



Universitatea
Transilvania
din Braşov

TEZĂ DE ABILITARE

Titlu: Cercetări în domeniul uscării convective și al biomasei lemnoase

Domeniul: Inginerie Mecanică

Autor: Conf. dr. ing. Daniela ȘOVA

Universitatea Transilvania din Braşov

Braşov, 2023

CUPRINS

(A) Summary.....	6
(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei....	12
(B-i) Realizări științifice și profesionale.....	12
1. Direcțiile de cercetare abordate și contribuțiile autoarei la dezvoltarea lor.....	12
2. Lucrările științifice care stau la baza tezei de abilitare.....	17
(B-ii) Cercetări în domeniul uscării lemnului.....	20
Capitolul 1. Analiza numerică și experimentală a stratului limită în timpul uscării corpurilor capilar-poroase.....	20
1.1. Studiul transferului molecular simultan de căldură, masă și impuls în stratul de aer limitrof suprafețelor de evaporare ale corpurilor umede în convecție forțată.....	20
1.2. Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul transferului de căldură și de masă în prezența evaporării de pe suprafețe libere în convecție forțată.....	23
1.3. Analiza particularităților procesului de uscare convectivă a corpurilor capilar-poroase.....	26
1.4. Modelarea transferului de căldură și de masă în stratul limită.....	29
1.5. Analiza numerică.....	32
1.6. Analiza experimentală a stratului limită.....	41
1.6.1. Tunelul experimental de uscare.....	41
1.6.2. Pregătirea epruvetelor din lemn.....	43
1.6.3. Efectuarea măsurărilor de viteză, temperatură și umiditate ale aerului în stratul limită.....	44
Capitolul 2. Optimizarea regimurilor de uscare ale lemnului prin metoda proiectării	

experimentelor.....	49
2.1. Simularea uscării.....	49
2.2. Analiza statistică.....	52
2.3. Rezultatele proiectării cu RSM.....	55
2.3.1. Rezultatele simulării și modelării cu RSM.....	55
2.3.2. Rezultatele optimizării.....	64
Capitolul 3. Studiul apariției crăpăturilor superficiale pe durata uscării prin evaluarea câmpului de umiditate în lemn.....	67
3.1. Modelul matematic care descrie câmpul de umiditate în interiorul lemnului în timpul uscării convective.....	67
3.2. Modelul numeric.....	72
3.3. Simularea câmpului de umiditate.....	72
(B-iii) Cercetări în domeniul biomasei lemnoase.....	79
Capitolul 4. Conductivitatea termică efectivă a biomasei lemnoase sub formă de brichete.....	79
4.1. Conductivitatea termică a lemnului și a biomasei lemnoase în cercetările actuale....	79
4.2. Modele de conductivitate termică efectivă aplicate brichetelor de lemn.....	81
4.3. Realizarea brichetelor de lemn și determinarea experimentală a conductivității termice.....	94
4.4. Rezultatele experimentale și ale modelelor circuitelor rezistive.....	98
Capitolul 5. Relația dintre porozitatea și rugozitatea brichetelor de lemn.....	107
5.1. Porozitatea și densitatea lemnului și ale brichetelor în cercetările actuale.....	107
5.2. Descrierea brichetelor.....	110

5.3. Parametrii de rugozitate ai brichetelor.....	110
5.4. Densitatea brichetelor.....	112
5.5. Porozitatea brichetelor.....	116
5.6. Rezultatele experimentale și corelațiile dintre parametrii experimentali și calculați.....	117
Capitolul 6. Studiul proprietăților fizice, chimice, termice și mecanice ale brichetelor din amestecuri de specii lemnoase.....	132
6.1. Proprietăți ale brichetelor de lemn în cercetările actuale.....	132
6.2. Realizarea brichetelor de lemn de fag și bambus și determinarea proprietăților fizice, chimice, termice și mecanice.....	133
6.2.1. Realizarea brichetelor de lemn de fag și bambus.....	133
6.2.2. Determinarea puterii calorice a brichetelor.....	136
6.2.3. Determinarea conținutului de cenușă al brichetelor.....	137
6.2.4. Determinarea căldurii specifice și a conductivității termice ale brichetelor.....	138
6.2.5. Determinarea rezistenței la rupere a brichetelor.....	138
6.3. Rezultate experimentale.....	139
6.3.1. Densitatea și conținutul de umiditate ale lemnului de fag și de bambus, respectiv ale brichetelor.....	139
6.3.2. Puterea calorică a brichetelor.....	141
6.3.3. Conținutul de cenușă al brichetelor.....	144
6.3.4. Căldura specifică și conductivitatea termică ale brichetelor.....	145
6.3.5. Rezistența la rupere a brichetelor.....	147
(B-iv) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei.....	149
Capitolul 7. Evoluția academică.....	149

7.1. Educație.....	149
7.2. Activitate didactică.....	150
7.2.1. Evoluția academică.....	150
7.2.2. Discipline predate.....	150
7.2.3. Calitatea actului didactic.....	152
7.2.4. Îndrumarea științifică a studenților.....	153
7.2.5. Managementul didactic.....	154
7.3. Activitatea științifică.....	154
7.3.1. Proiecte de cercetare.....	154
7.3.2. Domenii de expertiză.....	156
7.4. Recunoaștere și vizibilitate.....	157
Capitolul 8. Planul de dezvoltare a carierei didactice.....	158
8.1. Direcții de dezvoltare a carierei didactice.....	158
8.2. Direcții de dezvoltare științifică.....	159
Bibliografie.....	161

(A) Summary

The habilitation thesis entitled *Research in the fields of convective drying and wood biomass* showcases the didactic and scientific achievements of its author in the period following the award of the title of Doctor in Technical Sciences/Thermal Machines and Equipment (February 1999) and as associate professor at the Faculty of Mechanical Engineering.

Part (B-i) of the thesis briefly describes the two main research directions approached by the author, namely the analysis of convective wood drying as a combined heat and mass transfer process, and the investigation of thermal conductivity models and correlations between different properties of wood briquettes. The first research direction aimed to continue the previous research carried out during the doctoral studies in the field of heat and mass transfer in the thermal conditioning of wood fiber panels.

The research results presented in the habilitation thesis were published in **5 ISI papers**, in **4 papers** indexed in **International Databases (IDB)**, in **4 proceedings** of international conferences and in the scientific report of the research project coordinated by the author. In addition to the research on which the habilitation thesis is based, the author made her contribution in several research areas, such as heat-insulating composite materials (3 ISI papers, 1 IDB paper), dimensional analysis (3 ISI papers), moisture transport in wood (1 IDB paper), aerodynamic resistance in drying chambers (1 ISI paper, 4 IDB papers), totalling 13 ISI papers, 16 papers indexed in International Databases and 43 participations in international conferences.

