aceeași specie de plantă. De adăugat că, adesea, aceste date poartă un caracter destul de variat, iar în unele cazuri chiar contradictoriu. Probabil că situația creată are loc din cauza unor particularități de structură a biomasei respective care depinde de mai mulți factori, inclusiv locul și anul prelevării, condițiile de cultivare etc. Această situație motivează studierea proceselor dependente de conținutul de umiditate pentru diverse tipuri de biomasă autohtonă.

### 1.3. Influența granulației materiei prime asupra calității peleților de foc

Dimensiunile particulelor, forma și distribuția acestora sunt factorii care influențează mult mecanismul de creare a forțelor de legătură intermoleculară în procesul de densificare a biomasei prin presare. Valoarea legăturilor intermoleculare este dependentă de mai mulți factori, printre care mai importanți sunt:

- capacitatea de combinare a atomilor, adică numărul electronilor cu care atomul participă la formarea legăturilor chimice (electronii de valență);
- legăturile de hidrogen sau puntea de hidrogen;
- forțele *van der Waals*, care reprezintă forțele de atracție dintre moleculele neutre.

În general, legăturile intermoleculare sunt invers proporționale cu mărirea particulelor, deoarece particulele mai mici formează o suprafață de contact mai mare la densificare. Însă, atunci când particulele sunt foarte mici produsul finit își pierde consistența fibrei și nu face priză în faza de densificare [7, p. 103].

Procesul de peletizare fiind unul complex și de importanță majoră în producerea peleților a fost studiat de mai mulți autori. Astfel, *Mani et al.* [15], au stabilit că cea mai bună densificare pentru

materialele studiate s-a obținut în cazul cernerii prin sita cu deschiderea ochiurilor 3,2 mm.

*Nguyen et al.* din Centrul de Cercetare a Materialelor Renovabile din Canada [16] au studiat efectele parametrilor procesului de peletizare și caracteristicile materiei prime asupra proprietăților fizice și mecanice ale peleților produși din arțar de zahăr. Analizând diferiți indicatori tehnici și economici ai procesului de peletizare din biomasă obținută din arțar de zahăr viguros și neviguros mărunțită cu site de 1,5 și 2,6 mm, au constatat că peleții obținuți din biomasă cu granulația 1,5 mm cedează celor obținuți din biomasă cu granulația 2,5 mm. Autorii explică acest fapt prin existența unei cantități mai mari de fracție fină în cazul mărunțirii cu site 1,5 mm (31,9 % pentru lemnul neviguros și 22,9 % pentru lemn viguros). În cazul mărunțirii cu site 2,5 mm, conținutul de fracție fină este semnificativ mai mic (13,1 % pentru lemn neviguros și 10,7 pentru lemn viguros). În plus, la producerea peleților din lemn neviguros consumul de energie este mai mic și pericolul de blocare redus. Acest fenomen se explică prin coeficientul de frecare mai mic între biomasă și canalele matriței.

Investigațiile experimentale, realizate în comun de către cercetătorii din Canada și SUA *Hamid Rezaei*, *C.JimLima*, *Anthony Lau* și *Shahab Sokhansanj* [17], au arătat că dimensiunile, forma și densitatea particulelor de biomasă influențează transportabilitatea și fluidizarea peleților, rata de uscare și cea de descompunere.

Cercetătorii din Suedia *Dan Bergströma*, *Samuel Israelssonb*, *Marcus Öhmanc*, *Sten-Axel Dahlqvistd*, *Rolf Grefa*, *Christoffer Bomanb*, *Iwan Wästerlund* [18] au studiat influența dimensiunilor particulelor rumegușului din pin scoțian asupra calității peleților produși la presiuni ridicate. Pentru aceasta rumegușul, uscat în prealabil până la un conținut de umiditate ( $M_{ar}$ ) de 8,7%, a fost măcinat într-o moară cu ciocane și cernută prin 4 site cu deschiderea ochiurilor de 1,0; 1,9; 4,0 și 8 mm. Rezultatele au arătat că conținutul de fracție fină în peleți ( $F < 3,15$  mm) se mărește odată cu micșorarea dimensiunilor particulelor. Peleții fabricați din biomasă cu particule mai mici de 1 mm conțin 1,5 % fracție fină și, respectiv, cei fabricați din biomasă cu dimensiuni 1–2 mm – 1,4%; 2–4 mm – 0,8%. Autorii n-au specificat motivul acestor rezultate, însă au expus afirmațiile lui Li [29] despre o posibilă consecință a elasticității și conținutului de umiditate diferit în particulele materiei prime. Particulele mai lungi aderă mai bine între ele datorită mecanismului forțelor de adeziune mai pronunțate, pe când particulele mici, fiind suprauscate, aderă mai slab una cu alta.

