

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
CZU: 662.63(043)

BANARI ALEXANDRU

**PERFEȚIONAREA FLUXULUI DE PRODUCERE A
BIOCOMBUSTIBILILOR SOLIZI DIN REZIDUURI
VEGETALE POMI-VITICOLE**

**255.02. TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE PENTRU INDUSTRIA
PRODUSELOR AGRICOLE**

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

CHIȘINĂU, 2025

Teza a fost elaborată în cadrul Laboratorului Științific de Biocombustibili Solizi al
Universității Tehnice a Moldovei.

Conducător științific:

MARIAN Grigore, - profesor universitar, doctor habilitat, UTM.

Referenți oficiali:

ȚENU Ioan – academician, prof. univ., dr. inginer, UȘV din IAȘI;

CÂRLESCU Petru Marian – prof. univ., dr. inginer, UȘV din IAȘI.

Componenta consiliului științific specializat ad hoc:

DULGHERU Valeriu – prof. univ., dr. hab. UTM, **Președinte CȘS;**

NAZAR Boris – conf. univ., doctor în științe tehnice UTM, **Secretar științific CȘS;**

CEREMPEI Valerian – conf. univ., dr. hab. UTM, **membru CȘS;**

GUDÎMA Andrei – conf. univ., doctor în științe tehnice UTM, **membru CȘS;**

ROȘCA Gheorghe Radu – prof. univ., dr. inginer, UȘV din IAȘI, **membru CȘS;**

BEȘLEAGĂ Igor – conf. univ., doctor în științe tehnice UTM, **membru CȘS.**

Susținerea va avea loc la 26 iunie 2025, ora 14:00, în ședința Consiliului Științific Specializat
D 255.02-25-36 din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, MD-2049, Republica Moldova,
Chișinău, str. Mircești 56, Laboratorul de Mașini și Utilaje Horticole, sala IA-04.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe
pagina web ANACEC (<https://www.anacec.md/>; www.cnaa.md).

Rezumatul a fost expedit la 24 mai 2025.

Secretar științific
al Consiliului Științific Specializat,
conf. univ., doctor în științe tehnice

_____ NAZAR Boris

Conducător științific,
profesor universitar, doctor habilitat

_____ MARIAN Grigore

Autor

_____ BANARI Alexandru

© **BANARI Alexandru, 2025**

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	6
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	21
RECOMANDĂRI ȘI PERSPECTIVE	24
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	25
LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI	26
ADNOTARE.....	28
ANNOTATION	29
АННОТАЦИЯ.....	30

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei abordate derivă din necesitatea stringentă de a răspunde crizei energetice globale, agravate de creșterea populației, industrializare și supraexploatarea resurselor fosile. În acest context, valorificarea biomasei ca sursă regenerabilă, accesibilă și ecologică devine un imperativ al prezentului, contribuind la reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, combaterea schimbărilor climatice și tranziția către un sistem energetic durabil, sigur și rezilient.

Republica Moldova a implementat o serie de politici și strategii menite să încurajeze utilizarea surselor de energie regenerabilă, inclusiv a biomasei. Printre acestea se numără Strategia Energetică 2030 [1] și Strategia Energetică 2050 [2], care vizează consolidarea securității energetice, diversificarea surselor și reducerea dependenței de importuri. Aceste politici promovează o tranziție către un sistem energetic verde, contribuind totodată la combaterea schimbărilor climatice.

Integrarea biomasei vegetale disponibile local în circuitul bioenergetic, prin aplicarea unor tehnologii de prelucrare și densificare adaptate specificului regional, contribuie nu doar diversifică sursele de materie primă pentru bioenergie, ci și generează oportunități economice la nivel local. În același timp, valorificarea acestor resurse susține dezvoltarea unor lanțuri valorice scurte și sustenabile, în care deșeurile sunt transformate în resurse utile, contribuind la atingerea obiectivelor Pactului Verde European și la implementarea politicilor naționale privind tranziția energetică și gestionarea durabilă a deșeurilor.

Pe lângă biomasa vegetală utilizată în mod obișnuit pentru producerea biocombustibililor solizi, un rol important îl are și biomasa provenită din sectorul pomi-viticol. Valorificarea acestor reziduuri ca materie primă pentru producerea peletilor și brichetelor poate reduce semnificativ dependența de combustibilii fosili în anumite regiuni ale țării, sprijinind totodată tranziția către un model economic circular, mai sustenabil în sectorul agroalimentar [3].

Pentru ca producerea de biocombustibili solizi să fie sustenabilă, materia primă trebuie să fie disponibilă la nivel local, ușor de colectat, transportat și depozitat. În acest context, biomasa pomi-viticolă are un potențial considerabil, în special în țări cu profil agricol, precum Republica Moldova, care își acoperă aproximativ 70% din necesarul energetic prin importuri.

Reziduurile agricole generate de întreținerea livezilor și viței-de-vie, frecvent eliminate prin ardere sau abandon, pot fi valorificate energetic prin aplicarea unui flux tehnologic eficient tehnic și economic de producere a biocombustibililor solizi densificați, contribuind astfel la eficientizarea utilizării resurselor locale și la reducerea dependenței energetice [4].

Un flux tehnologic eficient presupune utilizarea unor tehnologii moderne, capabile să asigure o condiționare adecvată a materiei prime — din punct de vedere al temperaturii, umidității și granulației [5,6] — precum și o reglare optimă a parametrilor de densificare [7], astfel încât produsul finit să corespundă cerințelor impuse de standardele internaționale, precum SM EN ISO 17225 și ENplus [8].

În acest context favorabil la nivel global, marcat de necesitatea stringentă de asigurare a independenței energetice și de protejare a mediului înconjurător, prezenta

teză își propune să investigheze și să optimizeze procesul tehnologic de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale provenite din sectorul pomi-viticol. Demersul se concentrează pe perfecționarea etapelor-cheie ale procesului, în vederea obținerii unui produs final de calitate superioară, cu eficiență energetică ridicată și competitiv pe piața surselor de energie regenerabilă.

Scopul lucrării este perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole.

Obiectivele studiului sunt axate pe următoarele aspecte cheie:

1. Analiza contextului actual și problemele din domeniul fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole;
2. Stabilirea potențialului de biomasă vegetală pomi-viticolă pretabilă pentru producerea biocombustibililor solizi densificați în condițiile Republicii Moldova;
3. Determinarea potențialului energetic al biomasei vegetale pomi-viticolă generate de diferite specii de pomi fructiferi, arbuști fructiferi și vița-de-vie;
4. Optimizarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi densificați din biomasă vegetală pomi-viticolă;
5. Analiza impactul diferitelor metode de procesare asupra caracteristicilor finale ale produsului, cu scopul de a stabili cele mai eficiente tehnici de producție adaptate la specificul biomasei pomi-viticole.

Obiectul cercetărilor este biomasa provenită din activitățile pomi-viticole și biocombustibilii solizi densificați (BCSD) din această biomasă.

Ipoteza de cercetare propusă se axează pe analiza obiectului de studiu și presupune că perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole îmbunătățește calitatea produsului finit și constituie o sursă fezabilă de materie primă pentru producerea de peleți și brichete cu caracteristici apropiate de cele cerute de către normele familiei de standarde SM EN ISO 17225- 6 și 7:2021

Prin intermediul acestei cercetări, se urmărește nu doar optimizarea procesului de producție, ci și oferirea unor soluții practice și scalabile pentru industrie, cu potențial de aplicare largă în sectorul energetic din Republica Moldova. Rezultatele obținute vor contribui la dezvoltarea durabilă a sectorului de biocombustibili, generând beneficii economice și ecologice semnificative pentru comunitățile locale și pentru întreaga economie națională.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese. Structura investigațiilor derivă dintr-un studiu aprofundat efectuat în Laboratorul Științific de Biocombustibili Solizi al UTM acreditat MOLDAC. Cercetările de laborator au fost realizate în conformitate cu un algoritm alcătuit din patru etape distincte. Toate analizele de laborator s-au efectuat prin metode și echipamente validate în conformitate cu cerințele standardului (SM EN ISO/IEC 17025:2018, 2018).

Fiecare test a fost realizat în cinci repetiții pentru a asigura acuratețea măsurărilor. La final, au fost calculate deviația standard și intervalul de încredere pentru rezultatele obținute în fiecare serie de teste, corespunzătoare diferitelor tipuri de biomasă vegetală, precum și produselor finite și amestecurilor de biomasă analizate.

Inovația științifică. Lucrarea se distinge prin accentul deosebit pus pe valorificarea biomasei provenite din reziduuri vegetale pomi-viticole, ca materie primă pentru obținerea biocombustibililor solizi densificați, presupune următoarele:

- examinarea stadiului curent referitor la contextul actual și problemele din domeniul fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole;
- elaborarea metodologiei de cercetare cu elaborarea unei instalații de laborator pentru monitorizarea regimurilor tehnologice de densificare a biocombustibililor solizi;
- obținerea de date noi referitoare la disponibilitatea biomasei pomi-viticole pentru producerea BCSD în Republica Moldova și potențialul energetic al acesteia;
- dezvoltarea unui model al unui flux de producere a BCSD în baza rezultatelor obținute în acest studiu.

Implementarea rezultatelor științifice s-a realizat în condiții de producție prin fabricarea peletilor și brichetelor la SRL „STAR TECH” din satul Cîrpești, raionul Cantemir și SRL „ECO NUTS ENERGY” adresa Ialoveni, str. Păcii 12, Republica Moldova.

Aprobarea rezultatelor științifice. Rezultatele științifice obținute au fost prezentate și discutate la simpozioane, conferințe naționale și internaționale. Aspectele teoretice și practice au fost expuse și aprobate în cadrul sesiunilor extinse ale Laboratorului Științific de Biocombustibili Solizi (în 2021, 2022 și 2023); Seminarul teoretico-practic cu participare internațională *„Realizări și perspective în folosirea biomasei vegetale indigene în scopuri energetice”* din 19 mai 2022, UASM; Conferința științifică cu participare internațională dedicată închiderii proiectului transfrontalier 2 SOFT 1.2/44 din 4-5 noiembrie 2022; Simpozionul Științific Internațional *„Sectorul agroalimentar - realizări și perspective”* din 11-12 noiembrie 2022, UTM; Euroinvent *European Exhibition of creativity and innovation* 17 edition, 8-10 mai 2025 Iași, Romania.

Aspectele teoretice și aplicative au fost prezentate și aprobate în cadrul ședinței largite a Laboratorului Științific de Biocombustibili Solizi UTM din 12.11.2024 și în cadrul ședinței Seminarului Științific de Profil (SSP) ad-hoc al Universității Tehnice a Moldovei la data 21.03.2025.

Publicații la tema tezei. Rezultatele cercetărilor sunt publicate în 15 lucrări științifice, inclusiv: 1 articol în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS, cu Impact Factor; 3 articole în reviste din străinătate recunoscute; 1 articol într-o revistă inclusă în Registrul Național al revistelor de profil, categoria B+; 1 articol într-o revistă din Registrul Național al revistelor de profil, categoria B; 2 articole în volumele conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova); 2 articole în volumele conferințelor științifice naționale cu participare internațională; 4 articole în teze în culegeri științifice. De asemenea, autorul este coautor al unui brevet de invenție de scurtă durată, intitulat *„Dispozitiv pentru studierea procesului de densificare a biomasei vegetale în formă de brichete”*.

CONȚINUTUL TEZEI

Introducerea expune actualitatea și relevanța temei cercetate, evidențiază scopul și obiectivele tezei de doctorat, formulează ipoteza de cercetare și oferă o sinteză a metodologiei aplicate. Totodată, sunt prezentate elementele de noutate științifică,

precum și modalitățile de implementare a rezultatelor obținute. În final, este oferită o prezentare succintă a capitolelor care alcătuiesc structura tezei.

Capitolul I **„Contextul actual și problemele din domeniul fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole”**, prezintă documentarea și analiza literaturii de specialitate privind biocombustibilii solizi densificați din biomasă agricolă și pomi-viticolă, având ca scop stabilirea stadiului actual al cercetărilor și sintetizarea rezultatelor anterioare. Se detaliază *utilizarea* surselor bibliografice din baze de date științifice și repoziitoare cu acces deschis, precum și analiza datelor recente.

Al doilea subcapitol discută despre importanța și utilizarea reziduurilor vegetale pomi-viticole pentru producerea biocombustibililor solizi densificați, în contextul tranziției către o economie circulară și a tranziției energetice. Se detaliază rolul lanțului de aprovizionare cu biocombustibili solizi în sectorul pomi-viticol al Republicii Moldova, subliniind etapele esențiale precum colectarea, pretratarea și distribuirea materiilor prime. De asemenea, se evidențiază importanța biocombustibililor solizi în contextul energiilor regenerabile, rolul acestora în reducerea dependenței de combustibili fosili și în diminuarea emisiilor de CO₂. Sunt prezentate tendințele globale și evoluțiile pieței de biocombustibili solizi, subliniind impactul creșterii cererii pentru surse de energie ecologice și sustenabile. În plus, se discută evoluția producției de brichete și peleți în Republica Moldova, evidențiind creșterea semnificativă a producției în perioada 2019-2023 și importanța acestei industrii în contextul tranziției energetice și gestionării deșeurilor agricole.