Parts (B-ii) and (B-iii) of the thesis are structured in 6 chapters, describing the main results and contributions of the author in the two research directions.

The first chapter, entitled *Numerical and experimental analysis of the boundary layer during the drying of capillary-porous materials* is concerned with the simultaneous momentum, heat and mass transfer in the air boundary layer at the surface of wet materials undergoing convective drying. If the heat and mass transfer during evaporation on the surface of wet materials is analyzed similarly to the transfer that occurs on the free surface of a liquid, experiments have shown that the processes are similar only as long the temperature of the surface of the wet material remains constant (constant-drying rate period). In order to explain the transfer mechanisms in the boundary layer, the thermodynamics of irreversible processes was applied in the case of a plane wood board. Firstly, a numerical analysis was performed by using the input data of a regular drying schedule. Thus, several characteristics of the boundary layer were obtained, such as: the thickness of the velocity, temperature and vapor concentration boundary layers, the variation of the velocity, temperature and vapor concentration in the boundary layer and their gradients, and the variation of the heat and mass rates along the board. These properties enabled the determination of the phenomenological coefficients described by the thermodynamics of irreversible processes. The numerical results related to the thickness of the boundary layers were validated by the results obtained from experiments performed in a scaled drying kiln.

The research results indicated in this chapter are part of the scientific report of the project PN II-ID-PCE, no. 723/2009, coordinated by the author of the thesis and they also were disseminated in 2 IDB journals and at 2 international conferences.

The second chapter, *Optimization of wood drying schedules by using the Design of Experiments method*, deals with mathematical models employed to optimize the wood

drying process. The TORKSIM software was used to simulate convective drying of spruce with different initial moisture contents in a scaled drying kiln according to several drying schedules. The output data of the simulation were drying time, energy consumption and relative stress. In order to optimize the drying process in regard with minimization of drying time, energy consumption and relative stress, the Response Surface Methodology (RSM) was applied. RSM is a class of Design of Experiments, aimed in this case at finding the optimal combination of air parameters (temperature, velocity and relative humidity) involved in the drying process. The method can estimate the interaction and quadratic effects of the input variables on responses (output data). The statistical package Design-Expert Software was used for the design of experiments and RSM applications, regression analysis, statistical evaluation of the models, process optimization and graphical presentation of the response surface. The results have shown that the air temperature had the most significant effect on all drying results. Velocity played a minor role. Also, the interaction between temperature and relative humidity on responses was stronger than the other interactions.

The research results presented in this chapter were published in 1 ISI paper and 3 IDB papers.

In the third chapter of the thesis, *The study of the occurrence of cracks during drying by assessing the moisture distribution in wood*, the solution of the coupled heat and mass transfer equations is used to find the hygrometric Kirpichev number that describes the occurrence of superficial cracks during the first drying period at the maximum drying intensity. A small value of the Kirpichev number indicates a low internal resistance to moisture diffusion, while an increased value, a high resistance to diffusion. It is also a measure of internal stress that creates the conditions for the occurrence of cracks. Since the

moisture flow rate depends on the drying schedule (velocity, temperature and relative humidity of air), there is a relation between Kirpichev number and the air properties during this drying period. To avoid the occurrence of cracks, the air properties must be selected so that the Kirpichev number is lower than the critical (maximum) number. In order to apply this method, pine wood samples with different initial moisture contents were submitted to five drying schedules simulated with the TORKSIM software. Thus, the variation of the moisture content in time, the average temperature and the average moisture content of wood were obtained. Then, the variation of the Kirpichev number in time was found by numerical modelling for the five drying schedules. A correlation was also established between the Kirpichev number and the relative stress determined from the simulation.

The research results indicated in this chapter are part of the scientific report of the project PN II-ID-PCE, no. 723/2009 and they also were disseminated in 1 ISI journal and at 1 international conference.

The fourth chapter is entitled *Effective thermal conductivity of wood biomass under the form of briquettes*. The research described in this chapter refers to three electrical resistive-circuit models that were analysed in order to determine the effective transverse (series and parallel) and effective longitudinal thermal conductivity of wood briquettes. The models applied are different for the moisture content below the equilibrium moisture content (EMC) and above EMC. For the latter moisture content range, new relations were developed in order to determine the effective transverse thermal conductivity of combined wood cells in series and parallel circuits. Experiments were performed on briquettes with the moisture content ranging from 0% to 22.7%, dry basis. They showed that the increase in the moisture content above EMC determined both the swelling of the wood fiber and the increase in

briquettes voids, which affected the effective thermal conductivity. Also, the experiments and models indicated that the effective thermal conductivity of briquettes increased, as well as the density of the briquettes, when the moisture content increased from 0% to EMC. EMC was determined to have a mean value of 5.95%. When the moisture content increased from EMC to the maximum moisture content (22.7%), both thermal conductivity and density decreased. Experimental results of thermal conductivity were very close to the results of the transverse resistive models.

The proposed models which were used to determine the effective thermal conductivity of briquettes are included in 1 ISI paper.

The fifth chapter of the thesis is *The relation between porosity and roughness of wood briquettes*. Porosity is one of the important properties used in analysing the combustion of briquettes. The first aim of the research undertaken to determine the porosity of briquettes was to show the applicability of the relations of wood porosity to briquettes. It also aimed to find correlations among a measurable quantity, such as roughness, and a calculated quantity, namely porosity. According to several studies conducted on wood, both porosity and roughness parameters are properties that depend on density. Therefore, the research performed on briquettes revealed correlations between the following properties: porosity and density, roughness and density, and roughness and porosity. Porosity was calculated with three methods indicated in the literature on wood, while density was determined by three different experiments (two stereometric methods and a liquid displacement method). The research concluded that the estimation of the porosity of briquettes by assessing the surface quality can be performed if the roughness parameter $Rk+Rpk+Rvk$ is measured, followed very closely by the Ra parameter. Very strong correlations with roughness were

obtained when the porosity was calculated using the three methods, and the density was measured by one of the stereometric methods.

The correlations indicated in this chapter were reported in 1 ISI paper and at 1 international conference.