Referitor la densitatea particulelor, autorii au ajuns la concluzia că, în cazul peletizării la presiuni mari, peleții arată densități, aproximativ, egale. Totodată, ei nu neagă rezultatele obținute de către alți autori, în cazul peletizării singulare la presiuni mici și mijlocii, de exemplu, *Mani et al.* [15]. Aceiași situație s-a urmărit și la studiul dependenței umidității și rezistenței la abraziune a peleților funcție de dimensiunile particulele. Practic, toate probele au arătat același conținut de umiditate și rezistență la abraziune. În schimb, rezistența la compresie variază mult funcție de dimensiunile particulelor, remarcând  $61,2 \text{ N mm}^{-1}$  pentru peleții produși din biomasă cu particule fine și  $40,1 \text{ N mm}^{-1}$  - pentru peleții produși din biomasă cu fracția grosieră [19, tab. 3].

Un studiu realizat de *Serrano et al.* [19] a indicat rezultate opuse atunci când au comparat peleții fabricați la instalații de laborator cu cei fabricați industrial.

În baza analizei celor constatate de diferiți autori se poate afirma că dimensiunile particulelor au o anumită influență asupra caracteristicilor peleților și că această influență este mai pronunțată în cazul peletizării la presiuni mici și mijlocii. De asemenea, este evidentă dependența rezistenței la compresie a peleților funcție de dimensiunile particulelor și, implicit, că această dependență se răsfrânge la una din importante caracteristici calitative ale peleților – durabilitatea mecanică.

#### **1.4. Calitatea peleților funcție de originea și caracteristicile materiei prime**

Biomasa vegetală este compusă din cca 90% carbon și oxigen și aproximativ 6% de hidrogen, elemente care sunt absorbite de către plantă sub formă de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  sau  $\text{HCO}_3$ . Aceste trei componente se conțin în toți compușii biomasei vegetale.

Compușii chimici ai biomasei pot fi diferențiați în două clase mai importante: glucide (cca. 2/3 din volumul total de substanțe sintetizate) și substanțe organice cu conținut de azot.

Cele mai importante glucide sunt moleculele de celuloză (polimer  $\text{C}_6$ ), înconjurate de hemiceluloză (polimeri predominant  $\text{C}_5$  cu incluziuni  $\text{C}_6$ ) și lignina care este depusă între fibre. Conținutul acestor trei tipuri de biopolimeri, în masa totală a biomasei, este de cca. 95%. Proporția rămasă este alcătuită dintr-o mulțime de materiale asociate, numite substanțe extractive în formă de rășini, grăsimi, tanin, amidon, zahăr, proteine și minerale.

Conținutul de celuloză, hemiceluloză și lignină în biomasa vegetală este diferit și, drept

rezultat, potențialul energetic al diferitor tipuri de biomasă este destul de variat. Totodată, deoarece conținutul principalelor elemente chimice, care sunt carbonul (C), hidrogenul (H) și oxigenul (O), nu diferă semnificativ de la un tip de biomasă la altul, rezultă că puterea de ardere a biomasei este cel mai mult influențată de raportul dintre aceste elemente. Cu cât raportul O/C și H/C este mai mic, cu atât puterea calorică este mai mare. Astfel, cu cât conținutul de C din biomasă este mai înalt cu atât puterea de ardere este mai mare [20].

Deoarece lignina conține cel mai mult C, energia termică a ligninei este mai mare și constituie cca. 5500 - 6500 kcal/kg în stare uscată [21 p. 28], iar cea a celulozei și hemicelulozei, care sunt mai sărace în carbon, este mai mică (4000 - 4500 kcal/kg în stare absolut uscată). De exemplu, puterea calorică a biomasei provenită din lemnoase este mai mare, deoarece are un procentaj mai mare de lignină în comparație cu biomasa provenită din reziduuri agricole și culturi energetice erbacee care au un procent mai mic de lignină.

La formarea constituției biocombustibililor solizi este necesar să se aibă în vedere aceste considerente, dar și faptul că lignina este liantul principal în formarea integrității biocombustibililor solizi.

Totodată, o caracteristică completă a biomasei, folosite pentru producerea biocombustibililor solizi, presupune cunoașterea mai detaliată a compoziției chimice, în special a elementelor care influențează procesul de ardere, fiabilitatea utilajului de fabricare și a termocentralelor, precum și a celor care direct sau indirect au impact asupra mediului.

Printre elementele, conținutul cărora este reglementat de către standardele de calitate a peleiților se enumeră elementele chimice compuse dintr-un amestec de molecule organice cu conținut de hidrogen care, de obicei, includ atomi de oxigen, adesea azot, sulf și clor, precum și cantități de elemente majore formatoare de cenușă (*Al, Ca, Co, Fe, Mg, P, K, Si, Na și Ti*), elemente minore volatile (*As, Cd, Hg, Pb, Zn*), elemente non-volatile sau parțial volatile (*Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Mn și V*).