Al treilea subcapitol explorează potențialul biomasei pomi-viticole pentru producerea biocombustibililor solizi, având în vedere influența zonelor climatice distincte ale Republicii Moldova asupra disponibilității biomasei și dinamica sectorului pomi-viticol.

Al patrulea subcapitol analizează importanța calității biocombustibililor solizi densificați, din biomasă vegetală, și face referire la familia de standarde SM EN ISO 17225, care reglementează această calitate. Aceste standarde sunt esențiale pentru asigurarea unei producții eficiente și sustenabile, având un impact semnificativ asupra dezvoltării pieței de biocombustibili și pentru protejarea mediului.

Se subliniază că biocombustibilii solizi sunt fabricați dintr-o varietate de materii prime vegetale, ale căror proprietăți, împreună cu procesele tehnologice aplicate, influențează direct calitatea produsului finit. De asemenea, este evidențiată importanța respectării cerințelor de calitate pentru obținerea unei eficiențe energetice sporite, protejarea mediului și reducerea costurilor de întreținere a echipamentelor. În acest context, implementarea standardelor SM EN ISO 17225 sprijină producătorii în accesarea piețelor internaționale, extinderea bazei de clienți și creșterea competitivității. Scopul declarat al subcapitolului este evaluarea calității și a potențialului biomasei provenite din reziduuri pomi-viticole indigene, în contextul reglementărilor naționale aplicabile în Republica Moldova.

Ultimul subcapitol analizează practicile actuale și perspectivele privind valorificarea reziduurilor vegetale din plantațiile pomicole, arbuști fructiferi și vița de vie pentru producerea de biocombustibili solizi densificați, precum peleții și brichetele. Aceste reziduuri, rezultate în urma lucrărilor agricole (tăieri de formare, întreținere,

recoltare sau defrișare), constituie o sursă importantă și durabilă de biomasă, cu un potențial energetic semnificativ, dar variabil în funcție de specie, soi, condiții agroclimatice și tehnologiile aplicate.

Se evidențiază necesitatea cunoașterii detaliate a caracteristicilor cantitative și calitative ale acestor reziduuri, pentru a optimiza procesele tehnologice și economice de conversie energetică, precum și pentru a diversifica sursele de biomasă în funcție de specificul fiecărei plantații.

Capitolul 2 **„Disponibilitatea biomasei pomi-viticole la producerea biocombustibililor solizi densificați în condițiile Republicii Moldova”** prezintă metodologia utilizată pentru identificarea și evaluarea reziduurilor vegetale din sectorul pomi-viticol, cu scopul valorificării acestora ca biocombustibili solizi. Studiul a inclus observații în teren, interviuri cu proprietari de plantații și analiza datelor statistice. Eșantioanele au fost colectate din parcele reprezentative situate în mai multe regiuni ale Republicii Moldova, pe parcursul perioadei 2020–2024.

Selectarea pomilor s-a realizat prin metoda sferturilor, iar numărul reprezentativ de eșantioane a fost calculat statistic. Biomasă a fost mărunțită, cântărită și analizată atât în teren, cât și în Laboratorul Științific pentru Biocombustibili Solizi al UTM, unde s-au determinat proprietăți esențiale precum umiditatea, valoarea calorifică, conținutul de cenușă și compoziția chimică, conform standardelor SM EN ISO 17025:2018.

Au fost analizate probe provenite de la peste 20 de soiuri de pomi fructiferi din grupa sămânțoaselor, 27 de soiuri din grupa sămburoaselor, 15 soiuri de nuciferi, 24 de soiuri de arbuști fructiferi și peste 30 de soiuri de viță-de-vie, oferind o bază solidă pentru estimarea potențialului energetic al acestor resurse.

Subcapitolele oferă o imagine detaliată asupra potențialului biomasei rezultate din întreținerea plantațiilor pomicole din Republica Moldova pentru producerea biocombustibililor solizi densificați, precum brichetele și peleții. Analiza este organizată pe principalele grupe pomicole – sămânțoase, sămburoase și nucifere – și evidențiază atât cantitatea, cât și calitatea biomasei rezultate în urma lucrărilor anuale de întreținere.

S-a demonstrat că grupa sămânțoaselor (măr, păr, gutui) oferă o cantitate moderată de biomasă. Astfel, cantitatea de biomasă, estimată pentru conținutul de umiditate de 10% ($m_{b\ M=10\%}$), pentru: măr cu valori calorifice nete, calculate pentru conținutul de umiditate de 10% ($q_{Pnet\ M=10\%}$) de cca. 15,5 MJ/kg. Biomasă acestor specii de pomi are un conținut relativ ridicat de cenușă (cca. 3,3%), ceea ce o face mai potrivită pentru producerea peleților din clasa inferioară sau pentru formarea amestecurilor cu alte tipuri de biomasă cu calități superioare.

Grupa sămburoaselor (prun, cireș, vișin, cais, piersic) se caracterizează printr-o diversitate mai mare a parametrilor cantitativi și calitativi. Astfel, piersicul produce cea mai mare cantitate de biomasă ($m_{b\ M=10\%} = 2,91 \pm 0,56$ t/ha), în timp ce caisul generează cantitatea cea mai redusă ($m_{b\ M=10\%} = 1,50 \pm 0,13$ t/ha). Prunul se remarcă prin cea mai înaltă putere calorifică ($q_{Pnet\ M=10\%} = 16,2$ MJ/kg), susținută de un conținut mai ridicat de lignină ($24,26 \pm 1,25\%$), ceea ce îi conferă o utilizare mai eficientă la producerea BCSD.

Nuciferele (nuc, alun, migdal) oferă atât biomasă lemnoasă, cât și endocarp cu potențial energetic ridicat. Alunul are cea mai mare producție lemnoasă ($m_{b\ M=10\%} = 2,20 \pm 0,07$ t/ha), iar endocarpul de migdal se distinge prin umiditate redusă și putere

calorifică superioară, ideală pentru ardere directă. Crengile de nuc prezintă un conținut ridicat de cenușă, ceea ce limitează utilizarea lor în anumite produse.

Date privind calitatea biomasei provenite din arbuști fructiferi (mur, zmeur, cătină albă, măceș, coacăz, agriș, afin) și vița-de-vie arată variații semnificative în producție și caracteristici energetice. Murul și zmeurul prezintă cele mai mari cantități de biomasă (respectiv $4,12 \pm 0,23$ t/ha și $3,2 \pm 0,3$), iar cătina albă posedă cea mai mare putere de ardere ($q_{Pnet\ M=10\%} = 17,15 \pm 0,02$ MJ/kg). Vița-de-vie, comparând soiurile tehnice și de masă, arată valori calorifice similare ($\sim 15,5$ MJ/kg) și un conținut de carbon de circa 47%, cu un impact redus asupra mediului datorită nivelurilor scăzute de azot, sulf și clor.

Capitolul III „**Potențialul energetic al biomasei pomi-viticole disponibile pentru producerea biocombustibililor solizi**” debutează cu metodologia propusă pentru determinarea potențialului energetic, care presupune estimarea acestuia prin 3 tipuri de potențial: teoretic, disponibil și sustenabil de implementare.

Potențialul energetic teoretic (PET) reprezintă cantitatea totală de energie conținută în biomasa generată, fără a lua în considerare factorii limitativi. Această estimare se bazează pe volumul integral al biomasei rezultate din activitățile agricole și se calculează utilizând puterea calorifică a biomasei, presupunând valorificarea completă a acesteia. Pentru 1 hectar de plantații de pomi-viticole, potențialul energetic teoretic a fost calculat utilizând următoarea ecuație:

$$PET = \sum m_{b\ M=10\%} \cdot q_{Pnet\ M=10\%}, \quad (1)$$

în care $m_{b\ M=10\%}$ este cantitatea medie de biomasă convertită pentru conținutul de umiditate egal cu 10% colectată de pe o suprafață concretă de plantații; $q_{Pnet\ M=10\%}$ - valoarea calorifică netă a biomasei cu conținutul de umiditate egal cu 10% calculată pentru presiune constantă.

Potențialul *energetic disponibil* (PED) reprezintă o parte redusă din potențialul energetic teoretic, fiind limitat de factori precum utilizarea biomasei în alte scopuri decât cele energetice, eficiența procesului tehnologic și alte constrângeri [9]. Determinarea PED s-a realizat cu considerarea unui coeficient de disponibilitate (A_i) care s-a stabilit conform recomandărilor din literatura de specialitate. De exemplu, pentru pomii fructiferi, valoarea coeficientului A_i a fost acceptată ca fiind 0,8 [10–12].

$$PED = PET \cdot A_i. \quad (2)$$

Potențialul energetic sustenabil de implementare (PESI) constituie fracțiunea din potențialul energetic disponibil care poate fi utilizată profitabil, ținând cont de costurile asociate cu colectarea, procesarea și utilizarea biomasei, precum și de factori tehnici și de sustenabilitate. Valoarea SEPI este influențată de aspecte economice, tehnologice și politice [13,14], incluzând pierderile legate de transport, depozitare etc. [11]. De exemplu, dacă costurile de recoltare și procesare depășesc valoarea energiei obținute, biomasa respectivă nu va fi considerată parte a potențialului economic.

Potențialul energetic sustenabil de implementare s-a calculat folosind următoarea ecuație:

$$PESI = PED \cdot (1 - k_{il}), \quad (3)$$

în care k_{il} - este coeficientul pierderilor de implementare.

În continuare se prezintă rezultatele estimării potențialului energetic al biomasei generate de diferite specii de pomi fructiferi, incluzând parametrii cantitativi ai biomasei, valoarea calorică, precum și estimările teoretice și sustenabile ale energiei disponibile (vezi tabelul 1). În studiu au fost folosite datele experimentale prezentate în capitolul 2.

Tabelul 1. Potențialul energetic al reziduurilor de pomi fructiferi

Parametri		Sămânțoase			Sâmburoase				
		Măr	Păr	Gutui	Prun	Cireș	Vișin	Cais	Piersic
$m_{b\ M=10\%,\ \text{kg/ha}}$	m	2639	2620	1338	1981	1566	1854	1504	2909
	σ	456	212	215	246	798	289	130	564
$q_{Pnet\ M=10\%,\ \text{MJ/kg}}$	m	15,615	15,579	15,372	16,211	15,784	15,578	15,873	15,995
	σ	0,365	0,414	0,416	0,539	0,506	0,449	0,396	0,36
A_i		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
k_{il}		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
PET, GJ/ha		41,21	40,91	20,90	30,93	24,46	28,95	23,49	46,53
up, GJ/ha		7,19	3,49	3,40	3,99	12,49	4,59	2,12	9,08
PED, GJ/ha		32,97	32,73	16,72	24,75	19,57	23,16	18,79	37,22
up, GJ/ha		5,75	2,79	2,72	3,19	9,99	3,67	1,69	7,27
PESI, GJ/ha		29,67	29,45	15,05	22,27	17,61	20,84	16,91	33,50
up, GJ/ha		5,17	2,51	2,45	2,87	8,99	3,30	1,52	6,54

Notă: k_{il} - coeficientul pierderilor de implementare, egal cu 0,1; up - incertitudinea predictivă; m - valoarea medie, σ - abaterea standard.

S-a constatat că reziduurile de piersic, măr și păr au cel mai ridicat potențial energetic real și sunt cele mai potrivite specii pentru valorificare energetică dintre reziduurile pomicole. Astfel, energia care poate fi obținută în condiții reale de exploatare, luând în calcul eficiența proceselor tehnologice și sustenabilitatea recoltării biomasei, este estimată pentru piersic la $33,50 \pm 6,54$ GJ/ha, pentru măr $29,67 \pm 5,17$ GJ/ha și pentru păr $29,45 \pm 2,51$ GJ/ha.

Tabelul 2. Potențialul energetic al biomasei generate de nuciferi

Origine biomasă		$m_{b\ M=10\%,\ \text{kg/ha}}$	σ	$q_{Pnet\ M=10\%,\ \text{MJ/kg}}$	A_i	k_{il}	PET, GJ/ha	up, GJ/ha	PED, GJ/ha	up, GJ/ha	PESI, GJ/ha	up, GJ/ha
Nuc	BL	1180,1	165,9	15,5	0,9	0,1	18,29	2,58	16,46	2,32	14,82	2,09
	BE	1124,0	136,6	16,6	0,9	0,1	18,66	2,27	16,79	2,04	15,11	1,84
Alun	BL	1691,6	356,6	15,8	0,9	0,1	26,73	5,64	24,05	5,07	21,65	4,57
	BE	1203,9	72,7	16,8	0,9	0,1	20,23	1,23	18,20	1,11	16,38	1,00
Migdal	BL	1362,5	149,9	16,0	0,9	0,1	21,80	2,40	19,62	2,16	17,66	1,95
	BE	1614,0	209,4	16,4	0,9	0,1	26,47	3,44	23,82	3,10	21,44	2,79

Notă: BL - biomasa lemnoasă BE - biomasa endocarp.