Chapter 6, *The study of physical, thermal and mechanical properties of briquettes made of blends of wood species*, deals with the analysis of different properties of blends of beech and bamboo wood particles, in various amounts, compressed into briquettes. Accordingly, the following properties of briquettes were measured: density by using a stereometric method, the higher and lower heating values by using calorimetry, ash content by calcination, specific heat and thermal conductivity based on the transient line heat source method, and the breaking strength by compressing the briquettes. Even if beech wood is the most common solid fuel, the research carried out on briquettes has shown that the addition of bamboo particles enhances the analysed physical, chemical, thermal and mechanical properties.

The research undertaken in the field of the properties of wood briquettes was reported in 1 ISI paper.

Part (B-iv) of the thesis deals with the plans for the author's career evolution and development. Chapter 7 presents the academic evolution of the author of the habilitation thesis, consisting in education, didactic and scientific activities, while Chapter 8 describes the development plan of the author's didactic career in correlation with the directions of her future scientific research.

(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei**(B-i) Realizări științifice și profesionale****1. Direcțiile de cercetare abordate și contribuțiile autoarei la dezvoltarea lor**

Teza de abilitare cuprinde contribuțiile pe care le-a adus autoarea în domeniul uscării lemnului și al biomasei lemnoase în ultimii cincisprezece ani.

Preocupările științifice avute în decursul anilor în domeniul lemnului își au originea în studiile de licență și ulterior, în cele doctorale. Fiind absolventă a Facultății de Ingineria Lemnului (Industrializarea Lemnului) și apoi îmbrățișând cariera didactică în domeniul Termodinamicii Tehnice, am încercat să îmbin cunoștințele din cele două specializări. Un prim pas a fost elaborarea tezei de doctorat cu titlul "Contribuții la transferul de căldură și de masă în procesele de ameliorare termică a plăcilor din fibre de lemn", sub îndrumarea domnului profesor dr. ing. Nicolae Veștemeanu. Ulterior, cercetarea s-a orientat către uscarea convectivă a lemnului, și mai recent, către studiul brichetelor din lemn din punct de vedere al proprietăților lor termofizice.

Plecând de la studiile întreprinse de cercetători naționali și internaționali în cele două domenii, am identificat noi oportunități de a descrie și analiza procesul foarte complex al uscării lemnului și de a dezvolta studiul proprietăților brichetelor de lemn, detaliate în continuare în cele două direcții de cercetare.

<p>Prima direcție de cercetare</p>	<p>Uscarea convectivă a lemnului, o etapă importantă în fabricarea produselor din lemn, este de fapt un proces combinat de transfer de căldură și de masă. Analiza proceselor de transfer care au loc la suprafața de evaporare a umidității de pe suprafețele corpurilor umede în convecție forțată are ca scop intensificarea transferului de căldură și de masă în procesul industrial de uscare.</p> <p>Numeroase studii au utilizat ecuațiile guvernante de conservare a masei, impulsului, energiei și concentrației vaporilor de apă în stratul limită cuplate cu ecuațiile de transport în corpurile umede pentru a descrie câmpul de temperatură și de umiditate în corpurile supuse uscării, cum ar fi de exemplu [L7], [L5], [A3], [O4], [O2] sau [W1].</p>
<p>Contribuțiile autoarei tezei de abilitare</p>	<p>Prin integrarea numerică a ecuațiilor guvernante de conservare s-au investigat câmpurile de viteză, temperatură și de concentrație a vaporilor de apă în stratul limită format la suprafața unei plăci plane, s-a determinat grosimea stratului limită, respectiv variația fluxului termic și a fluxului de masă de-a lungul plăcii. Pe baza acestor mărimi și a expresiilor fluxului termic și fluxului de masă deduse din ecuația termodinamicii proceselor ireversibile s-au calculat coeficienții fenomenologici.</p> <p>Rezultatele au fost diseminate în lucrările [Ș1], [Ș2] și [P6].</p> <p>Simularea procesului de uscare a unei plăci de lemn de molid într-un model de cameră de uscare la scară redusă și utilizarea</p>

	<p>metodei RSM (Response Surface Methodology) de proiectare a experimentelor au permis alcătuirea unui regim de uscare optim cu scopul minimizării duratei de uscare, a consumului de energie și a tensiunii relative din lemn.</p> <p>Rezultatele acestor cercetări au fost publicate în [Ș3], [B1], [Ș4] și [Ș5].</p> <p>Pe durata uscării convective, câmpul de umiditate din corpul supus uscării se modifică continuu, ceea ce conduce la modificarea proprietăților fizice și mecanice ale corpului. Aceste modificări conduc la defecte de calitate (crăpături, deformații) ale corpului. Pe baza soluției ecuației diferențiale de transfer de masă într-un corp umed, s-a adoptat criteriul de similitudine higrometric Kirpichev, care exprimă mărimea rezistenței la difuzie a umidității în corp. El poate fi utilizat ca o măsură a mărimii tensiunilor interne care favorizează apariția crăpăturilor superficiale. Prin simularea procesului de uscare folosind diferite regimuri de uscare, s-a obținut o relație între criteriul higrometric și tensiunea relativă care se dezvoltă în corp.</p> <p>Rezultatele obținute din aceste cercetări s-au publicat în [Ș6] și [Ș7].</p>
A doua direcție de cercetare	Brichetele formate din biomasă lemnoasă se caracterizează prin proprietăți termice și fizice specifice. Cunoașterea proprietăților termice ale brichetelor din biomasă este importantă pentru

	<p>modelarea procesului de ardere. S-au dezvoltat o serie de modele de determinare a conductivității termice efective a lemnului, ca material poros. Literatura existentă oferă puține informații cu privire la conductivitatea termică a unei brichete de lemn și nu există un model care să descrie conductivitatea termică efectivă [G4], [S7], [H3], [T2].</p> <p>Întrucât la determinarea conductivității termice efective a brichetelor a fost necesar calculul porozității lor, o preocupare a reprezentat-o identificarea unei metode de obținere a porozității pe cale experimentală. Literatura existentă nu oferă informații cu privire la determinarea experimentală a porozității brichetelor din lemn, care este o sarcină dificilă având în vedere structura brichetelor din aşchii de lemn comprimate fără lianți. De aceea, este util de a observa, pe de o parte în ce măsură relațiile de calcul ale porozității lemnului pot fi aplicate la brichete și, pe de altă parte, dacă există corelații între o mărime măsurabilă, cum este rugozitatea și o mărime calculată, care este porozitatea.</p> <p>Și proprietățile chimice ale brichetelor din lemn, cum ar fi de exemplu, puterea calorică și conținutul de cenușă, trebuie evaluate pentru a putea aprecia calitatea brichetelor. O creștere a conținutului de cenușă determină scăderea puterii calorice, întrucât cenușa este formată din materiale necombustibile, chiar dacă unele elemente minerale din cenușă reprezintă catalizatori</p>
--	---