Biomasa vegetală, folosită la producerea peleiților, conține până la 2 % de azot, 1,8 % clor și cca. 7% sulf. Este necesar să se menționeze că normele ENPlus limitează conținutul de azot până la 0,04%, de sulf – 0,05% și de clor- până la 0,03%. Destul de severe sunt cerințele referitoare la conținutul elementelor majore și minore. De exemplu, conținutul semi-metalului *As* nu trebuie să depășească 1 mg într-un kg de peleți, conținutul cadmiului, care este un metal foarte toxic, nu poate depăși 0,5 mg/kg iar conținutul de mercur este și mai

strict limitat – cel mult 0,1 mg/kg peleți [5 p 75 - 78].

Concretizarea cerințelor față de materia primă, folosită la producerea peleiților, a determinat extinderea grupurilor de biomasă folosite la producerea peleiților, dar și căutarea de noi posibilități de dirijare cu proprietățile produsului finit [21 p. 147 - 152].

În condițiile Republicii Moldova, la momentul actual, principalele categorii de biomasă pretabilă de a fi analizată în calitate de materie primă pentru fabricarea peleiților, poate fi clasată în: biomasă lemnoasă rezultată din activități agrosilvice (provenită din copaci, tufe și arbuști din păduri, plantații silvice etc.); biomasă provenită din culturi energetice; biomasă provenită din reziduuri agricole (rămășițe rezultate de la recoltarea sau prelucrarea produselor agricole și din zootehnie); biomasă din reziduuri industriale și co-produse de la fabricații industriale [5 p. p. 38].

Cercetările anterioare realizate de către noi [2, 4, 22, 23] și de alți autori [24, 25] denotă că folosirea biomasei provenite din activități agricole, de regulă, conduce la obținerea peleiților de calitate inferioară în raport cu cele obținute din biomasă lemnoasă. Din acest motiv, prezintă interes studiile realizate cu scopul stabilirii corelării dintre diferite proprietăți ale biomasei cu caracteristicile finale ale peleiților.

Există mai multe studii cu privire la corelarea caracteristicilor biomasei cu parametrii calitativi ai produsului finit [2, 8, 24, 25] și de combinare a caracteristicilor biomasei cu parametrii peletizării [9, 26].

Într-un șir de lucrări se prezintă rezultate referitoare la influența anumitor componente ale materiei prime asupra calității peleiților. În acest aspect, pe primul plan se află studiile referitoare la cercetarea influenței conținutului de substanțe extractive în materia primă asupra diferitor proprietăți fizice și mecanice. Astfel, *Back* [27] a arătat că, atunci când lemnul este proaspăt tăiat, substanțele extractive sunt concentrate la suprafața lemnului, formând un strat de dezactivare, care împiedică formarea legăturilor dintre particulele de lemn. Mai târziu, *Stehr, M.* și *Johansson, I.* [28] au numit acest strat – stratul delimitării slabe. S-a demonstrat că peleții, obținuți din rumeguș de pin, din care, preventiv, au fost scoase substanțele extractive, posedă o densitate a particulelor și o durabilitate mecanică mai mare ca peleții obținuți din rumeguș proaspăt (ne extractat).

*Stelte* și colegii din Laboratorul Național pentru energie sustenabilă (Universitatea Tehnică din Danemarca) și de la Facultatea de Științe ale Vieții (Universitatea din Copenhaga) [29] au studiat mecanismul de adeziune dintre particulele biomasei și evoluția defectiunilor structurale în peleții produși

din specii de biomasă tare, moale și din păioase (fag, molid și paie de grâu). Peleții au fost presați la temperatura de 20 °C și 100 °C.

Analiza rezultatelor obținute a scos în evidență că mecanismul de formare a legăturilor de coeziune și adeziune dintre particulele de biomasă este diferit și influențează direct proprietățile de integritate a peleților. Astfel, rezistența la compresiune a peleților din biomasă lemnoasă a fost cu mult mai mare decât a peletelor din paie, atât pentru cele procesate la 20 °C, cât și pentru cele procesate la 100 °C. Autorii explică acest rezultat prin faptul că cantitatea de extractibile, depistată în cuticula celulelor de paie, este cu mult mai mare ca cea din biomasa lemnoasă.