Datele din tabelul 2 oferă o perspectivă cuprinzătoare asupra potențialului energetic al biomasei pentru nuc, alun și migdal, diferențiate pe două componente principale: biomasa lemnoasă și biomasa endocarp. Analiza acestor date evidențiază diferențele semnificative dintre biomasa lemnoasă și endocarp în funcție de cantitatea de biomasa, valoarea calorică și potențialul energetic teoretic, disponibil și sustenabil de implementare.

Cea mai mare valoare de PET se înregistrează pentru biomasa lemnoasă de alun ($26,73 \pm 5,64$ GJ/ha), urmată de migdal ($21,80 \pm 2,40$ GJ/ha) și nuc ($18,29 \pm 2,58$ GJ/ha). Aceasta indică o capacitate energetică superioară a alunului datorită masei mai mari de biomasa generată pe hectar ($1691,6 \pm 356$) kg/ha și a valorii calorifice ridicate.

Referitor la biomasa de endocarp, se constată că cel mai mare PET posedă cea de migdal ($26,47 \pm 3,44$ GJ/ha), urmată de cea de alun ($20,23 \pm 1,23$ GJ/ha). Cel mai mic PET generează endocarpul de nuc ($18,29 \pm 1,23$ GJ/ha).

Chiar și după aplicarea pierderilor tehnologice și a constrângerilor de exploatare, ordinea valorică a potențialului energetic disponibil s-a menținut – alunul rămânând în top, urmat de migdal și nuc. Acest lucru sugerează o eficiență de procesare relativ constantă, ceea ce întărește atractivitatea acestor specii pentru utilizări energetice.

Privind din perspectiva sustenabilității, care integrează factori ecologici, economici și tehnologici, reziduurile de migdal au oferit cel mai mare potențial energetic sustenabil – 39,10 GJ/ha, urmate îndeaproape de alun (38,03 GJ/ha) și nuc (29,93 GJ/ha). Astfel, migdalul și alunul se conturează ca alegeri strategice pentru dezvoltarea lanțurilor locale de producere a biocombustibililor solizi.

Deși, nucul are un potențial mai redus, biomasa sa – în special endocarpul – nu trebuie ignorată. Cu o putere calorică semnificativă, endocarpul de nuc poate fi utilizat direct în centrale termice moderne, fără a necesita prelucrare sub formă de brichete sau peleți, ceea ce reduce costurile și simplifică logistica.

Informațiile prezentate în tabelul 3 oferă o imagine detaliată cu privire la potențialul energetic al biomasei vegetale generate de șase specii de arbuști fructiferi, care sunt cultivate în diferite zone ale Republicii Moldova: zmeur, mur, agriș, coacăz, afin și cătină albă.

Tabelul 3. Potențialul energetic al reziduurilor de arbuști fructiferi

Parametri		Zmeur	Mur	Agriș	Coacăz	Afin	Cătină albă
$m_{b\ M=10\%, \text{ kg/ha}}$	m	3209	4124	752	1197	2081	3039
	σ	297	227	84	87	207	99
$q_{Pnet\ M=10\%, \text{ MJ/kg}}$	m	15,61	14,95	15,86	15,89	15,76	17,14
	σ	0,19	0,21	0,03	0,01	0,18	0,02
A_i		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k_{il}		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
PET, GJ/ha		50,11	61,66	11,93	19,02	32,80	52,10
up , GJ/ha		4,68	3,50	1,33	1,37	3,28	1,69
PED, GJ/ha		45,10	55,49	10,74	17,12	29,52	46,89
up , GJ/ha		4,21	3,15	1,19	1,24	2,95	1,52
PESI, GJ/ha		40,59	49,94	9,67	15,40	26,57	42,20
up , GJ/ha		3,79	2,83	1,07	1,11	2,66	1,37

Rezultatele obținute ne permite să facem următoarele interpretări și recomandări:

- *Murul, cățina albă și zmeurul* reprezintă cele mai promițătoare resurse pentru producerea de biocombustibili solizi datorită randamentului energetic ridicat.

- *Afinul, agrișul și coacăzul*, având un potențial mai scăzut, ar putea fi combinate cu alte resurse vegetale care posedă o valoare calorică mai mare.

- Factorii precum umiditatea, costurile logistice și compatibilitatea tehnologică trebuie luați în considerare pentru optimizarea procesului de valorificare a biomasei.

- Analiza efectuată poate servi un sprijin în luarea unor decizii informate pentru valorificarea sustenabilă a biomasei nuciferelor, contribuind la diversificarea și consolidarea sectorului bioenergetic în Republica Moldova

În etapa următoare, cercetările s-au concentrat pe evaluarea potențialului energetic al biomasei obținute din vița-de-vie. Rezultatele prezentate în Tabelul 4 indică faptul că această biomasă vegetală are un potențial energetic comparabil cu alte surse utilizate în producerea biocombustibililor solizi. Valorile medii ale PESI au fost de $16,73 \pm 1,36$ MJ/kg pentru ansamblul soiurilor analizate, cu o medie de $15,94 \pm 0,97$ MJ/kg pentru soiurile tehnice și $17,51 \pm 0,96$ MJ/kg pentru soiurile de masă.

Disponibilitatea constantă a biomasei rezultate din tăierile anuale ale viței-de-vie și valorile ridicate ale PESI demonstrează că aceste reziduuri reprezintă o sursă regenerabilă și relativ stabilă de materie primă. Din cantitatea de biomasă recoltată de pe un hectar de plantație pot fi obținute aproximativ 1–1,2 tone de peleți sau brichete de calitate Premium.

Tabelul 4. Potențialul energetic al biomasei vegetale generate de vița-de-vie

Origine biomasă	$m_b M=10\%$, kg/ha	σ	$Q_{Pnet} M=10\%$, MJ/kg	σ	A_i	k_{il}	PET, GJ/ha	u_p , GJ/ha	PED, GJ/ha	u_p , GJ/ha	PESI, GJ/ha	u_p , GJ/ha
Soiuri tehnice	1121	68	17,56	0,12	0,9	0,1	19,68	1,20	17,72	1,08	15,94	0,97
Soiuri de masă	1238	67	17,50	0,10	0,9	0,1	21,62	1,18	19,45	1,06	17,51	0,96
Media	1180	-	17,51	-	0,9	0,1	20,65	-	18,59	-	16,73	-
Incertitudine extinsă	-	95	-	0,16	-	-	-	1,68	-	1,52	-	1,36

Pe baza acestor constatări, se poate concluziona că reziduurile de viță-de-vie reprezintă o materie primă viabilă pentru producerea biocombustibililor solizi densificați (BCSD), datorită potențialului energetic ridicat și caracteristicilor calitative conforme sau apropiate cerințelor prevăzute în standardul SM EN ISO 17225. Totuși, pentru a exclude sau minimiza factorii de risc asociați produsului finit, sunt necesare teste suplimentare detaliate.

De asemenea, se impun cercetări privind influența calității materiei prime — obținută din diverse amestecuri de biomasă vegetală disponibilă local — asupra calității biocombustibililor solizi densificați obținuți, în vederea optimizării procesului tehnologic și asigurării conformității cu standardele de performanță.

În acest context la formarea amestecurilor din reziduuri pomi-viticole este necesar să ne raportăm la cerințele impuse de către SM EN ISO 17225-6 pentru peleți

și SM EN ISO 17225-7 pentru brichete, care stabilesc specificații tehnice pentru biocombustibili solizi densificați proveniți din blenduri și mixturi. Respectarea acestor standarde asigură obținerea unui produs cu proprietăți constante, compatibil atât cu cerințele pieței, cât și cu caracteristicile echipamentelor de ardere.

În cadrul acestui studiu, obiectivul principal al formării amestecurilor este obținerea unor peleți clasa A și a unor brichete de cel puțin clasa A2. Criteriile de optimizare urmăresc atingerea următorilor parametri: valoare calorifică minimă de 14,5 MJ/kg, conținut de cenușă de maximum 6%, conținut al fracției fine de cel mult 3% (aplicabil doar pentru peleți), rezistență mecanică de minimum 96% (pentru peleți), densitate în vrac de minimum 600 kg/m³ (pentru peleți) și densitate a particulelor de minimum 0,9 g/cm³.

La formarea amestecurilor, în calitate de componente de adaos, au fost utilizate paie de cereale și reziduurile de floarea-soarelui. Aceste reziduuri agricole ocupă un loc aparte datorită volumului ridicat și a disponibilității lor în aproape toate regiunile Republicii Moldova. Totuși, conform analizelor anterioare realizate de Gudîma, Pavlenko și Daraduda, aceste tipuri de biomasă prezintă și unele dezavantaje, precum un conținut ridicat de cenușă și o putere calorifică relativ scăzută [12].

Pornind de la aceste constatări, au fost studiate și testate probe sub formă de brichete, obținute din diverse amestecuri compuse din reziduuri agricole arboricole (RAA) în combinație cu reziduuri de floarea-soarelui provenite din recoltarea producției de bază (RF-S). Pentru a compara efectele obținute, au fost analizate în paralel și amestecuri pe bază de paie de grâu (PG).

În total, au fost investigate 10 probe de amestecuri, având proporții masice variate ale componentelor, inclusiv formele individuale ale acestora. Probele în formă de brichete de tip „Nestro”, au fost obținute cu ajutorul prese hidraulice „Brikles” din dotarea Laboratorului Științific de Biocombustibili Solizi, utilizându-se un plan experimental polifactorial cu trei factori de influență.

Rezultatele obținute au permis elaborarea unor diagrame ternare (figurile 1-3), care evidențiază variațiile indicatorilor calitativi pentru probele sub formă de brichete, în funcție de compoziția amestecurilor studiate.

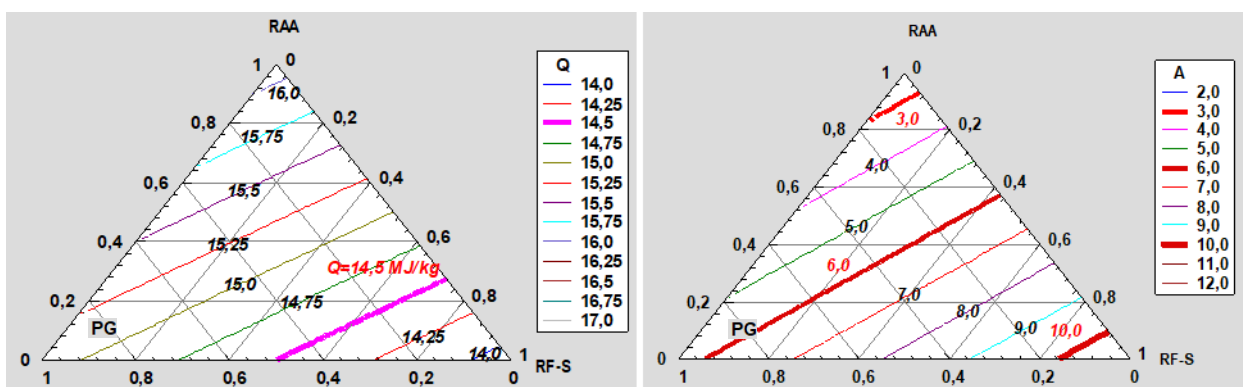


Figura 1. Modificarea valorii calorifice (Q, MJ/kg) și a conținutului de cenușă (A, %) a probelor de brichete „Nestro” în funcție de constituția amestecului: reziduuri arboricole de pomi fructiferi (RAA), paie de grâu (PG) și reziduuri de floarea soarelui (RF-S)

Având în vedere că standardul SM EN ISO 17225-7:2021 recomandă pentru brichetele de clasa A o valoare calorifică de cel puțin 14,5 MJ/kg, din figura 1 constatăm că brichetele din RAA în stare individuală respectă această cerință, în timp ce cele produse din RF-S și din PG, analizate separat, prezintă o valoare calorifică mai mică de 14,5 MJ/kg (zona din dreapta liniei roșii din planul de răspuns).

Din analiza rezultatelor, reiese că amestecurile de RAA + cel mult 70% de RF-S asigură o valoare calorifică $\geq 14,5$ MJ/kg. Aceeași tendință se observă și în cazul amestecurilor RAA + PG.

Este important de menționat că pot fi utilizate și amestecuri ternare (RAA + RF-S + PG), însă proporția cumulată de RF-S și PG nu trebuie să depășească 30% pentru a se menține valoarea calorifică minimă impusă de standard. Aceste concluzii se referă exclusiv la valoarea calorifică a amestecurilor.

Dacă analizăm rezultatele obținute referitoare la influența constituției amestecurilor asupra conținutului de cenușă, atunci constatăm că, la fabricarea brichetelor de clasa A1, cantitatea de RF-S sau de PG nu trebuie să depășească 7-8%, iar pentru clasa A2 (se admite 6% cenușă) putem utiliza cca. 40 de RF-S, pe când PG pot fi folosite până la 90%.