	pentru descompunerea termică a combustibilului [L1].
Contribuțiile autoarei tezei de abilitare	<p>O primă cercetare pe care am întreprins-o în domeniul brichetelor din lemn a constat în a investiga în ce măsură modelele existente de determinare a conductivității termice efective a lemnului pot fi aplicate și la brichete. S-au dezvoltat în acest scop trei modele de circuite electrice rezistive pentru un transfer de căldură perpendicular și paralel față de axa brichetei și pentru un conținut de umiditate al brichetelor care a variat de la 0% până la conținutul de umiditate maxim admisibil pentru ca brichetele să-și mențină forma. Rezultatele obținute au fost publicate în [Ș8].</p> <p>O cercetare ulterioară a urmărit să stabilească dacă porozitatea brichetelor poate fi determinată indirect printr-o altă metodă, cum ar fi de exemplu, prin măsurarea unor parametri de rugozitate ai suprafeței brichetei în corelație cu densitatea brichetei.</p> <p>Plecând de la diferitele studii efectuate asupra lemnului, se poate aprecia că atât porozitatea [U2], cât și parametrii de rugozitate [G6] sunt proprietăți dependente de densitate.</p> <p>Prin urmare, s-au determinat corelații între următoarele mărimi: porozitate și densitatea brichetelor, rugozitate și densitatea brichetelor, precum și rugozitate și porozitatea brichetelor. Acestea au fost prezentate în lucrările [Ș9] și [Ș10].</p> <p>Pentru îmbunătățirea proprietăților brichetelor se pot combina diferite tipuri de biomasă. Cercetările întreprinse în domeniul</p>

	<p>proprietăților brichetelor din lemn au fost raportate în lucrarea [L9]. Scopul acestor cercetări a fost de a determina o serie de proprietăți ale brichetelor realizate dintr-un amestec de particule din lemn de bambus și fag, și anume proprietăți fizice (densitate și conținut de umiditate), proprietăți chimice (putere calorică și conținut de cenușă), proprietăți termice (căldură specifică și conductivitate termică) și o proprietate mecanică (rezistență la rupere). Deși lemnul de fag este cel mai uzual combustibil solid, cercetările întreprinse au arătat că adăugarea particulelor de lemn de bambus la fabricarea brichetelor a condus la îmbunătățirea proprietăților fizice, chimice, termice și mecanice analizate.</p>
--	--

2. Lucrările științifice care stau la baza tezei de abilitare

Rezultatele cercetărilor științifice întreprinse de autoare, care stau la baza acestei teze de abilitare, se regăsesc în 5 articole științifice publicate în reviste ISI, 4 articole științifice publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (BDI), 4 proceedings ale unor conferințe internaționale și în raportul științific al proiectului de cercetare coordonat de autoare: Proiect CNCSIS tip PN II-ID-PCE nr. 723/2009: *Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la optimizarea procesului de uscare a materialelor capilar-poroase.*

Pe lângă aceste cercetări care stau la baza tezei de abilitare, autoarea are și alte contribuții la cercetări întreprinse după susținerea tezei de doctorat în domeniile materialelor compozite termoizolatoare, analizei dimensionale, difuziei umidității în lemn, rezistenței aerodinamice în

camerele de uscare, având în total 13 publicații ISI, 16 publicații BDI și 43 de participări la conferințe internaționale.

Publicații ISI

1. Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) *Assessment of drying quality by use of Kirpichev number*, International Wood Products Journal, vol. 1, issue 2, pp. 70-74.
2. Șova D., Bedeleian B., Sandu V. (2016) *Application of Response Surface Methodology to optimization of wood drying conditions in a pilot-scale kiln*, Baltic Forestry, vol. 22, issue 2, pp. 348-356.
3. Șova D., Porojan M., Bedeleian I.B., Huminic G. (2018) *Effective thermal conductivity models applied to wood briquettes*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 124, issue 2, pp. 1-12.
4. Lunguleasa A., Ayrilmiş N., Șova D., Spîrchez C. (2021) *Selected properties of briquettes made from blends of bamboo and beech biomass*, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, vol. 45, issue 4, pp. 389-401.
5. Șova D., Gurău L., Porojan M., Florea O., Sandu V., Purcaru M. (2022) *Indirect evaluation of the porosity of waste wood briquettes by assessing their surface quality*, Waste and Biomass Valorization, vol. 13, issue 1, pp. 739–753.

Publicații BDI

1. Șova D., Postelnicu A. (2009) *Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul transferului de căldură și de masă la suprafața corpurilor în procesul de uscare*, PRO LIGNO, vol. 5, issue. 4.

2. Șova D., Bedeleian B. (2013) *Statistical analysis of simulated wood drying schedules as regards drying time reduction in an experimental kiln*, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.715-720.
3. Bedeleian B., Șova D. (2013) *Revealing the relation between independent variables and drying time implemented in Torksim by means of artificial neural networks: a preliminary study*, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.721-728.
4. Șova D., Bedeleian B. (2014) *Effects of air parameters on drying time and energy consumption*, Revista Termotehnica, vol. 1, pp. 48-52.

Conferințe internaționale

1. Șova D., Bedeleian B. (2009) *The characteristics of heat and mass transfer during evaporation from free surfaces*, International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millenium” (proceedings), Brașov, pp. 125-132.
2. Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) *Criterial assessment of the drying quality*, The final conference of COST Action E53 “The future of quality control for wood & wood products”, 4-7th May 2010, Edinburgh.
3. Postelnicu A., Șova D. (2010) *Assessment of the particularities of heat and mass transfer processes at the surface of capillary-porous materials*, 11th International IUFRO Wood Drying Conference “Recent Advances in Wood Drying”, 18-22 January 2010, Skellefteå.
4. Șova D., Gurău L., Porojan M., Sandu V. (2015) *Assessment of wood briquettes porosity by use of roughness parameters*, International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millenium” (proceedings), Brașov, pp. 811-819.