Aceleași cercetări realizate de către *Stelte* și colaboratorii arată, în mod convingător, că peleții presați la temperatura de 20 °C, indiferent de originea biomasei, au o rezistență mai mică la tracțiune față de cei presați la 100 °C. Ei au interpretat acest lucru ca dependența forțelor de adeziune de conținutul de extractive. Astfel, în paie a fost găsită o cantitate mult mai mare de extractive (4,6%) decât în speciile de lemn (în molid 1,8%, iar în fag doar 0,6%), lucru ce și-a găsit explicație prin cantități importante de ceruri semnalate în cuticula protectoare a celulelor de paie [29].

*Bradfield* și *Levi* [30] afirmă că durabilitatea peleților scade în cazul confecționați acestora din biomasă lemnoasă cu conținutul sumar de lignină și extractive mai mare de 34%. Autorii au presupus că acest efect este cauzat de pătrunderea între zonele de contact a unei cantități excesive de lignină și extractivi care, la anumite temperaturi, au rolul de separatoare de faze în formă de mastici, ceruri, grăsimi etc.

În baza analizei datelor din literatura de specialitate referitoare la dependența anumitor proprietăți fizico - mecanice ale peleților de conținutul de extractive, se poate înainta ipoteza despre posibilitatea sporirii calității peleților obținuți din biomasă autohtonă prin diverse procedee care ar micșora conținutul de extractive din biomasa folosită în calitate de materie primă.

## 2. CALITATEA PELEȚILOR ÎN FUNCTIE DE VARIABILELE DE FABRICAȚIE

### 2.1. Constatări cu privire la variabilele peletizării și mecanismul de formare a legăturilor dintre particulele biomasei

Structura și proprietățile peleților, pe lângă natura materiei prime, sunt asigurate de variabilele

de producție. Printre acestea se regăsesc: regimurile tehnologice (presiunea de comprimare, temperatura de formare a granulelor, viteza tăvălugilor); parametrii constructivi ai matriței (diametrul și lungimea canalelor, interstițiul dintre tăvălugi și matriță și al.).

Toate proprietățile rezultate de variabilele de producție indisolubil sunt legate de mecanismul peletizării și factorii care influențează acest mecanism.

Cu toate că mecanismul de formare a legăturilor dintre particulele de biomasă la densificare au alcătuit subiectul unor studii [15, 18, 29], totuși, la ziua de astăzi, nu există o teorie unică a peletizării iar datele existente, în majoritatea cazurilor, se limitează la tratări simpliste cu caracter experimental.

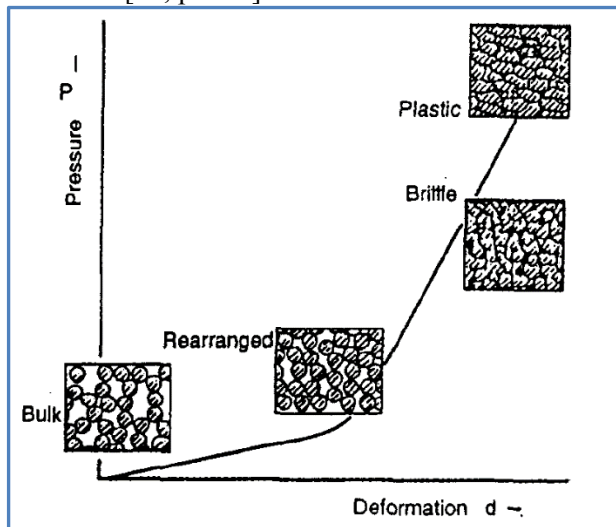
În această situație ar fi bine să apelăm la cunoștințele din domeniile conexe cum ar fi știința materialelor, presarea materialelor compozite, tabletarea în industria farmaceutică etc. În calitate de argument poate servi faptul că în procesul peletizării, practic, apar aceleași forme cunoscute de legături fizico-mecanice și fizico-chimice dintre particule. Printre acestea se regăsesc forțele capilare și tensiunile superficiale dintre fazele lichidă și solidă, forțele de adeziune și coeziune, forțele *van der Waals*, forțele electrostatice etc.

Unul din domeniile intens studiate se referă la producerea tabletelor farmaceutice, proces care este similar cu cel al peletizării biomasei lignocelulozice [31 - 33]. Autorii analizează două aspecte importante: primul - comportarea particulelor sub presiune și al doilea - interacțiunea dintre particule. Ei explică procesul de densificare a particulelor prin faza de reorganizare forțată a particulelor care necesită o presiune mică, urmată de a doua fază caracterizată prin creșterea bruscă ascendentă a presiunii fapt care cauzează distrugerea particulelor mai fragile și deformarea celor maleabile. Pe parcursul întregului proces are loc micșorarea porozității datorită pătrunderii fazei fluide a materiei prime în spațiile libere dintre particule. Timpul presării trebuie să fie suficient pentru ca deformările elastice să se converseze în deformări plastice, iar particulele fragile să se distrugă.