Analiza evoluției densității particulelor brichetelor în dependență de procentajul componentelor amestecurilor studiate (Figura 2) arată că RAA măresc densitatea particulelor, pe când RF-S și PG reduce acest parametru. Totuși, un adaos de până la cca. 70% RF-S în combinație cu RAA permite obținerea unor brichete cu o densitate a particulelor $DE \geq 0,9$ g/cm³. De asemenea, se constată că PG influențează mai accentuat densitatea particulelor brichetelor și pot fi adăugate până la 50% în amestecuri din RAA + PG. Diagrama ne oferă oportunități pentru a stabili și alte proporții, în funcție de materia primă disponibilă și de cerințele de calitate înaintate produsului finit.

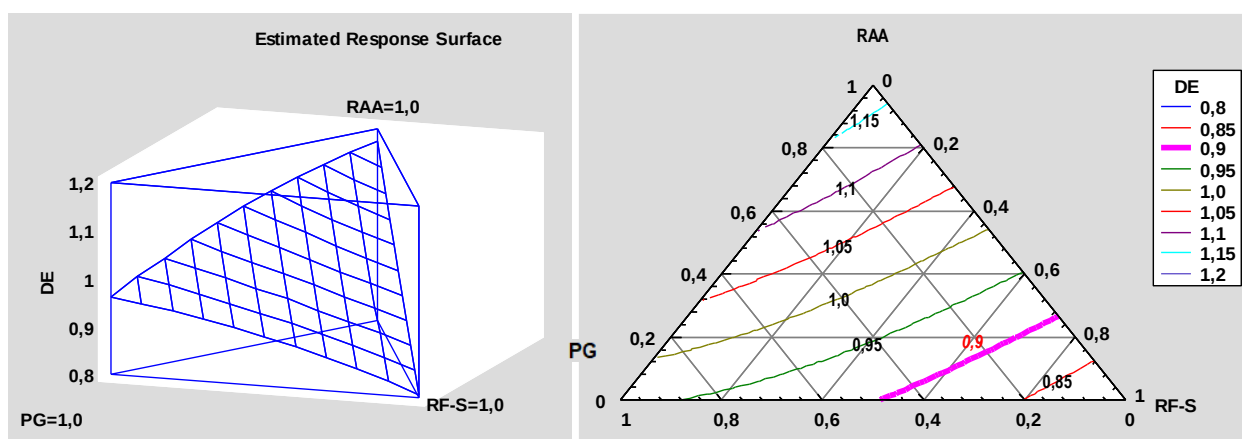


Figura 2. Dependența valorii densității particulelor (DE, g/cm³) a probelor de brichete „Nestro” funcție de constituția amestecului: reziduuri arboricole de pomi fructiferi (RA), paie de grâu (PG) și reziduuri de floarea soarelui (RFS)

Posibilitatea folosirii reziduurilor de nuciferi în calitatea de materie primă a fost studiată prin testarea probelor de peleți produși din amestecuri din reziduuri în formă de endocarp (RNEC) + reziduuri de nuc în formă de ramuri (RNR) combinate cu paie

de grâu (PG). Necesitatea formării acestor amestecuri vine din interesul pentru majorarea capacității de densificare a endocarpului, care prezintă un material valoros datorită valorii calorifice ridicate și conținutului de cenușă redus.

Analiza comparativă a datelor obținute (Figura 3) în raport cu cerințele de calitate specificate în standardul SM EN ISO 17225 evidențiază că, indiferent de compoziția amestecurilor, acestea asigură respectarea valorii calorifice și a conținutului de cenușă impuse pentru peleții produși din amestecuri, conform prevederilor standardului SM EN ISO 17225-6:2021.

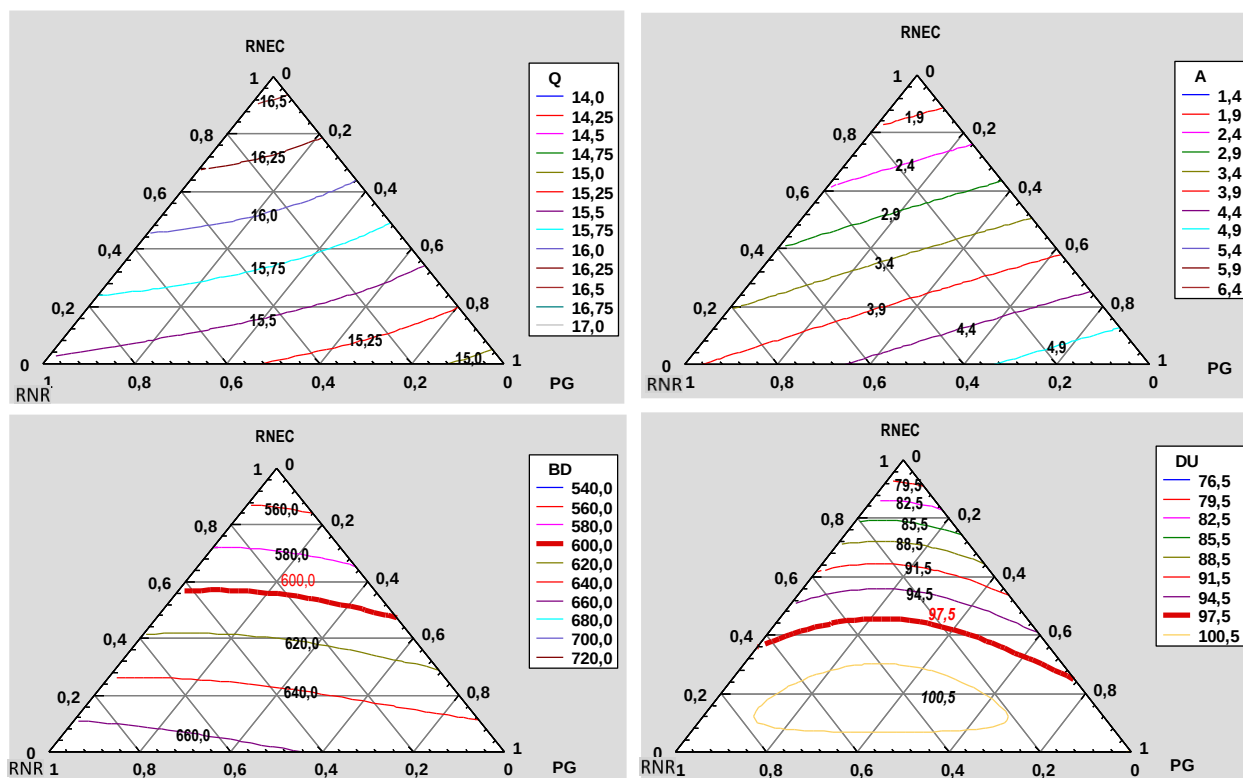


Figura 3. Modificarea valorii calorifice (Q, MJ/kg) și a conținutului de cenușă (A, %) peleților produși din amestecuri de reziduuri nucifere de endocarp (RNEC) + reziduuri nucifere în formă de ramuri (RNR) + paie de grâu (PG)

Rezultatele obținute în cadrul acestui studiu indică faptul că utilizarea amestecurilor de biomasă provenită din reziduuri nucifere, în combinație cu paie de grâu, ca materie primă pentru producerea peleților, permite obținerea unui produs finit de calitate superioară. Pentru a atinge aceste performanțe, este esențială selectarea adecvată a compoziției amestecurilor, proces care poate fi realizat cu succes prin utilizarea diagramei ternare elaborate în cadrul acestui studiu.

Prezintă interes practic și științific posibilitatea folosirii în calitate de materie primă a mixturilor și amestecurilor de biomasă vegetală generată de arbuștii fructiferi. Cercetările anterioare, realizate de către noi, au demonstrat eficiența folosirii diferitor amestecuri pe bază de reziduuri vegetale de cătină albă, reziduuri vegetale de mur și paie de grâu [15].

În acest studiu s-a examinat posibilitatea folosirii reziduurilor de arbuști fructiferi, care au marcat cele mai favorabile caracteristici în calitate de materie primă

la producerea BCSD în formă de peleți. În calitate de componente pentru formarea amestecurilor de materie primă au fost folosite reziduuri vegetale de cătină albă (RVCA), reziduuri vegetale de mur (RVM) și paie de grâu (PG). Cercetările s-au realizat prin analiza probelor în formă de peleți cu folosirea unui plan polifactorial alcătuit din 10 variante de amestecuri. Pentru fiecare amestec au fost analizate valoarea calorică estimată la umiditatea de 10%, conținutul de cenușă în bază uscată, densitatea în vrac și rezistența mecanică.

În urma prelucrării statistice a rezultatelor obținute au fost construite următoarele ecuații de regresie:

$$Q = 16,7662 \cdot RVCA + 15,0176 \cdot RVM + 14,5462 \cdot PG - 1,33607 \cdot RVCA \cdot RVM - 0,545357 \cdot RVCA \cdot PG + 0,103927 \cdot RVM \cdot PG + 6,32293 \cdot RVCA \cdot RVM \cdot PG, \quad (1)$$

$$A = 2,51729 \cdot RVCA + 2,53329 \cdot RVM + 7,43586 \cdot PG + 0,657007 \cdot RVCA \cdot RVM + 1,29022 \cdot RVCA \cdot PG + 0,939223 \cdot RVM \cdot PG, \quad (2)$$

$$BD = 642,754 \cdot RVCA + 564,754 \cdot RVM + 621,497 \cdot PG + 6,94357 \cdot RVCA \cdot RVM - 245,828 \cdot RVCA \cdot PG + 115,972 \cdot RVM \cdot PG, \quad (3)$$

$$DU = 98,8172 \cdot RVCA + 98,9353 \cdot RVM + 95,4577 \cdot PG - 4,50373 \cdot RVCA \cdot RVM + 5,35256 \cdot RVCA \cdot PG - 0,347017 \cdot RVM \cdot PG, \quad (4)$$

$$F = 0,358572 \cdot RVCA + 0,3 \cdot RVM + 2,19143 \cdot PG + 0,0932125 \cdot RVCA \cdot RVM - 4,0725 \cdot RVCA \cdot PG - 1,75821 \cdot RVM \cdot PG + 75,5327 \cdot RVCA \cdot PG \cdot PG. \quad (5)$$

În care: Q este valoarea calorică estimată la umiditatea de 10%, MJ/kg; A - conținutul de cenușă în bază uscată, %; BD - densitatea în vrac, kg/m³; DU - durabilitatea mecanică, %.

Înlocuind în aceste ecuații proporțiile constituenților amestecurilor utilizate în calitate de materie primă, putem cu ușurință determina caracteristicile interesate a produsului finit. Se constată că toate probele luate în studiu au înregistrat o valoare calorică mai mare de 14,5 MJ/kg. Aceasta înseamnă că orice proporție a componentelor utilizate în formarea amestecurilor asigură obținerea unor peleți care respectă cerința de valoare calorică impusă de standardul SM EN ISO 17225-6:2021. Aceeași situație este valabilă și în cazul conținutului de cenușă, toate probele având un conținut sub 6%.

Celelalte caracteristici pot fi asigurate doar prin formarea amestecurilor cu anumit procentaj al constituenților. De exemplu, densitatea în vrac, cu valori mai mari de 600 kg/m³, în cazul când în amestec nu sunt incluse PG, poate fi asigurată dacă conținutul de RVM nu depășește 40%. Dacă amestecul este format din PG și din RVCA, o densitate în vrac mai mare de 600 kg/m³, practic este asigurată de toate probele studiate, cu excepția celor situate între liniile marcate cu roșu având valori mai mici de 600 kg/m³[16].

Capitolul IV „**Perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole**” În cadrul capitolului este prezentat parcursul experimental al cercetărilor desfășurate pentru perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din biomasă vegetală provenită din culturile pomi-viticole. Activitatea a inclus analiza a 30 de probe, reprezentând atât brichete, cât și peleți, obținuți din amestecuri variate de reziduuri vegetale și procesați în condiții tehnologice diverse.

Pentru studiul procesului de densificare, a fost utilizată o instalație de laborator originală, concepută pentru a simula condițiile reale de compactare. Aceasta a permis

monitorizarea în timp real a temperaturii și a forței de presare, oferind informații esențiale privind influența regimurilor tehnologice asupra calității brichetelor. Cu ajutorul acestei instalații, au fost identificate combinațiile optime de temperatură și presiune, necesare pentru obținerea unui produs final stabil, rezistent și eficient energetic.

În paralel, a fost investigat procesul de torefiere aplicat peleților. Experimentele s-au desfășurat într-un cuptor cu atmosferă inertă (argon), în cadrul unui plan experimental polifactorial. Cei doi factori variați – temperatura și durata expunerii – au fost analizați pentru a determina condițiile care îmbunătățesc caracteristicile energetice ale biocombustibililor.

Toate aceste investigații au avut un obiectiv comun: identificarea celor mai eficiente combinații tehnologice pentru dezvoltarea unui flux de producere optimizat, capabil să genereze biocombustibili solizi performanți, sustenabili și adaptați cerințelor actuale ale industriei.