(B-ii) Cercetări în domeniul uscării lemnului

Capitolul 1. Analiza numerică și experimentală a stratului limită în timpul uscării corpurilor capilar-poroase

1.1. Studiul transferului molecular simultan de căldură, masă și impuls în stratul de aer limitrof suprafețelor de evaporare ale corpurilor umede în convecție forțată

Analiza proceselor de transfer care au loc la suprafața de evaporare a umidității de pe suprafețele libere ale corpurilor umede în convecție forțată are ca scop intensificarea transferului de căldură și de masă în procesul de uscare. Procesele de transfer de căldură și de masă, datorită interdependenței lor în domeniul de studiu considerat devin un proces combinat. Legile care guvernează procesele de transfer de căldură și de masă sunt similare, și noțiunile pot fi generalizate în cazul celor două procese.

Studiul transferului de căldură și de masă în procesul de uscare a fost asociat cu cercetările consacrate evaporării lichidelor de pe suprafețe libere. Aceste cercetări s-au dezvoltat pe două direcții. Prima direcție se bazează pe legea lui Dalton de determinare a fluxului de masă, iar a doua pe analogia dintre transferul de căldură și cel de masă. În cel de-al doilea caz, pe baza legii lui Fick s-au dezvoltat numeroase ecuații de determinare a fluxului de masă. Astfel, Luikov [L2] a stabilit pentru calculul fluxului de vapori care difuzează de pe suprafața liberă de evaporare a lichidului în curentul de aer, în condițiile curgerii forțate, următoarea relație:

$$J_1 = A \frac{D}{R_1 T} \cdot \frac{p_{1s} - p_{1\infty}}{l} \quad (1.1)$$

în care: D (m^2/s) reprezintă coeficientul de difuzie, R_1 (J/kgK) este constanta caracteristică a vaporilor de apă, p_{1s} (Pa) este presiunea parțială a vaporilor de apă saturați la temperatura

suprafeței de evaporare, $p_{1\infty}$ (Pa) este presiunea parțială a vaporilor de apă la o distanță mare de suprafață, l (m) este lungimea suprafeței de evaporare pe direcția de curgere a aerului, A reprezintă un coeficient dependent de criteriul Reynolds.

Pentru calculul fluxului de masă, în condițiile evaporării de pe suprafețe libere, se utilizează însă și analogia dintre transferul de căldură și cel de masă. În acest sens se poate aplica legea lui Newton de determinare a fluxului termic:

$$J_q = h(t_\infty - t_s) = Nu \frac{k}{l}(t_\infty - t_s), \quad (1.2)$$

iar pentru exprimarea fluxului de masă, legea lui Dalton:

$$J_1 = \beta_p(p_{1s} - p_{1\infty}) = Sh \frac{D_p}{l}(p_{1s} - p_{1\infty}) \quad (1.3)$$

în care: h (W/m²K) este coeficientul de transfer de căldură prin convecție, t_∞ și t_s (°C) sunt temperaturile aerului la o distanță mare de suprafață, respectiv la suprafața de evaporare,

$Nu = \frac{hl}{k}$ este criteriul Nusselt, l (m) este lungimea caracteristică, β_p (kg/m²sPa) este

coeficientul de transfer de masă raportat la variația presiunii, $Sh = \frac{\beta_p l}{D_p}$ este criteriul

Sherwood, D_p (kg/msPa) este coeficientul de difuzie a masei raportat la variația presiunii. Se

poate scrie relația de corelație: $D_p = \frac{D}{R_1 T}$.

Prelucrând un număr mare de date experimentale cu privire la transferul de căldură și de masă în prezența evaporării de pe suprafețele libere ale lichidului, în cazul curgerii forțate a aerului, Nesterenko [N2] a propus următoarele relații criteriale pentru determinarea criteriilor Nusselt și Sherwood:

$$Nu = 2 + A \cdot \text{Pr}^{0.33} \text{Re}^n \text{Gu}^m \quad (1.4)$$

$$Sh = 2 + A' \cdot Sc^{0.33} Re^{n'} Gu^{m'} \quad (1.5)$$

în care: Pr, Re, Sc sunt criteriile de similitudine Prandtl, Reynolds și Schmidt, $Gu = \frac{t_{\infty} - t_s}{T_{\infty}}$

este criteriul Gukhman. Valorile constantelor din ecuațiile (1.4) și (1.5) depind de criteriul Reynolds și sunt indicate în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Valorile constantelor din ecuațiile criteriale (1.4) și (1.5)

Criteriul Reynolds	A	n	m	A'	n'	m'
1...200	1.07	0.48	0.175	0.83	0.53	0.135
$3.5 \cdot 10^3 \dots 2.2 \cdot 10^4$	0.51	0.61	0.175	0.49	0.61	0.135
$2.2 \cdot 10^4 \dots 3.15 \cdot 10^5$	0.027	0.9	0.175	0.0248	0.9	0.135

Analizând procesul de transfer de căldură și de masă în timpul evaporării de pe suprafețele corpurilor umede ca un proces de transfer care are loc la suprafața liberă a unui lichid, cercetările experimentale au confirmat că procesele sunt identice numai în perioada în care temperatura suprafeței corpului rămâne constantă, fiind egală cu temperatura lichidului la suprafața de evaporare. Pe măsură ce temperatura suprafeței corpului crește, intensitatea transferului de masă scade, iar desfășurarea procesului este determinată și de transferul de căldură și de umiditate care are loc în interiorul corpului [Ș12].

Studiul transferului de masă prin analogie cu transferul de căldură nu stabilește influența reciprocă a celor trei forme de transfer molecular, de impuls, de căldură și de masă, ele fiind în cazul uscării corpurilor umede procese cuplate. Ca urmare a complexității proceselor, este adecvată utilizarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile pentru studiul transferului de căldură și de masă în straturile limitrofe suprafeței de evaporare. Utilizarea acestei metode permite determinarea caracteristicilor straturilor limită de viteză, temperatură și concentrație, dar și a unor relații fenomenologice de exprimare a fluxurilor conjugate de

căldură și de masă.

1.2. Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul transferului de căldură și de masă în prezența evaporării de pe suprafețe libere în convecție forțată

Termodinamica proceselor ireversibile este o metodă fenomenologică pe care au fundamentat-o Onsager [O3], Prigogine [P7], de Groot și Mazur [D1], iar Luikov [L5, L6] a propus aplicarea principiilor ei la studiul transferului cuplat de căldură și de masă în procesul de uscare.