Este evident că, cu cât durata acțiunii presiunii este mai mare, cu atât procesul densificării este mai complet însă, în același timp, mărirea duratei de acțiune a presiunii, inevitabil, duce la creșterea perioadei de fabricare a peleților, deci și la creșterea consumului de energie precum și a timpului de muncă al lucrătorului și utilajului. Din acest motiv, este important să se cunoască durata optimă a

presării, valoare care derivă din viteza de rotire a tăvălucilor granulatoarelor.

În figura 1, Pietsch prezintă, prin patru modele, schimbarea structurală a unei mase de pulbere pe parcursul perioadei densificării cu viteză constantă [34, p. 233].



**Figura 1.** Mecanismele care au loc la densificarea particulelor solide [34].

În partea de jos a Figurii 1.4 se prezintă diagrama evoluției presiunii în timp corelată cu modificările structurale ale biomasei. Referindu-ne la graficul din Fig. 1.4, se evidențiază patru pași ai aglomerării: faza inițială; faza de tranziție; faza de lucru și faza de retenție /relaxare.

Recapitulând datele din literatura disponibilă referitoare la acest subcapitol, se poate concluziona că faza a patra, fiind o derivată a mai multor factori de influență (proprietățile fizico-chimice și granulația particulelor), este influențată de viteza de densificare și valoarea maximă a forțelor de presare. Anume în această fază, în mare măsură, se determină durabilitatea mecanică a particulelor și aspectul exterior al peleților. Aceste caracteristici ale peleților, în mare măsură, sunt rezultatul a două fenomene prezente în procesul de densificare și care, de fapt, vorbesc despre perfecțiunea procesului.

Primul fenomen se caracterizează de către gazele (aerul) remanente din porii materialului densificat, eliminarea cărora, în anumite faze ale formării structurii, provoacă formarea unor discontinuități care micșorează legăturile intermoleculare.

Al doilea fenomen este legat de tensiunile elastice remanente, care cauzează încovoierea peleților, apariția fisurilor interioare și exterioare, slăbirea forțelor intermoleculare etc.

## 2.2. Gradul de densificare și calitatea peleților

Cercetările ample realizate pe parcursul ultimelor ani au evaluat mecanismele peletizării particulelor de biomasă cu sau fără de pre-tratare în funcție de un șir de variabile [12, 18, 35, 36].

Astfel Bergström et al. [18], Kaliyan et al. [12], au studiat influența gradului de densificare a peleților asupra caracteristicilor fizice și mecanice ale produsului finit. Ei, experimental, au demonstrat că mărirea presiunii și temperaturi la densificarea particulelor are un efect benefic asupra durabilității peleților, datorită creșterii densității particulelor și rezistenței la comprimare a peleților.

Prezintă interes cunoașterea presiunii necesare pentru a obține peleți calitativi cu cheltuieli minime de energie. Valoarea presiunii este dependentă de mai mulți factori, printre care mai importanți sunt caracteristicile fizice și mecanice ale biomasei, umiditatea, temperatura și granulația materiei prime.

Există unele încercări de a calcula presiunea necesară peletizării. Astfel, forțele care acționează într-un canal a matriței de peletizare au fost analizate în detaliu de către Holm et al. [37]. Ei au propus următoarea formulă pentru determinarea forței de presare la peletizare pentru condiții constante:

$$P_x = \frac{P_{No}}{V_{LR}} (e^{4\mu v_{LR} c} - 1), \quad (1)$$

în care  $P_{No}$  este presiunea de precomprimare care include plasticitatea modelului;  $v_{LR}$  - raportul Poisson (indicele  $L$  denotă direcția tensiunilor exterioare:  $L$  = axe longitudinale a fibrelor, iar  $R$  - direcția deformațiilor transversale:  $R$  = axe radiale a fibrelor);  $\mu$  - coeficientul de frecare;  $c$  - raportul de compresie, definit ca raportul dintre lungimea peletului în matriță ( $x$ ) și diametrul ( $2r$ ):

$$c = \frac{x}{2r}, \quad (2)$$

Din ecuația (1) reiese că  $P_x$  crește exponențial cu lungimea peleților, păstrând ceilalți parametri constanți. Modelul propus poate fi folosit la determinarea aproximativă a presiunii necesare pentru peletizarea diferitor tipuri de biomasă, însă neajunsul acestui model este că el nu include un șir de parametri tehnologici cum sunt temperatura presării, proprietățile materialului.

Nielsen et al. [38 - 41] au studiat, în condiții de laborator, dependența proprietăților mecanice ale peleților și consumul de energie funcție de temperatură și conținutul de umiditate [41], orientarea fibrelor [39], conținutul de substanțe extractive [19] și timpul de depozitare [40].