În subcapitolul 4.2 este abordată perfecționarea lanțului de aprovizionare cu biocombustibili solizi (BCSD) obținuți din biomasă vegetală pomi-viticole, cu accent pe sustenabilitate și optimizarea fluxurilor de producție. Realizarea obiectivelor privind energia regenerabilă din biomasă este condiționată de buna funcționare a întregului lanț tehnologic, de la colectarea și pregătirea materiei prime până la livrarea și utilizarea combustibilului solid.

Activitățile care alcătuiesc acest lanț tehnologic sunt reglementate prin standarde internaționale, elaborate în scopul asigurării unor parametri calitativi constanți ai produsului finit. Conform literaturii de specialitate, calitatea peleților și a brichetelor este influențată de proprietățile biomasei utilizate, de rețetele de amestec adoptate, precum și de regimurile de procesare aplicate – în special umiditatea, temperatura și presiunea în timpul etapelor de densificare. De asemenea, literatura subliniază importanța factorilor economici, ecologici și strategici în configurarea unui lanț de producție eficient și sustenabil [13].

Figura 4 prezintă schema fluxului tehnologic de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri agricole, cu evidențierea verigilor tehnologice relevante pentru lanțurile de aprovizionare specifice biomasei pomi-viticole din Republica Moldova.

Cercetările desfășurate în cadrul acestui studiu propun o analiză detaliată a etapelor-cheie ale fluxului tehnologic, vizând evaluarea verigilor esențiale, precum: disponibilitatea resurselor locale, planificarea procesului de producție și identificarea traseului tehnologic optim pentru valorificarea biomasei.

În cadrul subcapitolului 4.3 este analizat modul în care calitatea biocombustibililor solizi densificați, obținuți din reziduuri vegetale pomi-viticole, poate fi îmbunătățită prin optimizarea tehnologică a fluxului de producere, cu aplicabilitate practică asupra fabricării brichetelor.

Toate tipurile de reziduuri vegetale dețin un anumit potențial energetic; însă, eficiența conversiei acestora în biocombustibili solizi depinde în mare măsură de procesul de densificare. Densificarea contribuie la creșterea valorii biomasei prin majorarea densității energetice, facilitând totodată transportul și depozitarea. Cu toate acestea, procesul implică unele provocări, cum ar fi durabilitatea mecanică redusă, densitatea în vrac scăzută, conținutul ridicat de cenușă sau variațiile valorii calorifice. Optimizarea parametrilor tehnologici reprezintă o cale sigură pentru reducerea acestor neajunsuri, sau chiar pentru eliminarea lor.

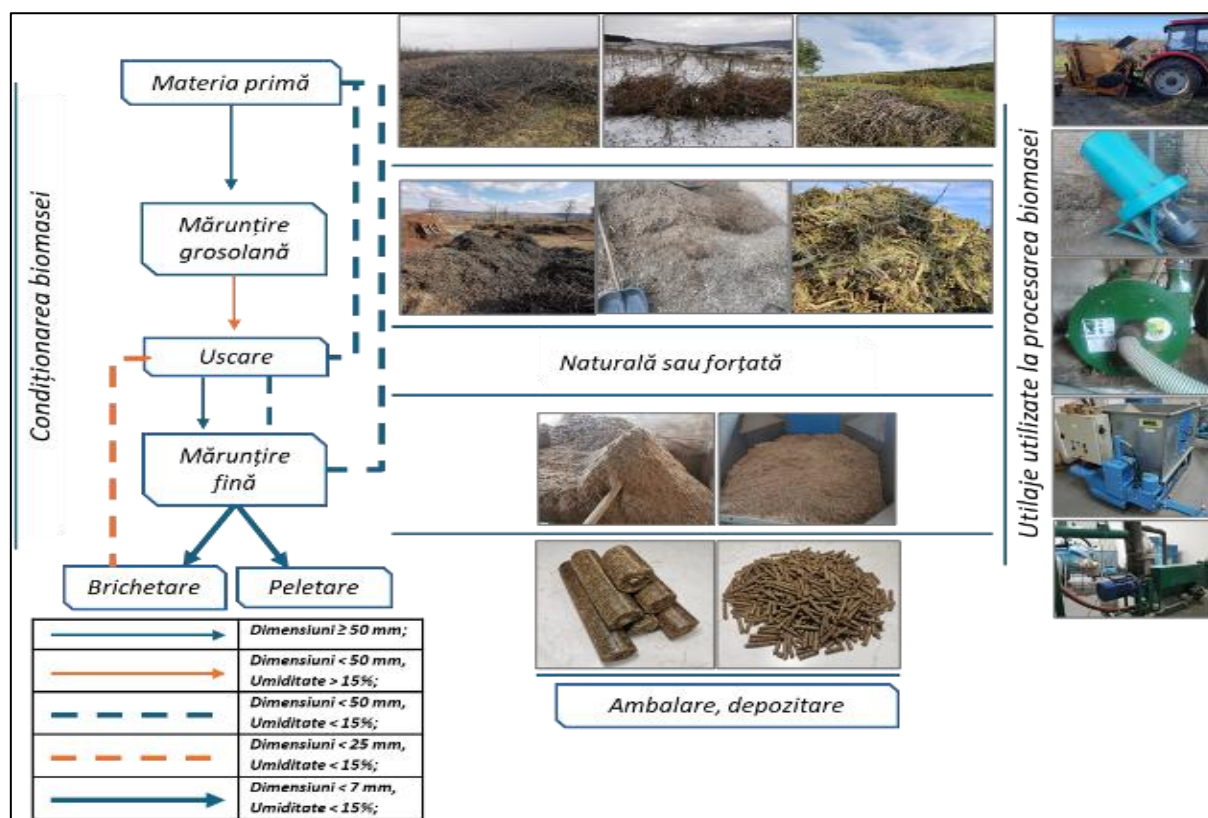


Figura 4. Schema fluxului de producție cu BCSD din reziduuri pomi-viticole

În general, procesul de densificare este influențat de două categorii principale de factori:

1. Factori legați de materia primă: tipul biomasei, compoziția chimică, granulația, conținutul de umiditate inițial și gradul de contaminare;
2. Factori tehnologici: presiunea aplicată în timpul densificării, temperatura de procesare, timpul de menținere sub presiune, viteza de alimentare a materiei prime și utilizarea eventuală a aditivilor sau lianților.

Influența stării materiei prime asupra calității BCSD a fost analizată prin prisma studiului influenței granulației și a conținutului de umiditate asupra densității particulelor brichetelor produse din produse din biomasă vegetală pomicolă.

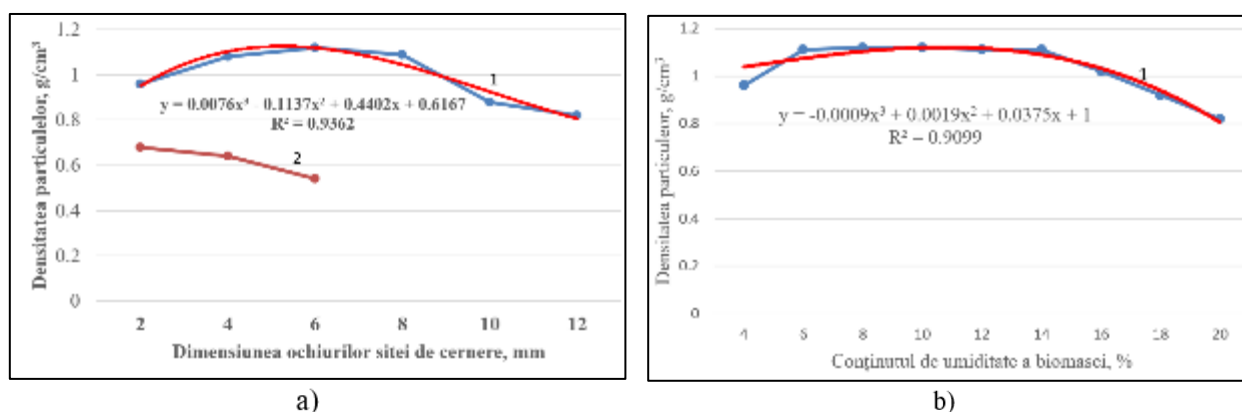


Figura 5. Influența granulației și umidității materiei prime asupra densității particulelor brichetelor produse din biomasă vegetală pomicolă: 1 – probe din reziduuri arboricole din pomi fructiferi; 2 – probe din endocarp pe nucleu

Rezultatele cercetărilor au arătat că granulația optimă pentru densificarea biomasei vegetale din reziduuri arboricole pomicole variază între 4 și 8 mm, iar conținutul de umiditate poate fi stabilit în limitele 6-14% (vezi Figura 5). În cazul densificării endocarpului de nucă, densificarea acestuia a fost posibilă doar dacă dimensiunile particulelor nu depășeau 6 mm. Umiditatea optimă (6–14%) asigură o bună coeziune între particule, prevenind formarea fisurilor în timpul presării. Pentru endocarpul de nucă, s-a observat că particulele trebuie să fie sub 6 mm pentru a permite densificarea eficientă.

Rezultatele obținute s-au confirmat și în cazul producerii brichetelor din alte tipuri de biomasă, precum culturi energetice, dar și pentru peleții fabricați din diverse reziduuri pomi-viticele.

Influența factorilor tehnologici asupra calității BCSD a fost examinată prin analiza influenței temperaturii matriței asupra calității brichetelor din biomasă vegetală pomi-vitică.

Rezultatele obținute pot fi vizualizate în figura 6, care scot în evidență că, atât pentru densitatea particulelor, cât și pentru durabilitatea mecanică există o zonă de confort, în cadrul căreia parametrii măsurați se stabilizează, având valori destul de apropiate. Această zonă începe cu cca. 60 °C până la 180 °C.

La temperaturi mai mici de 60 °C transformările fazice ale ligninei nu au loc și această încă nu devine suficient de amorfă pentru a putea mări legăturile de adeziune între particule.

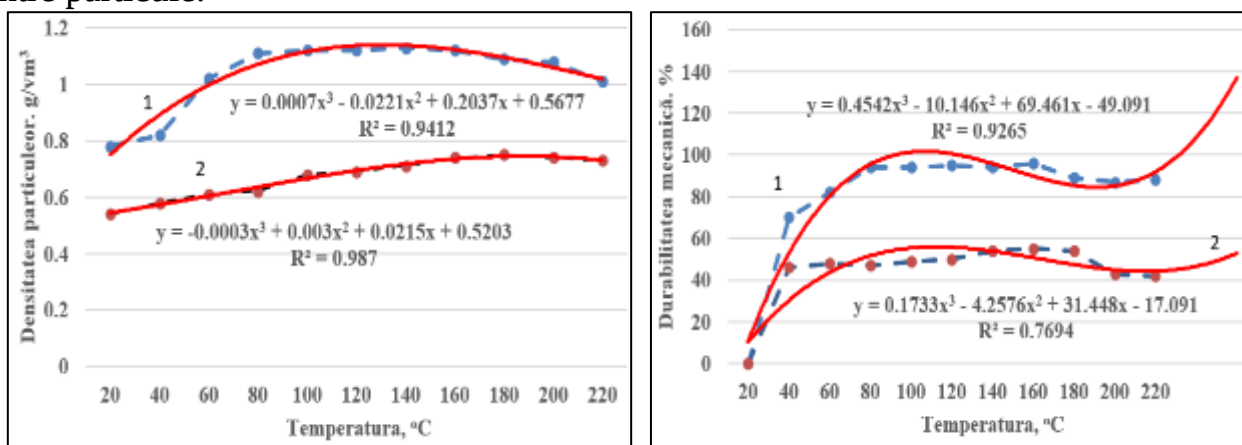


Figura 6. Influența temperaturii densificării asupra densității particulelor și durabilității mecanice a brichetelor

Urmărirea termografică a modificării temperaturii matriței de la presa „Brikles” din dotarea LȘBCS UTM la producerea brichetelor din reziduuri arboricole de pomi fructiferi a demonstrat că stabilizarea producerii brichetelor cu caracteristici constante începe la temperatura matriței egală cu 69°C.

Îmbunătățirea calității BCSD din biomasă vegetală pomi-vitică poate fi realizată și prin diferite procedee tehnologice suplimentare. Printre aceste un loc aparte revine tratărilor termochimice. Subcapitolul 4.4 analizează efectul tratării termochimice prin torefiere asupra biocombustibililor solizi densificați obținuți din biomasă pomi-vitică, printr-un studiu de caz aplicat peleților din amestecuri cu reziduuri de cătină albă.

Studiul evaluează influența temperaturii și a duratei de torefiere asupra valorii calorifice și a conținutului de cenușă al peleților obținuți din două tipuri de amestecuri:

1. 30% reziduuri de cătină albă + 70% reziduuri de mur (RVCA+RVM);

2. 30% reziduuri de cătină albă + 70% paie de grâu (RVCA+PG).