Ecuția fundamentală a termodinamicii proceselor ireversibile este ecuația sursei de entropie, care stabilește legătura dintre forțele termodinamice (gradientii unor mărimi intensive) și fluxurile termodinamice conjugate acestor forțe (fluxuri de căldură și de masă) [D1]. Creșterea entropiei în unitatea de timp se exprimă așadar sub forma:

$$\frac{ds}{d\tau} = \sum_i J_i X_i \quad (1.6)$$

în care: $\frac{ds}{d\tau}$ reprezintă sursa de entropie (entropia produsă în unitatea de volum și unitatea de timp), J_i reprezintă fluxuri independente, X_i reprezintă forțe termodinamice (gradientii unor potențiale). Prin urmare, viteza de creștere a entropiei este egală cu suma produselor dintre fluxuri și forțele termodinamice corespunzătoare. Forțele termodinamice sunt cele care generează procesele ireversibile, precum transferul de căldură și de masă.

Conform metodei termodinamicii proceselor ireversibile, transferul de căldură și de masă este determinat de acțiunea tuturor forțelor termodinamice [D1]. Astfel, se poate scrie următorul sistem de ecuații liniare:

$$J_i = \sum_k L_{ik} X_k \quad (1.7)$$

în care: mărimile L_{ik} reprezintă coeficienți cinetici sau fenomenologici, între care există o relație de reciprocitate de forma $L_{ik} = L_{ki}$ [D1]. Ecuația arată că fluxurile ireversibile sunt funcții liniare ale forțelor termodinamice.

Relațiile (1.7) se pot dezvolta pentru transferul de căldură și de masă sub forma sistemului de ecuații:

$$J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 = -\frac{L_{11}}{T}\nabla T - L_{12}T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right) \quad (1.8)$$

$$J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 = -\frac{L_{21}}{T}\nabla T - L_{22}T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right) \quad (1.9)$$

în care: μ (J/kmol) este potențialul chimic.

Din ecuația (1.9) se observă, de exemplu că fluxul de masă J_2 (J_m) este determinat nu numai de acțiunea forței termodinamice X_2 (difuzia unui component), ci și de acțiunea forței X_1 (termodifuzie sau efect Soret). În mod similar, transferul de căldură (1.8) se realizează atât prin conducție (efectul direct), cât și prin transferul de căldură de către componentul care difuzează (efectul Dufour). Coeficientul L_{11} este proporțional cu coeficientul de conductivitate termică, iar coeficientul L_{22} este proporțional cu coeficientul de difuzie. Coeficienții mutuali $L_{12} = L_{21}$ exprimă corelația dintre fluxurile de căldură și de masă, semnificând simetria dintre efectul forței de difuzie asupra fluxului termic, respectiv efectul forței termice asupra fluxului de masă. Cei doi coeficienți sunt proporționali cu coeficientul de difuzivitate termică [L6].

În cazul aplicării metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul uscării se dezvoltă ecuația sursei de entropie pentru un domeniu elementar de aer din apropierea suprafeței de evaporare unde se manifestă cele trei forme de transfer molecular, de impuls, de căldură prin conducție termică și de masă prin difuzie. Ele se manifestă simultan, deci procesele de transfer sunt cuplate. Domeniul considerat este format dintr-o fază continuă constituită din

doi componenți, aer uscat și vapori de apă.

Ca urmare a dezvoltării relațiilor (1.7), efectuată pe larg în [Ş12], în condițiile ipotezei că aerul și vaporii de apă verifică legile gazelor ideale în stratul limită, se obțin următoarele relații ale fluxului de căldură și de masă:

$$J_q = -\frac{L_{TT} - L_{T1}(r_0 + c_{p1}T - c_{p2}T)}{T}DT - L_{T1}\frac{RT}{c_1c_2p}Dp_1 - L_{T\varepsilon_1}D\left(\rho_1\frac{u^2}{2}\right) - L_{T\varepsilon_2}D\left(\rho_2\frac{u^2}{2}\right) \quad (1.10)$$

$$J_1 = -L_{11}\frac{RT}{c_1c_2p}Dp_1 - L_{11}\frac{\frac{L_{1T} - r_0 - c_{p1}T + c_{p2}T}{L_{11}}}{T}DT - L_{1\varepsilon_1}D\left(\rho_1\frac{u^2}{2}\right) - L_{1\varepsilon_2}D\left(\rho_2\frac{u^2}{2}\right) \quad (1.11)$$

în care: r_0 (J/kg) este căldura latentă de vaporizare a apei, c_{p1}, c_{p2} (J/kgK) sunt căldurile specifice la presiune constantă ale vaporilor de apă, respectiv aerului, R (J/kgK) este constanta caracteristică a amestecului de gaze, $c_1 = \rho_1/\rho$ și $c_2 = \rho_2/\rho$ sunt participațiile masice ale componenților amestecului de gaze, ρ_1, ρ_2 (kg/m³) sunt densitățile componenților amestecului de gaze, u (m/s) este viteza aerului, $L_{TT}, L_{T1}, L_{T\varepsilon_1}, L_{T\varepsilon_2}, L_{11}, L_{1\varepsilon_1}$ și $L_{1\varepsilon_2}$ sunt coeficienți fenomenologici. Indicele 1 se referă la vapori, iar indicele 2 la aerul uscat, componentele amestecului. Simbolul D reprezintă gradientul $D = d/dy$.

Se observă din ecuația (1.11) că fluxul termic unitar nu depinde doar de gradientul de temperatură, conform legii lui Fourier, ci și de gradientul presiunii parțiale, respectiv de gradientii energiilor cinetice ai celor doi componenți. Dacă se consideră că

$Dp_1 = D\left(\rho_1\frac{u^2}{2}\right) = D\left(\rho_2\frac{u^2}{2}\right) = 0$, ecuația (1.10) devine:

$$J_q = -\frac{L_{TT} - L_{T1}(r_0 + c_{p1}T - c_{p2}T)}{T}DT = -k \cdot DT \quad (1.12)$$

de unde rezultă expresia coeficientului de conductivitate termică în funcție de coeficienții

fenomenologici L_{TT} și L_{T1} :

$$k = \frac{L_{TT} - L_{T1}(r_0 + c_{p1}T - c_{p2}T)}{T} \quad (1.13)$$

În mod similar se observă din ecuația (1.11) că fluxul de masă nu este determinat doar de gradientul presiunii parțiale a vaporilor, conform legii lui Fick, ci și de gradientul de temperatură, respectiv de gradientii energiilor cinetice. Dacă $DT = D\left(\rho_1 \frac{u^2}{2}\right) = D\left(\rho_2 \frac{u^2}{2}\right) = 0$,

rezultă:

$$J_1 = -L_{11} \frac{RT}{c_1 c_2 p} Dp_1 = -D_p \cdot Dp_1 \quad (1.14)$$

de unde se obține relația dintre coeficientul de difuzie și coeficientul fenomenologic L_{11} :

$$D_p = L_{11} \frac{RT}{c_1 c_2 p} \quad (1.15)$$

Ecuțiile (1.10) și (1.11) obținute prin aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la procesul de evaporare a umidității de pe suprafețe libere în convecție forțată pun în evidență interacțiunea celor trei forme de transfer molecular, care se manifestă simultan la suprafața de evaporare. De aceea, pentru determinarea fluxurilor de căldură și de masă este necesar să se determine valorile gradientilor de temperatură, presiune parțială sau concentrație și energie cinetică.