La acest capitol este necesar să se adauge că presiunea exercitată de role este limitată de puterea și mărimea motorului folosit la granulatorele de peleți. Dacă forța axială  $P_x$  depășește puterea motorului, atunci, canalele matriței se vor bloca, deoarece rolele nu vor fi în măsură să asigure presiunea necesară pentru a împinge biomasa prin canalele matriței.

Din cele expuse se structurează importanța cunoașterii valorii optime a forței de presare, care poate fi stabilită pe cale experimentală și prin calcule teoretice reieșind din teoria rezistenței materialelor.

### 2.3. Rolul temperaturii la peletizarea biomasei

Temperatura necesară peletizării, în cea mai mare măsură, se formează în rezultatul proceselor tribologice care au loc în interiorul biomasei și la granița de contact dintre biomasa și pereții matriței. În unele cazuri, biomasa se încălzește suplimentar cu aburi sau prin alte metode pentru a asigura condiții mai bune de densificare. De regulă, în procesul de peletizare industrială, temperatura nu este un parametru controlabil, deși este estimată indirect fiind dependentă de natura, conținutul de umiditate și granulația materiei prime, viteza de rotație a tăvăluilor, valoarea interstițiului dintre tăvălugi și matriță.

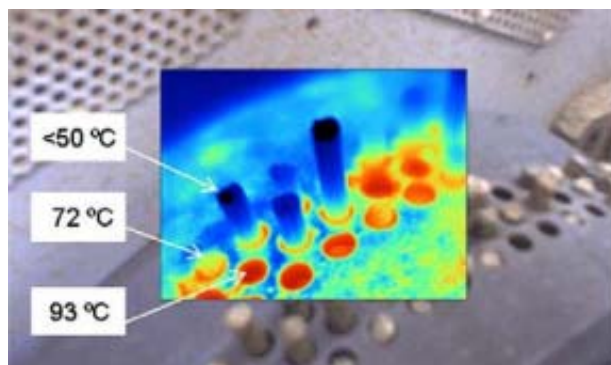
Referitor la dependența temperaturii din zona de lucru de natura materiei prime există păreri că temperatura este condiționată de conținutul de lignină, în special de blocul cristalin, care în biomasa vegetală variază în limitele 15 – 35 % [7 p. 28] și a cărei temperatură de topire constituie cca 90 °C [42].

Printre primele cercetări, referitoare la efectele temperaturii asupra densificării biomasei, se regăsesc cele efectuate de *Smith et al.* [78]. Ei au studiat dependența densității brichetelor din paie funcție de variația temperaturii aplicate în intervalul 60 – 140 °C. Cercetările au arătat că densitatea biomasei crește odată cu mărirea temperaturii până la valoarea de 90 °C, după care densitatea rămâne constantă.

*Ivin și Gluhovskij* [42], din contra, consideră că temperatura de 90 °C este temperatura minimă pe care o poate avea matrița, deoarece peleții formați la temperaturi mai mici de 90 °C, cu toate că sunt denși, nu sunt „lipiți” și, de regulă, formează fisuri la granițele particulelor biomasei. Totodată, ei au atenționat că în cazul formării peleților la temperaturi mai mari de 100 °C, dacă biomasa conține un procentaj mai mare de umiditate, aceasta trece în formă de abur care, prin explozii, formează

microcavități între moleculele de biomasă sau chiar le poate distruge.

*Serrano* și colab. [19], cu ajutorul termovizorului Fluke IR FlexCam T115, au studiat distribuția temperaturii în matriță, biomasă și produs. Au constatat că temperatura matriței, în cazul funcționării stabile, este de cca. 90 °C, iar a biomasei, doar de cca. 70 °C cunoscând o răcire rapidă după evacuarea din matriță (fig. 2).



**Figura 2.** Imaginea termografică a matriței [19]

Din analiza efectuată se poate concluziona că, la ziua de astăzi, nu există o abordare comună cu privire la temperatura optimă din zona de densificare a biomasei în procesul de fabricare a peleților de foc. Această situație, probabil, este condiționată de caracteristicile specifice pentru fiecare tip de biomasă, dar și de umiditatea și granulația materiei prime.

Din cele constatate în acest studiu se structurează următoarea ipoteză de lucru pentru viitoarele cercetări: calitatea peleților de foc produși din biomasă provenită din reziduuri agricole procesați prin metodele tradiționale nu asigură calitate impusă de cerințele standardelor ENPlus. Una din căile sigure a posibilității sporirii calității peleților produși din materie primă autohtonă este folosirea unor metode tehnologice de pre-tratare a biomasei pentru a micșora conținutul de materii extractive și a conținutului de hemiceluloză cu păstrare conținutului de lignină care are un procentaj mai mare de carbon.