În urma prelucrării statistice a datelor experimentale obținute în acest studiu avem următoarele ecuații de regresie, care exprimă în mod adecvat dependența factorilor examinați de regimurile torefierii:

$$Q = 6,46167 + 0,0471T + 0,359583DE - 0,000052T^2 - 0,000135T \cdot DE - 0,00535DE^2, \quad (5)$$

$$A = 0,67333 + 0,0108T + 0,052833DE - 0,00002T^2 + 0,00002T \cdot DE - 0,00105DE^2. \quad (6)$$

În care: Q este valoarea calorifică netă, raportată la o umiditate de 10%, în MJ/kg; A – conținutul de cenușă rezultat în urma arderii probelor, %; T – temperatura de torefiere, °C; DE – durata expunerii, min.

Analiza acestor ecuații permite înțelegerea fenomenelor fizico-chimice care au loc pe parcursul torefierii peleților examinați. Astfel, analiza ecuației 5 arată că atât creșterea temperaturii de torefiere, cât și durata expunerii determină o creștere a valorii calorifice nete. În același timp, termenii de ordinul doi ai ecuației sugerează o relație neliniară, indicând că, la temperaturi și durate foarte mari, valoarea calorifică începe să scadă.

Interacțiunea dintre temperatură și durata expunerii arată că efectele combinate ale acestora nu sunt pur aditive, ceea ce înseamnă că, în anumite condiții, pot influența negativ eficiența procesului.

Analiza ecuațiilor din punct de vedere al dinamicii procesului constată că valoarea calorifică începe să crească încă din prima fază a experimentului. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că, în intervalul de temperaturi 200-250 °C, hemiceluloza începe să se degradeze, eliminând compuși volatili și îmbunătățind raportul carbon/hidrogen.

În intervalul 250-300 °C, celuloza suferă piroliză parțială, ceea ce duce la o reducere a masei și la formarea unor structuri mai carbonizate. Lignina, datorită stabilității sale termice, suferă o degradare mai lentă, contribuind astfel la creșterea valorii calorifice. Cu toate acestea, la temperaturi ce depășesc 300°C, are loc o pierdere excesivă de masă, ceea ce determină o reducere a valorii calorice. Când temperatura și durata de expunere sunt prea mari, pierderile de masă sunt amplificate de eliberarea gazelor combustibile (CO, CH₄, H₂), ceea ce afectează negativ eficiența energetică a produsului final. Acest fenomen este reflectat de termenii negativi de ordinul doi ai ecuației de regresie.

Este de menționat că creșterea temperaturii torefierii și a duratei de expunere determină o creștere lentă a conținutului de cenușă (vezi ecuația 6), ceea ce indică pierderi de masă organică. Termenii de ordinul doi arată că, după un anumit prag, creșterea temperaturii și a duratei poate încetini acumularea de cenușă.

Interacțiunea dintre temperatură și durata expunerii este nesemnificativă, ceea ce sugerează că aceste două variabile au un efect aproape independent asupra conținutului de cenușă. Creșterea conținutului de cenușă poate fi explicată prin faptul că, pe măsură ce temperatura crește, compușii organici volatili sunt eliberați, iar biomasa devine mai bogată în carbon fix și cenușă. La temperaturi mai mari și durate lungi, pierderile de materie organică accentuează raportul dintre cenușă și masa totală.

Termenii de ordin superior negativi sugerează că, după un anumit prag, creșterea temperaturii nu mai determină o creștere semnificativă a conținutului de cenușă, deoarece componentele minerale ajung la o stare stabilă.

Cercetări similare s-au realizat și pentru cazul torefierii peleților din obținuți din RVCA + PG, în funcție de temperatura de torefiere (T) și durata expunerii (DE). Ecuațiile de regresie care descriu aceste dependențe sunt:

$$Q = 4,53333 + 0,05187T + 0,34767DE - 0,00006T^2 - 0,00014T \cdot DE - 0,0054DE^2, \quad (7)$$

$$A = 4,45278 + 0,0112T + 0,05458DE - 0,00002T^2 + 0,00002T \cdot DE - 0,00107DE^2. \quad (8)$$

Coeficienții pozitivi ai termenilor liniari ai ecuațiilor de regresie (7) și (8) indică faptul că atât creșterea temperaturii, cât și a duratei expunerii contribuie la creșterea inițială a valorii calorifice și a conținutului de cenușă. În același timp, coeficienții negativi din ecuația (4.3) sugerează o relație neliniară, indicând că, după o anumită valoare, creșterea temperaturii și a duratei începe să aibă un efect negativ asupra valorii calorifice. De asemenea, se constată că, după un anumit prag, efectul creșterii temperaturii și duratei asupra conținutului de cenușă devine mai puțin pronunțat, aspect confirmat de coeficienții negativi ai termenilor de ordin superior.

Se observă, de asemenea, o influență aproape independentă a celor doi parametri asupra valorii calorifice și a conținutului de cenușă, iar o creștere simultană a acestora poate reduce nesemnificativ eficiența procesului.

Analiza ecuațiilor 5 ... 8 evidențiază o similitudine ridicată între dinamica torefierii peleților din RVCA+RVM și cea a peleților din RVCA+PG, având la bază procese termice similare. Totuși, trebuie menționat că tofiera amestecurilor care conțin paie de grâu determină o creștere semnificativă a conținutului de cenușă, ajungând la valori de peste 7,14% pentru regimurile care asigură cea mai mare valoare calorifică a peleților.

De menționat că standardul SM EN ISO 17225-6:2021 atribuie acestui tip de peleți clasa B, care permite un conținut de cenușă de până la 10%. Pentru a putea clasifica peleții în categoria A, este necesară creșterea proporției de RVCA sau utilizarea altor tipuri de reziduuri, reducând în același timp procentul de PG.

Ultimul subcapitol al lucrării analizează interconectarea aspectelor tehnice, economice și de sustenabilitate privind producerea biocombustibililor solizi densificați (BCSD) din reziduuri pomi-viticole. Utilizarea acestor reziduuri contribuie la reducerea deșeurilor arse necontrolat, combaterea schimbărilor climatice și diminuarea emisiilor față de combustibilii fosili. În Republica Moldova, conceptul economiei circulare este tot mai prezent în discuțiile privind sustenabilitatea.

În urma analizării și sintetizării datelor prezentate în ultimul capitol, a fost posibilă optimizarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi densificați, prin stabilirea regimurilor tehnologice adecvate și evidențierea posibilității de selectare a tipului de materie primă disponibilă. Informațiile obținute pot fi valorificate de către producătorii de biocombustibili solizi, în vederea maximizării calității produselor obținute din reziduuri provenite de la arbuști fructiferi.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Cercetarea a confirmat ipoteza conform căreia perfecționarea fluxului tehnologic permite obținerea de brichete și peleți din reziduuri pomi-viticole cu proprietăți conforme cerințelor de calitate prevăzute de standardele în vigoare. Rezultatele obținute au furnizat date noi privind potențialul energetic al biomasei indigene și au contribuit la optimizarea etapelor din lanțul de producție și aprovizionare cu biocombustibili densificați. Contribuțiile personale ale autorului sunt în concordanță cu scopul și obiectivele tezei și sunt prezentate în detaliu atât în lucrare, cât și în publicațiile asociate.

1. În realizarea primului obiectiv, care vizează analiza stadiului actual al cercetărilor în domeniul tezei de doctorat, a fost efectuată o examinare aprofundată a

literaturii de specialitate, cu accent pe studiile referitoare la fluxul tehnologic de producere a biocombustibililor solizi din biomasă, în special din reziduuri pomi-viticole. Compararea acestor date cu rezultatele experimentale obținute în cadrul Laboratorului Științific de Biocombustibili Solizi al UTM a evidențiat necesitatea optimizării întregului lanț de aprovizionare cu biocombustibili solizi, în vederea susținerii tranziției către o economie circulară. Această concluzie se bazează pe potențialul energetic al resurselor locale de biomasă, dar și pe identificarea principalelor direcții de valorificare superioară a acestora. Argumentele sunt prezentate în secțiunile 1.2–1.5 ale tezei de doctorat și au fost publicate parțial în [5,15].

2. În cadrul studiului privind disponibilitatea biomasei pomi-viticole în Republica Moldova pentru producerea biocombustibililor solizi densificați, au fost caracterizate cantitativ și calitativ probe de biomasă colectate în perioada 2020–2024 din diverse zone de dezvoltare economică ale țării. În total, au fost analizate mostre provenite de la 20 de soiuri de pomi fructiferi din grupa sămânțoaselor, 27 de soiuri din grupa sămburoaselor, 15 soiuri de nuciferi, 24 de soiuri de arbuști fructiferi și peste 30 de soiuri de viță-de-vie. Concluziile formulate sunt fundamentate pe analiza prezentată în capitolul 2, secțiunea 2.1, și completate de datele incluse în secțiunea 1.5 a tezei, unele dintre acestea fiind publicate parțial în [17,18].

3. Pe baza testărilor de laborator, s-a constatat că majoritatea reziduurilor vegetale provenite de la pomii fructiferi și vița-de-vie sunt adecvate pentru producerea de brichete și peleți, datorită valorii calorifice favorabile și altor proprietăți relevante. Acestea pot corespunde claselor de calitate A1, A2 și B pentru brichete, respectiv claselor A și B pentru peleți, conform cerințelor specificate în standardele SM EN ISO 17225-6 și 17225-7:2021. Totuși, utilizarea directă a acestor reziduuri este uneori limitată de conținutul ridicat de cenușă, care, în cazul anumitor soiuri, depășește pragul de 3%. În aceste condiții, biomasa respectivă este recomandată fie pentru producerea brichetelor din lemn din clasa B (cu respectarea cerințelor privind valoarea calorifică și conținutul de cenușă), fie pentru utilizarea în amestecuri cu alte tipuri de biomasă vegetală, în vederea îmbunătățirii calității produsului final. Rezultatele care susțin această concluzie sunt prezentate în tabelele 2.2–2.5, 2.10 și 2.11 ale tezei și au fost publicate parțial în [5,18].

4. Reziduurile provenite de la nuciferi sub formă de endocarp pot fi procesate direct, fără a necesita o condiționare prealabilă prin uscare, datorită conținutului de umiditate care variază de la 10,9% la alun până la 12,7% la migdal. Reziduurile lemnoase nucifere sunt potrivite doar pentru producerea peleților și brichetelor din categoria produselor din biomasă non-lemnoasă, blenduri și mixturi de biomasă, încadrându-se în categoria A pentru peleți și A2 pentru brichete. Crengile de alun și migdal pot fi folosite ca materie primă pentru producerea brichetelor din categoria brichete din lemn clasa A2. Concluzia se bazează pe datele obținute în cap.2, p. 2.23 și prezentate în tabelele 2.6 – 2.8 ale tezei de doctorat, care sunt publicate în [19].

5. Biomasa vegetală provenită de la arbuștii fructiferi posedă un potențial semnificativ, cea mai mare cantitate de reziduuri fiind generată de plantațiile de mur (4124 ± 227 kg/ha), urmate de cele de zmeur (3209 ± 227 kg/ha) și cătină albă (3039 ± 99 kg/ha). Totuși, practic toate reziduurile vegetale de arbuști fructiferi, cu excepția celor de cătină albă, au caracteristici care nu permit utilizarea lor directă pentru producerea BCSD. În această situație, având în vedere cantitatea mare a acestora, este oportună

utilizarea lor ca componente în diferite amestecuri de materie primă. Rezultatele în bază cărora a fost formulată această concluzie sunt prezentate în cap. 2, p. 2.24, fig. 2.8 și tab. 2.9 din teza de doctorat și publicate în [20].

6. Au fost obținute date noi referitoare la potențialul energetic al biomasei vegetale pomi-viticole pentru diferite scheme de plantație. S-a constatat că, dintre pomii fructiferi, cel mai mare potențial energetic posedă piersicul ($33,50 \pm 6,54$ GJ/ha) urmat de măr ($29,67 \pm 5,17$ GJ/ha), păr ($29,45 \pm 2,51$ GJ/ha) și prun ($22,27 \pm 2,87$ GJ/ha) cu o variație destul de apropiată a valorilor pentru celelalte specii de pomi fructiferi. De menționat că, speciile cu potențial energetic ridicat prezintă și cele mai mari variații ale incertitudinii în estimări. Acest aspect impune necesitatea unei evaluări mai precise la nivel de plantații și localități specifice înainte de inițierea activităților de producere a BCSD. Rezultatele acestei concluzii sunt prezentate în cap. 3, p. 3.2 ale tezei de doctorat și parțial publicate în [15,21].