1.3. Analiza particularităților procesului de uscare convectivă a corpurilor capilar-poroase

Uscarea corpurilor umede reprezintă un proces de reducere a conținutului de umiditate. Când un corp umed este supus uscării convective au loc simultan un transfer de căldură de la aerul cald cu scopul evaporării umidității superficiale și un transfer de umiditate din interiorul

corpului către suprafața lui și ulterior evaporarea ei. Îndepărtarea apei în stare de vapori de la suprafața corpului depinde de parametrii exteriori: temperatură, umiditate relativă și viteza aerului, aria suprafeței de evaporare și presiune. Deplasarea umidității în interiorul corpului depinde de natura lui, de temperatură și de conținutul de umiditate. Evaporarea superficială se realizează prin difuzia vaporilor de la suprafața corpului în aerul atmosferic printr-un strat subțire de aer aflat în contact cu suprafața de evaporare. Ca urmare a transferului de căldură către corpul umed, se dezvoltă un gradient de temperatură în interiorul lui, în timp ce, la suprafață are loc evaporarea umidității. Acest lucru conduce la migrarea ei din interior spre suprafață, prin difuzie, curgere capilară sau presiune internă, datorită contragerii corpului în timpul uscării. În cazul corpurilor capilar-poroase (cum ar fi de exemplu, lemnul), la care contragerea este apreciabilă, evaporarea superficială excesivă conduce la gradienti mari de umiditate pe grosimea lor, conducând la suprauscare, contragere excesivă și tensiuni mari, care determină crăparea sau deformarea lor.

Se disting două perioade de uscare: perioada vitezei constante de uscare și perioada vitezei descrescătoare de uscare. În prima perioadă de uscare, suprafața materialului are umiditatea mai mare decât umiditatea de saturație a fibrei (~30%). Ca urmare, presiunea vaporilor de la suprafață este egală cu presiunea vaporilor saturați și depinde numai de temperatura suprafeței, iar temperatura suprafeței se menține constantă și este egală cu temperatura termometrului umed (temperatura de saturație adiabată). În această perioadă apare un transfer cuplat de căldură și de vapori în stratul limită. Viteza de uscare este constantă și depinde numai de parametrii exteriori (temperatură, umiditate relativă, viteză și configurația curgerii aerului).

În a doua perioadă de uscare presiunea vaporilor scade sub valoarea presiunii de saturație. Ca

urmare, scade fluxul de vapori, iar fluxul termic devine excedentar, conducând la încălzirea corpului. Presiunea vaporilor pe suprafața de evaporare depinde atât de temperatură, cât și de conținutul de umiditate al corpului. Pentru menținerea echilibrului energetic, temperatura suprafeței crește în timp ce umiditatea superficială scade, ceea ce conduce la o viteză descrescătoare de uscare. Procesul de uscare se finalizează când temperatura și conținutul de umiditate ajung la valoarea temperaturii aerului exterior, respectiv a umidității de echilibru [T4].

Dacă se consideră că procesul de uscare este format din cele două perioade, atunci procesele de transfer de căldură și de masă de la suprafața corpului umed se pot identifica cu procesele de transfer de la suprafața liberă a unui lichid (apă) doar în prima perioadă, când temperatura corpului este constantă și egală cu temperatura de saturație adiabată a aerului. Rezultă deci că în această perioadă fluxurile de căldură și de masă la suprafața corpului umed sunt egale cu cele de la suprafața apei și astfel, ecuațiile fluxurilor de căldură și de masă care descriu procesul de evaporare la suprafața liberă a apei sunt valabile și în cazul corpurilor umede.

În perioada vitezei descrescătoare de uscare temperatura suprafeței crește continuu concomitent cu reducerea umidității. Prin urmare, crește și presiunea vaporilor saturați, dar ea nu va mai depinde numai de temperatură, ci și de umiditatea corpului. Ea se va modifica continuu întrucât se modifică umiditatea corpului. Datorită modificării câmpului de temperatură și de concentrație în stratul limită, fluxurile de căldură și de masă nu sunt constante, ci depind atât de regimul de uscare, cât și de temperatura și umiditatea corpului la suprafața de evaporare. În aceste condiții, transferul de căldură și de masă la suprafața corpurilor umede supuse procesului de uscare este mai complex decât cel al evaporării la suprafața liberă a apei [L5].

Considerând temperatura suprafeței de evaporare constantă și egală cu temperatura de saturație adiabată a aerului, ceea ce înseamnă că intensitatea de uscare este egală cu intensitatea evaporării adiabate, atunci fluxurile de căldură și de masă pot fi exprimate în funcție de criteriile Nusselt și Sherwood pentru transferul de căldură și de masă ((1.2) și (1.3)). Ecuțiile fluxurilor de căldură și de masă pot fi scrise sub forma:

$$J_q = -k \frac{\partial t}{\partial y} = k \frac{t_\infty - t_s}{\delta_t} \quad (1.16)$$

$$J_1 = -D_p \frac{\partial p_1}{\partial y} = D_p \frac{p_{1s} - p_{1\infty}}{\delta_p} \quad (1.17)$$

În care: δ_t reprezintă grosimea convențională a stratului limită termic, iar δ_p este grosimea convențională a stratului limită de difuzie.

Din ecuațiile (1.2) și (1.3), considerând ecuațiile (1.16) și (1.17), se obțin relațiile :

$$Nu = \frac{l}{\delta_t} \quad (1.18)$$

și

$$Sh = \frac{l}{\delta_p} \quad (1.19)$$

Din relațiile (1.18) și (1.19) se observă că criteriile Nusselt și Sherwood sunt invers proporționale cu grosimile straturilor limită corespunzătoare. Valorile criteriilor se pot determina pe baza ecuațiilor criteriale propuse de Nesterenko, (1.4) și (1.5).