## 3. CONCLUZII

1. În baza analizei datelor din literatura de specialitate și a experienței existente la noi în țară și pe plan mondial se constată că producerea peleților certificați ENPlus din reziduuri agricole, prin metode tradiționale, este foarte problematică în virtutea calității inferioare a materiei prime autohtone.

2. Au fost evidențiați principalii factori de influență a calității peleților de foc și au fost structurate căile posibile de mărire a calității acestora prin optimizarea variabilelor materiei prime și celor de fabricație.

3. În rezultatul analizei referitoare la dependența anumitor proprietăți fizico - mecanice ale peleților de conținutul de extractive, a fost înaintată ipoteza despre posibilitatea sporirii calității peleților obținuți din biomasă autohtonă prin diverse procedee care ar micșora conținutul de extractive din biomasa folosită în calitate de materie primă.

4. S-a argumentat că regimurile tehnologice, cum sunt forța și temperatura presări sunt individuale pentru diferite tipuri de materie primă, motiv pentru care sunt necesare cercetări experimentale în vederea optimizării acestor parametri pentru condiții concrete.

5. Din analiza efectuată se poate concluziona că, formarea legăturilor de coeziune și adeziune a particulelor este influențată de granulația particulelor și proprietățile fizico-chimice ale acestora, viteza de densificare și valoarea maximă a forțelor de presare.

### Bibliografie

1. **Marian Gr., Muntean A., Gudîma A., Pavlenco A.** Considerații referitoare la folosirea biomasei provenită de la cultivarea porumbului pentru obținerea biocombustibililor solizi. În: *Știința agricolă*, 2013, nr. 2, pp. 84-92.
2. **Marian Gr., Muntean A., Gudîma A., Pavlenco A.** Considerații cu privire la estimarea potențialului de biomasă pentru scopuri energetice rezultată din reziduuri agrosilvice. În: *Lucrări științifice UASM*. V. 38, 2013. pp. 66-70.
3. **Tulumaru J. S., Wright C. T., Kenney K. L. et al.** Review on biomass densification technologies for energy applications. În: *Technical Report INL/EXT-10e18420*, Idaho Falls, Idaho. 2010, 96 p.
4. **Marian G., Gudîma A., Muntean A. et al.** Pelete din paie, considerații pro și contra. *Lucrări științifice FIATA, UASM*, 2015, pp. 115 – 120.
5. **Niedziółka I., Szpryngiel M., Kachel-Jakubowska M. et al.** Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. În: *Renewable Energy*, V. 76, 2015, pp. 312-317.
6. **Golovach A. A.** Ispol'zovanie solomy dlya soxraneniya i povysheniya plodorodiya pochv. În: *Belorusskoe sel'skoe xozyajstvo*, № 7(87), 2009, c. 32-35.
7. **Marian Gr.** Biocombustibili solizi, producere și proprietăți. Chișinău, 2016, 172 p.
8. **Rhen C., Gref R., Sjostromb M., Wasterlund I.** Effects of raw material moisture content,

densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. În: *Fuel Processing Technology*, V. 87, 2005. pp. 11 – 16.

9. **Samuelsson R., Larsson S., Thyrel M., Lestander T. A.** Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. În: *Applied energy*, V. 99, 2012, pp. 109-115.

10. **Obernberger I., Thek G.** Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 27, 2004.

11. **Yancey N. A., Tumuluru J. S., Wright C. T.** Drying, grinding and pelletization studies on raw and formulated biomass feedstock's for bioenergy applications. În: *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, V. 7(5), 2013, pp. 549-558, pp. 653-669.

12. **Kaliyan N., Morey R. V.** Factors affecting strength and durability of densified biomass products. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 33. 2009, pp. 337-259.

13. **Li Y., Henry L.** High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 19, 2000, pp. 177-186.

14. **Obernberger I., Thek G.** Physical haracterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 27, 2004, pp. 653-669

14. **O'Dogherty M. J., Wheeler J. A.** Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies. În: *J. Agric. Eng. Res.*, V. 29, 1984, pp. 61-72.

15. **Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S.** Specific energy requirement for compacting corn stover. *Bioresource*. În: *Technology*, V. 97, 2006, pp. 1420-1426.

16. **Nguyen Q. N., Cloutier A. et al.** Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood pellets made from sugar maple particles. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 80, 2016, pp. 338 – 349.

17. **Rezaei H., Lima C. J., Lau, A. et al.** Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. În: *Powder Technology*, V. 301, 2016, pp. 737-746.

18. **Bergströma D., Israelssonb S., Öhmanc M. et al.** Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. În: *Fuel Processing Technology*, V. 89, 2008, pp. 1324-1329.