7. Analizând rezultatele studiului privind potențialul energetic al pomilor din grupa nuciferilor, se constată că migdalul și alunul reprezintă cele mai promițătoare opțiuni pentru valorificarea biomasei pomi-viticole în Republica Moldova, datorită randamentului lor energetic superior. Cantitatea reală de energie care poate fi utilizată în mod durabil, luând în considerare factorii de sustenabilitate și impactul asupra mediului este asigurată de către reziduurile de migdal cu un PESI total de ($39,10$ GJ/ha), urmat de alun ($38,03$ GJ/ha) și nuc ($29,93$ GJ/ha). În schimb, deși nucul are un potențial energetic mai redus, integrarea acestuia alături de alte surse vegetale ar putea contribui la îmbunătățirea eficienței generale a utilizării biomasei. Concluzia se bazează pe datele prezentate în p. 3.3, tab. 3.3 și sunt publicate în [19].

8. Dintre reziduurile generate de arbuștii fructiferi și vița-de-vie, cele mai promițătoare pentru producerea BCSD sunt murul și zmeurul, având cel mai ridicat randament energetic ($\text{PESI} \approx 49,6$ GJ/t), urmate de cătina albă ($42,2$ GJ/t) și vița-de-vie ($16,6$ GJ/t). Aceste resurse sunt accesibile în diverse zone ale Republicii Moldova și prezintă caracteristici calitative conform cerințelor standardelor SM EN ISO 17225. Ele pot fi utilizate atât individuale, cât și în diverse amestecuri pentru optimizarea producției de BCSD. Concluzia se bazează pe datele prezentate în p. 3.4, 3.5 tabelele 3.4 și 3.5 ale tezei de doctorat. Principalele aspecte sunt publicate în [16,18,20,22].

9. În urma examinării a 30 de probe de amestecuri formate din diferite tipuri de biomasă vegetală pomi-viticolă, precum și din reziduuri de floarea-soarelui și paie de grâu, au fost construite diagrame ternare care permit alegerea compoziției optime a amestecurilor de materie primă în funcție de parametrii calitativi solicitați și potențialul de biomasă disponibil pentru procesare în BCSD. Rezultatele sunt bazate pe studiul din p. 3.6, tabelele 3.6 – 3.8, figurile 3.1 – 3.4 ale tezei de doctorat cu aspecte publicate în [15,23].

10. Cercetările privind influența stării materiei prime asupra calității biocombustibililor solizi densificați, obținuți din biomasă vegetală pomi-viticolă, au evidențiat că granulația optimă pentru densificarea biomasei arboricole în brichete variază între 4 și 8 mm, iar conținutul de umiditate poate fi menținut în limitele 6–14%. În cazul endocarpului de nucă, densificarea sub formă de brichete a fost posibilă doar atunci când dimensiunile particulelor nu depășeau 6 mm. Pentru producerea peletilor, biomasa trebuie mărunțită astfel încât să treacă prin site cu deschiderea ochiurilor de cel mult 4 mm. Concluzia se bazează pe datele prezentate în p. 4.3.2, figurile 4.4 și 4.5, tabelul 4.1 din teza de doctorat. Principalele aspecte sunt publicate în [5,24].

11. În urma cercetărilor experimentale realizate cu ajutorul unui dispozitiv original destinat studierii procesului de densificare a biomasei vegetale sub formă de brichete, precum și a confirmării rezultatelor în condiții reale de producție, s-a constatat că o temperatură a matricei cuprinsă între 60 și 180 °C asigură formarea unor legături de adeziune eficiente. Aceste condiții favorizează obținerea unor biocombustibili solizi din biomasă pomicolă cu densitate și durabilitate mecanică stabilă. La temperaturi sub 60 °C, lignina nu suferă transformările fazice necesare, nefiind suficient de amorfă pentru a asigura coeziunea între particule. Concluzia se bazează pe datele prezentate în p. 4.1, 4.3.3, figurile tabelele 4.6 și 4.7 ale tezei de doctorat [25].

12. Cercetările realizate cu scopul îmbunătățirii calității biocombustibililor solizi din biomasă vegetală pomi-viticole prin tratări termochimice denotă că torefierea amestecurilor de reziduuri vegetale de cătină albă și mur în intervalul de temperatură 250–280 °C, pentru 15–25 minute, contribuie la mărirea valorii calorice a peleișilor, menținând în același timp un conținut moderat de cenușă și pierderi de masă reduse. Temperaturile peste 300 °C și duratele mai lungi de 30 minute sunt contraindicate din cauza pierderii excesive de material. Concluzia este formulată pe baza materialului prezentat în p. 4.4.2, figurile 4.9 – 4.11 ale tezei de doctorat și publicate în [17].

13. Rezultatele cercetărilor realizate în cadrul acestei lucrări s-au concretizat prin din reziduuri vegetale pomi-viticele, prin concretizarea stării materiei prime înainte de densificare, definirea regimurilor tehnologice adecvate și identificarea sursei materiei prime, în funcție de potențialul de biomasă vegetală disponibilă, caracteristicile ce pot fi obținute din această biomasă și rețetele de amestecuri care pot fi realizate din resursele de biomasă locale. Principalele rezultate au fost implementate la SRL STAR TECH act de implementare nr. 1 din 15.03.2025 și SRL ECO NUTS ENERGY act de implementare nr. 2 din 17.03.2025.

RECOMANDĂRI ȘI PERSPECTIVE

Pe baza experienței acumulate în elaborarea prezentei teze, se conturează o serie de recomandări cu relevanță practică și științifică, utile atât pentru producătorii de biocombustibili solizi densificați, cât și pentru cercetătorii din domeniu:

1. Elaborarea unei baze de date naționale cu caracter exhaustiv, care să conțină informații concrete privind disponibilitatea tuturor tipurilor de biomasă vegetală adecvată pentru producerea biocombustibililor solizi în Republica Moldova. Această bază de date ar trebui să includă localizarea geografică a resurselor, corelată cu distanțele față de unitățile de producție, precum și o analiză tehnico-economică privind valorificarea eficientă a acestora.

2. Extinderea cercetărilor privind potențialul energetic al biomasei vegetale din surse mai puțin explorate, cum ar fi biomasa forestieră, deșeurile agroindustriale sau cele provenite din industria alimentară, în vederea diversificării surselor de materie primă.

3. Analiza utilizării lianților organici naturali, în scopul îmbunătățirii proprietăților fizico-mecanice ale biocombustibililor solizi densificați și al alinierii acestora la cerințele de calitate prevăzute de standardele ENplus.

4. Inițierea cercetărilor aplicative pentru dezvoltarea unor soluții software capabile să determine rețete optime de amestecuri de materii prime, în funcție de tipul biomasei disponibile și de parametrii de calitate reglementați de standardele europene.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Hotărâre de Guvern nr. 102 din 05.02.2013 cu privire la Strategia energetică a Republicii Moldova până în anul 2030. Monitorul Oficial, 2013, Nr. 27-30 art. 146. Disponibil: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=68103&lang=ro.
2. Strategia Energetică a Republicii Moldova până în anul 2050. 2024. Disponibil: https://energie.gov.md/sites/default/files/concept_strategia_enenergetica_act._-clean_1.pdf.
3. SILVESTRI, C. et al. Toward a framework for selecting indicators of measuring sustainability and circular economy in the agri-food sector: a systematic literature review. *Life Cycle Sustainability Assessment*, 2024, 29 1446-1484. Disponibil: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02032-1>.
4. MARIAN, G. et al. Biomass Resources from Vineyard Residues for the Production of Densified Solid Biofuels in the Republic of Moldova. *Agronomy*, 2024, 14 (10), 2183. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102183>.
5. MARIAN, G. et al. Quality of pellets produced from agricultural wood residues specific to the Prut river basin. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2021, 1, pp. 84–93. Disponibil: <https://cris.utm.md/bitstream/5014/2205/1/n109v1r2021marian.pdf>.
6. NATH, B. et al. Assessment of densified fuel quality parameters: A case study for wheat straw pellet. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2023, 8 (1), pp. 45–58. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.10.001>.
7. CAVALLO, E., PAMPURO, N. Effects of compressing pressure on briquettes made from woody biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 58, pp. 517–522, ISBN 978-88-95608-52-5. Disponibil: <https://doi.org/10.3303/CET1758087>.
8. NUNES, L.J.R. et al. Energy recovery of agricultural residues: incorporation of vine pruning in the production of biomass pellets with ENplus® certification. *Recycling*, 2021, 6 (2), 28. <https://doi.org/10.3390/recycling6020028>.
9. FITRI, H. et al. Biomass potential from agricultural residues for energy utilization in West Nusa Tenggara (WNT), Indonesia. *GCB Bioenergy*, 2023, 15 (11), pp. 1405–1414. Disponibil: <https://doi.org/10.1111/gcbb.13100>.
10. PENCE, I. et al. Detailed analysis of Türkiye's agricultural biomass-based energy potential with machine learning algorithms based on environmental and climatic conditions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024, 26, pp 4177–4195. Disponibil: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02822-1>.
11. PAVLENCO, A., MARIAN, G., GUDÎMA, A. Potențialul energetic al reziduurilor agricole: studiu de caz pentru regiunea de dezvoltare nord, Republica Moldova. *Știința Agricolă*, 2018, 2, pp. 141–148. Disponibil: https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/141-148-compressed.pdf.
12. GUDÎMA, A. Evaluarea utilizării reziduurilor agricole pentru scopuri energetice. Studiu de caz pentru raionul Soroca, Republica Moldova. *Meridian Ingineresc*, 2017, 1, pp. 26-29, ISSN 1683-853X 0111223062.
13. BRYAN, B.A., WARD, J., HOBBS, T. An assessment of the economic and environmental potential of biomass production in an agricultural region. *Land Use Policy*, 2008, 25 (4), pp. 533–549. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.11.003>.
14. PORTUGAL-PEREIRA, J. et al. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 81, pp. 521–533. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>.
15. MARIAN, G. et al. Evaluation of agricultural Residues as organic green energy source based on seabuckthorn, blackberry, and straw blends. *Agronomy*, 2022, 12 (9):2018. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092018>.
16. MARIAN G. et al. Sustainable Utilization of Agricultural Residues from Fruit Shrubs: Energy Potential and Physical-Chemical Properties. *International Journal of Conservation Science*, 2025, 17, Disponibil: În curs de publicare.
17. MARIAN, G., **BANARI, A.** The effect of torrefaction on pellets made from vegetal biomass

generated by fruit shrubs. *Journal of Engineering Science*, 2025. Disponibil: În curs de publicare

18. MARIAN, G. et al. Quality assurance of densified biofuels from vineyard residues: case study for „Cabernet” and „Moldova” varieties cultivated in the Republic of Moldova. *Lucrări științifice seria horticultură*, 2024, 67 (1), Iași, pp 51–62.

19. 184. MARIAN, G., BANARI, A. Comparative evaluation of energy potential and composition of walnut, hazelnut, and almond residues for solid biofuel production. *Journal of Engineering Science*, 2025, 32 (1), pp. 111 – 124. Disponibil: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2025.32\(1\).09](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2025.32(1).09).

20. MARIAN, G. et al. Perspectivele valorificării reziduurilor de cătină albă în scopuri energetice. *Lucrări științifice*, Simpozion științific internațional „Sectorul agroalimentar - realizări și perspective”, Chișinău, 2022 pp. 297–301.

21. MARIAN, G. et al. Calorific Value of Pellets Produced From Raw Material Collected From Both Sides of the River Prut. *Journal of Engineering Science*, 2022, 29 (4), 126–137. Disponibil: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29\(4\).10](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29(4).10).

22. MARIAN, G. et al. Prospects for the use of seabuckthorn residues in the production of densified solid biofuels. *Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering* 2021, X, pp 60–63, ISSN 2393-5138.

23. BANARI, A. et al. Studiul procesului de densificare a peletilor produși din biomasă de cătină albă. *Sectorul agroalimentar – realizări și perspective*, 2022, Chișinău 11-12 noiembrie 2022, pp. 156–157, ISSN 1857-0003. Disponibil: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/52504.

24. MARIAN, G. et al. Quality of densified solid biofuels produced from some energy crops specific to the conditions of the Republic of Moldova. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, 2021, X, pp. 54–59 ISSN 2393-5138. Disponibil: <https://www.landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2021/Art7.pdf>.

25. DARADUDA, N. et al. *Dispozitiv pentru studierea procesului de densificare a biomasei vegetale în formă de brichete*. Brevet de invenție de scurtă durată MD 1734 Y 2023. Data publicării hotărârii de acordare a brevetului: 2023.12.31, BOPI nr. 12/2023.

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI

Articole în reviste din bazele de date Web of Science și Scopus

1. MARIAN, G., IANUȘ, G., ISTRATE, B., BANARI, A., NAZAR, B., MUNTEANU, C., MĂLUȚAN, T., GUDIMA, A., CIOLACU, F., DARADUDA, N., PALEU, V. Evaluation of Agricultural Residues as Organic Green Energy Source Based on Seabuckthorn, Blackberry, and Straw Blends. In: *Agronomy*. 2022, nr. 9(12), pp. 1-14. ISSN 2073-4395. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092018>

Articole în reviste din străinătate recunoscute

2. MARIAN, G., BANARI, A., NAZAR, B., GUDIMA, A., DARADUDA, N., PAVLENCO, A. Prospects for the use of sea buckthorn residues in the production of densified solid biofuels. *Scientific Papers, UASVM of Bucharest. Series E. Land Reclamation, Earth Observation and Surveying, Environmental Engineering*. 2021, vol. X, pp. 60-63. ISSN 2285-6064;

3. MARIAN, G., DARADUDA, N., GUDIMA, A., NAZAR, B., BANARI, A., PAVLENCO, A. Quality of densified solid biofuels produced from some energy crops specific to the conditions of the Republic of Moldova. *Scientific Papers, UASVM of Bucharest. Series E. Land Reclamation, Earth Observation and Surveying, Environmental Engineering*. 2021, vol. X, pp. 54-59. ISSN 2285-6064;

4. MARIAN, G., IANUȘ, G., ISTRATE, B., GUDIMA, A., NAZAR, B., PAVLENCO, A., BANARI, A., DARADUDA, N. Quality of pellets produced from agricultural wood residues specific to the Prut river basin. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2021, nr. 1, pp. 84-93. ISSN 2313-092X. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-11](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-11);

Articole în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, categoria B+

5. MARIAN, G., IANUȘ, G., GUDIMA, A., NAZAR, B., ISTRATE, B., **BANARI, A.**, PAVLENCO, A., DARADUDA, N. The calorific value of pellets produced from raw material collected from both sides of the Prut river. *Journal of Engineering Science*. 2022, vol. 29, nr. 4, pp. 126-137. ISSN 2587-3474. DOI: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29\(4\).10](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29(4).10);

Articole în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, categoria B

6. MARIAN, G., **BANARI, A.**, GUDIMA, A., DARADUDA, N., PAVLENCO, A. Caracterizarea reziduurilor provenite din lanțul de producere a cătinii albe. *Știința Agricolă*. 2020, nr. 2, pp. 91-96. ISSN 1857-0003. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4321228>;

Articole în culegeri științifice

7. MARIAN, G., NAZAR, B., GUDIMA, A., ALEXIOU-IVANOVA, T., MARIAN, T. , PAVLENCO, A., **BANARI, A.**, MALAI, L. The quality assurance of densified solid biofuels produced from vineyard residues in the Republic of Moldova: a case study for the "Cabernet" and "Moldova" varieties. *Life sciences today for tomorrow*. 24-25 octombrie 2024, Iași, p. 70. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/222528;

În lucrările conferințelor științifice naționale cu participare internațională

8. MARIAN, G., **BANARI, A.**, NAZAR, B., GUDÎMA, A., DARADUDA, N., PAVLENCO, A. Perspectivele valorificării reziduurilor de cătină albă în scopuri energetice. *Lucrări științifice*, UASM. 2022, vol. 56: materialele Simpozionului Științific Internațional „Sectorul agroalimentar – realizări și perspective”, 19-20 noiembrie 2021, pp. 297-301. ISBN 978-9975-64-329-0

9. MARIAN, G., DARADUDA, N., GUDÎMA, A., NAZAR, B., **BANARI, A.**, PAVLENCO, A. Dezvoltarea capacității de valorificare a potențialului energetic al resurselor genetice vegetale generate de unele culturi energetice. *Lucrări științifice*, UASM. 2022, vol. 56: materialele Simpozionului Științific Internațional „Sectorul agroalimentar – realizări și perspective”, 19-20 noiembrie 2021, pp. 292-296. ISBN 978-9975-64-329-0.

10. MARIAN, G., **BANARI, A.**, GUDIMA, A., NAZAR, B., PAVLENCO, A. Îmbunătățirea calității peleților produși din biomasă de cătină albă prin formarea de amestecuri. In: *Sectorul agroalimentar – realizări și perspective*. 11-12 noiembrie 2022, Chișinău. "Print-Caro", 2023, pp. 119-121. ISBN 978-9975-165-51-8. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/176639

11. **BANARI, A.**, MARIAN, G., NAZAR, B., GUDIMA, A. Studiul procesului de densificare a peleților produși din biomasă de cătină albă. *Sectorul agroalimentar – realizări și perspective*. 11-12 noiembrie 2022, Chișinău: "Print-Caro", 2023, pp. 156-157. ISBN 978-9975-165-51-8. https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/176741

Brevete de invenții și alte obiecte de proprietate intelectuală

12. DARADUDA, N., MARIAN, G., NAZAR, B., GUDÎMA, A., GHEORGHÎȚA, A., **BANARI, A.**, GELU, I., ISTRATI, B. Dispozitiv pentru studierea procesului de densificare a biomasei vegetale în formă de brichete. Brevet MD 1734Y 10.01.2023.

ADNOTARE

BANARI Alexandru

„Perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole”, teză de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2025

Structura tezei: Lucrarea este alcătuită dintr-o introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 203 titluri, 10 anexe, 121 pagini (până la bibliografie), 22 figuri, 23 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 15 lucrări științifice, inclusiv 1 - publicații indexate în SCOPUS, 4 - baze de date internaționale, 2 - comunicări la conferințe științifice internaționale sau cu participare internațională, 3 - articole în reviste din RM, 2 - teze în lucrările conferințelor științifice internaționale (RM), un brevet de invenție.

Cuvinte-cheie: Asigurarea calității, Brichete, Disponibilitate, Lanțul de aprovizionare cu biocombustibili solizi, Peleți, Potențialul energetic, Reziduuri vegetale pomi-viticole, Torefiere.

Scopul lucrării: Perfecționarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole.

Obiectivele cercetării: Stabilirea potențialului de biomasă vegetală pomi-viticolă pretabilă pentru producerea BCSD în condițiile Republicii Moldova; Determinarea potențialului energetic al biomasei vegetale pomi-viticolă generate de diferite specii de pomi fructiferi, arbuști fructiferi și vița-de-vie; Optimizarea fluxului de producere a biocombustibililor solizi densificați din biomasă vegetală pomi-viticolă; Analiza impactul diferitelor metode de procesare asupra caracteristicilor finale ale produsului, cu scopul de a stabili cele mai eficiente tehnici de producție adaptate la specificul biomasei pomi-viticole.

Noutatea și originalitatea științifică: Examinarea stadiului curent referitor la contextul actual și problemele din domeniul fluxului de producere a biocombustibililor solizi din reziduuri vegetale pomi-viticole; elaborarea metodologiei de cercetare cu elaborarea unei instalații de laborator pentru monitorizarea regimurilor tehnologice de densificare a biocombustibililor solizi; obținerea de date noi referitoare la disponibilitatea biomasei pomi-viticole pentru producerea BCSD în Republica Moldova și potențialul energetic al acesteia; dezvoltarea unui model al unui flux de producere a BCSD în baza rezultatelor obținute în acest studiu.

Rezultatele obținute care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante: Justificarea folosirii reziduurilor pomi-viticole locale la producerea BCSD cu caracteristici conforme cerințelor SM EN ISO 17225; Îmbunătățirea calității BCSD prin optimizarea fluxului de producere a acestora

Semnificația teoretică: obținerea de cunoștințe științifice noi referitoare la potențialul de reziduuri pomi-viticole cu perspectivă de folosire în calitate de materie primă la producerea BCSD din resurse locală.

Valoarea aplicativă: Crearea de oportunități pentru producătorii de BCSD în vederea asigurării unei agriculturi circulare prin valorificarea eficientă a resurselor locale de biomasă vegetală.

Implementarea rezultatelor științifice: Datele experimentale obținute au fost implementate în SRL „ECO NUTS ENERGY” și SRL „STAR TECH”.

ANNOTATION

BANARI Alexandru

"Optimization of the production flow of solid biofuels from pomace-viticultural plant residues", PhD thesis in engineering sciences, Chisinau, 2025

Thesis structure: Introduction, 4 chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 203 titles, 10 appendices, 121 pages (excluding bibliography), 22 figures, and 23 tables. The obtained results are published in 15 scientific papers, including 1 publication indexed in **SCOPUS**, 4 in international databases, 4 conference proceedings at international or internationally attended scientific conferences, 3 articles in Moldovan journals, 2 abstracts in the proceedings of international scientific conferences (Moldova), and one patent.

Keywords: Quality assurance, Briquettes, Availability, Solid biofuel supply chain, Pellets, Energy potential, Pomace-viticultural plant residues, Torrefaction.

Research goal: Optimization of the production flow of solid biofuels from pomace-viticultural plant residues.

Objectives of the paper: Establishing the potential of pomace-viticultural plant biomass suitable for producing densified solid biofuels under the conditions of the Republic of Moldova; Determining the energy potential of pomace-viticultural plant biomass generated by different species of fruit trees, fruit shrubs, and grapevines; Optimizing the production flow of densified solid biofuels from pomace-viticultural plant biomass; Analysing the impact of different processing methods on the final characteristics of the product to determine the most efficient production techniques adapted to the specific properties of pomace-viticultural biomass.

Scientific novelty and originality: Examination of the current state of the field concerning the production flow of solid biofuels from pomace-viticultural plant residues; Development of a research methodology with the design of a laboratory installation for monitoring the technological densification regimes of solid biofuels; Obtaining new data on the availability of pomace-viticultural biomass for producing densified solid biofuels (DSBF) in the Republic of Moldova and its energy potential; Developing a model for a DSBF production flow based on the results obtained in this study.

Results contributing to solving a significant scientific problem: Justification for using local pomace-viticultural residues in DSBF production, meeting the requirements of **SM EN ISO 17225**; Improving DSBF quality through optimization of the production flow.

Theoretical significance: Obtaining new scientific knowledge regarding the potential of pomace-viticultural residues as a raw material for DSBF production from local resources.

Applicative value: Creating opportunities for DSBF producers to ensure a circular agricultural economy by efficiently utilizing local biomass resources.

Implementation of scientific results: The obtained results have been implemented at ECO NUTS ENERGY LLC and STAR TECH LLC.

АННОТАЦИЯ

БАНАРЬ Александру

«Оптимизация производственного потока твердых биотоплив из растительных остатков плодово-виноградных культур», кандидатская диссертация в области инженерных наук, Кишинев, 2025 г.

Структура диссертации: Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 203 источников, 10 приложений, 121 страниц (без учета библиографии), 22 рисунков и 23 таблицы. Полученные результаты опубликованы в 15 научных работах, включая 1 публикации, индексируемые в SCOPUS, 4 – в международных базах данных, 2 – в материалах конференций международного уровня или с международным участием, 3 – в молдавских журналах, 2 – в тезисах международных научных конференций (PM), а также 1 патент.

Ключевые слова: Качество; Лигноцеллюлозная биомасса; Режимы уплотнения; Брикеты; Пеллеты; Уплотненные твердые биотоплива; Энергетический потенциал.

Цель исследования: Оптимизация производственного потока твердых биотоплив из растительных остатков плодово-виноградных культур.

Задачи работы: Определение потенциала биомассы плодово-виноградных культур, пригодной для производства прессованных твердых биотоплив в условиях Республики Молдова; Определение энергетического потенциала биомассы плодово-виноградных культур, полученной от различных видов плодовых деревьев, кустарников и винограда; Оптимизация производственного потока прессованных твердых биотоплив из биомассы плодово-виноградных культур; Анализ влияния различных методов обработки на конечные характеристики продукта с целью выявления наиболее эффективных технологий производства, адаптированных к специфике биомассы плодово-виноградных культур.

Научная новизна: Исследование текущего состояния в области производства твердых биотоплив из растительных остатков плодово-виноградных культур; Разработка методологии исследования с созданием лабораторной установки для мониторинга технологических режимов прессования твердых биотоплив; Получение новых данных о доступности биомассы плодово-виноградных культур для производства прессованных твердых биотоплив (ПТБ) в Республике Молдова и её энергетическом потенциале; Разработка модели производственного потока ПТБ на основе полученных в исследовании результатов.

Результаты, способствующие решению важной научной проблемы: Обоснование использования местных отходов плодово-виноградных культур в производстве ПТБ, соответствующих требованиям SM EN ISO 17225; Улучшение качества ПТБ за счет оптимизации производственного потока.

Теоретическая значимость: Получение новых научных данных о потенциале растительных остатков плодово-виноградных культур в качестве сырья для производства ПТБ из местных ресурсов.

Практическая ценность: Создание возможностей для производителей ПТБ в целях обеспечения циркулярного сельского хозяйства за счет эффективного использования местных ресурсов биомассы.

Внедрение научных результатов: Полученные результаты были внедрены на предприятиях ECO NUTS ENERGY и STAR TECH.

BANARI ALEXANDRU

**PERFEȚIONAREA FLUXULUI DE PRODUCERE A BIOCOMBUSTIBILILOR
SOLIZI DIN REZIDUURI VEGETALE POMI-VITICOLE**

**255.02 TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE PENTRU INDUSTRIA
PRODUSELOR AGRICOLE**

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

Aprobat spre tipar: 24.05.2025
Hârtie ofset. Tipar digital
Coli de tipar: 2,4

Formatul hârtiei: A4
Tiraj: 50 ex.
Comanda nr. 57

Tipografia PRINT-CARO
m. Chișinău, str. Columna, 170
printcaro@gmail.com
tel. 069124696