19. **Serrano C., Monedero E., Lapuerta M., Portero H.** Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. În: *Fuel Processing Technology*. V. 92, 2011, pp. 699-706.

20. **Garcha-Torrent J., Ramirez-Gymez A., Fernandez-Anez N. et al.** Influence of the composition of solid biomass in the flammability and susceptibility to spontaneous combustion. În: *Fuel*, V. 184, 2016, pp. 503 – 511.
21. **Marian Gr.** Managementul biomasei agrosilvice pentru scopuri energetice. Ch.: Iunie Prim, 264 p.
22. **Marian Gr., Soji Kurasawa, Muntean A., Gudima A., Druceoc S.** Estimarea capacității calorifice a biomasei lignocelulozice provenite din diferite zone ale Republicii Moldova în conceptul de producere de combustibili solizi. În: *Știința agricolă*, 2013, nr. 1, pp. 97-114.
23. **Marian Gr.** Considerații pro și contra privind utilizarea pentru scopuri energetice a biomasei derivată de la cultivarea cerealielor spicoase. În: *Știința agricolă*, 2014. Nr. 1, pp. 56-62.
24. **Niedziółka I., Szpryngiel M., Kachel-Jakubowska M. et al.** Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. În: *Renewable Energy*, V. 76, 2015, pp. 312-317.
25. **Miranda T., Montero I. et al.** Review of Pellets from Different Sources. În: *Materials*, V. 8, 2015, pp. 1413-1427.
26. **Torbjurn A., Lestander, M., Finell, R. et al.** Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems—the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. În: *Fuel Processing Technology*, V. 95, 2012, pp. 73–77.
27. **Back E. L.** Oxidative activation of wood surfaces for glue bonding. În: *Forest Products Journal*, V. 41(2). 1991, pp. 30-36.
28. **Stehr M., Johansson I.** Weak boundary layers on wood surfaces. În: *Journal of Adhesion Science and Technology*, V. 14:10, 2000, pp. 1211-1224.
29. **Stelte W., Holm J. K., Sanadi A. R. et al.** A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources, În: *Biomass and Bioenergy*, V. 35, 2011, pp. 910-918.
30. **Bradfield J., Levi M. P.** Effect of species and wood to bark ratio on pelleting of southern woods. În: *Forest Products Journal*, V. 34, 1984, pp. 61–63.
31. **Leuenberger H., Rohrer D.** Fundamentals of powder compression the compactibility and compressibility of pharmaceutical powders. În: *Pharmaceutical Research*. V. 3, 1986, pp. 12–22.
32. **Hiestand E. N.** Principles, tenets and notions of tablet bonding and measurements of strength. În: *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. V. 44, 1997, pp. 229–242.
33. **Mahmoodi, F.** Compression mechanics of powders and granular materials probed by force distributions and micromechanically based compaction equation. Uppsala, 2012, 58 p.
34. **Pietsch, W.** Agglomeration Processes Phenomena, Technologies, Equipmen. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002, 614 p.
35. **Lam, P. S., Lam, P. Y., Sokhansanj, S. et al.** Mechanical and compositional characteristics of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) during pelletization. În: *Biomass and Bioenergy*, V. 56, 2013, pp. 116–126.
36. **Tooyserkani, Z., Kumar, L., Sokhansanj, S. et al.** SO<sub>2</sub>-catalyzed steam pretreatment enhances the strength and stability of wood pellets. În: *Bioresour Technol*, V. 130, 2013, pp. 59–68.
37. **Holm J. K., Henriksen U. B., Hustad J. E., Sorensen L. H.** Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. În: *Energy Fuels* V. 20, 2006, pp. 2686-2694.
38. **Nielsen N., Peter K., Gardner D. J., Felby C.** Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. În: *Fuel*, V. 89(1), 2010, pp. 94–98.
39. **Nielsen N., Holm J. K., Felby C.** Effect of fiber orientation on compression and frictional properties of sawdust particles in fuel pellet production. În: *Energy Fuels*. V. 23, 2009, pp. 3211-3216.
40. **Nielsen N., Nørgaard L., Strobel B. W., Felby C.** Effect of storage on extractives from particle surfaces of softwood and hardwood raw material s for wood pellets. În: *Eur J Wood Prod*. V. 67, 2009, pp. 19-26.
41. **Nielsen N., Gardner D.J., Poulsen T., Felby C.** Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood into fuel pellets. În: *Wood Fiber Sci* V. 41, 2009, pp. 414-425.
42. **Ivin, E. L., Gluhovskij, V. M.** Granulirovanie drevesiny. În: *Bioenergetika*, nr. 2, 2007, p. 61.
43. **Smith, I. E., Probert, S. D., Stokes, R. E. et al.** Briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1977, 22, 105-111.

Recomandat spre publicare: 22.02.2017.