1.4. Modelarea transferului de căldură și de masă în stratul limită

S-a considerat procesul convectiv de transfer de căldură și masă de-a lungul unei plăci plane orizontale (corp capilar-poros), amplasată într-un fluid, în cazul de față aer. Temperatura și concentrația vaporilor de apă în mediul ambiant sunt notate cu T_∞ , respectiv C_∞ , iar

temperatura și concentrația vaporilor la suprafață sunt T_s și C_s . Fluidul are o viteză de intrare U_∞ . Coordonata x este situată de-a lungul suprafeței plăcii, iar coordonata y normal față de aceasta.

S-au considerat o serie de ipoteze la analiza acestui proces: a) mediul fluid este izotrop și omogen; b) proprietățile mediului fluid sunt constante; c) este valabilă aproximația Boussinesq și d) se aplică aproximația stratului limită.

Se consideră procesul convectiv de transfer de căldură și de masă staționar și bidimensional. Ecuațiile guvernante care descriu conservarea masei, impulsului, energiei și concentrației în cazul acestei probleme de convecție mixtă pot fi scrise sub forma [A3]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1.20)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + g\beta_T(T - T_\infty) + g\beta_C(C - C_\infty) \quad (1.21)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\mu}{\rho c_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (1.22)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (1.23)$$

în care: u și v reprezintă componentele vitezei pe cele două direcții, x și y (paralelă și normală la suprafața corpului), ν și μ sunt coeficienții de viscozitate cinematică și dinamică, α și D reprezintă coeficienții de difuzivitate termică și de difuzie a masei, c_p este căldura specifică la presiune constantă. Regimul de curgere este laminar, dar acest aspect este monitorizat în timpul analizei numerice, prin calculul criteriului Reynolds în fiecare punct considerat pe direcția x .

Condițiile la limită ale problemei sunt:

$$y = 0: u = 0, v = 0, T = T_s, C = C_s \quad (1.24a)$$

$$y \rightarrow \infty: u \rightarrow U_\infty, T \rightarrow T_\infty, C \rightarrow C_\infty \quad (1.24b)$$

Ecuatiile guvernante sunt adimensionalizate, folosind variabilele:

$$\eta = y \left(\frac{U_\infty}{\nu x} \right)^{1/2}, \psi = (\nu U_\infty x)^{1/2} f(\eta),$$

$$\theta = (T - T_\infty)/(T_s - T_\infty), \phi = (C - C_\infty)/(C_s - C_\infty) \quad (1.25)$$

unde funcția de curent ψ este definită în mod uzual ca fiind:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1.26)$$

astfel încât ecuația de continuitate să fie identic satisfăcută.

Cu aceste transformări, ecuațiile (1.21)-(1.23) devin:

$$f'''' + \frac{1}{2} f f'''' + \lambda_T \theta + \lambda_C \phi = 0 \quad (1.27)$$

$$\frac{1}{Pr} \theta'' + f \theta' + \xi (f')^2 = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{1}{Sc} \phi'' + f \phi' = 0 \quad (1.29)$$

unde accentele reprezintă derivarea în raport cu η ; Pr și Sc sunt criteriile Prandtl și Schmidt,

iar:

$$\lambda_T = \frac{Gr_{x,T}}{Re_x^2}, \lambda_C = \frac{Gr_{x,C}}{Re_x^2}, \xi = \frac{U_\infty^2}{c_p (T_s - T_\infty)} \quad (1.30)$$

sunt parametri adimensionali, cu mențiunea că ξ este criteriul Eckert. În continuare,

$$Gr_{x,T} = \frac{g \beta_T (T_s - T_\infty) x^3}{\nu^2} \quad (1.31)$$

$$Gr_{x,C} = \frac{g \beta_C (C_s - C_\infty) x^3}{\nu^2} \quad (1.32)$$

$$\text{Re}_x = \frac{U_\infty x}{\nu} \quad (1.33)$$

sunt criteriile Grashof pentru transferul de căldură și transferul de masă, respectiv criteriul Reynolds.

Condițiile la limită transformate devin:

$$f(0) = 0, f'(0) = 0, \theta(0) = 1, \phi(0) = 1 \quad (1.34a)$$

$$f' \rightarrow 1, \theta \rightarrow 0, \phi \rightarrow 0, \text{când } y \rightarrow \infty \quad (1.34b)$$

Se menționează că, deși λ_T și λ_C sunt mărimi adimensionale, ele depind de x . O dată rezolvată această problemă în stratul limită, se impune determinarea gradientilor medii. Ei se pot exprima sub forma:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \frac{\rho U_\infty^2}{2\delta_v(x)} \quad (1.35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_\infty - T_s}{\delta_T(x)} \quad (1.36)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{C_\infty - C_s}{\delta_C(x)} \quad (1.37)$$

în care: δ_v , δ_T și δ_C sunt grosimile stratului limită de viteză (dinamic), termic și de difuzie.

1.5. Analiza numerică

Pentru analiza numerică s-au utilizat datele de intrare indicate în tabelul 1.2 (valori uzuale în regimurile de uscare ale lemnului).

Mărimile fizice s-au determinat din tabele termodinamice la temperatura medie a aerului

$$(t_m = \frac{t_\infty + t_s}{2}), [R3], [K2].$$

Tabelul 1.2. Mărimi de intrare pentru analiza numerică a stratului limită

Mărimi fizice	Unitate de măsură	Valoare
Temperatura aerului, t_{∞}	°C	80
Temperatura pe suprafață, t_s	°C	64
Umiditatea relativă a aerului, φ	-	0.5
Viteza aerului, U_{∞}	m/s	2
Presiunea aerului, p	Pa	1×10^5
Concentrația vaporilor la suprafață, C_s	kg/m ³	0.153
Concentrația vaporilor la o distanță de suprafață, C_{∞}	kg/m ³	0.07327
Coeficientul de difuzie, D	m ² /s	31.09×10^{-6} m ² /s
Coeficientul de viscozitate cinematică, ν	m ² /s	20.82×10^{-6}
Coeficientul de difuzivitate termică, α	m ² /s	29.48×10^{-6}
Criteriul Prandtl, Pr	-	0.706
Criteriul Schmidt, Sc	-	0.585
Criteriul Gukhman, Gu	-	0.0453
Coeficientul de dilatare termică, β_T	K ⁻¹	2.897×10^{-3}
Coeficientul de dilatare masică, β_C	m ³ /kg	8.814
Căldura latentă de vaporizare, r_0	J/kg	2500×10^3
Conductivitatea termică a aerului, k	W/mK	0.02874
Căldura specifică la presiune constantă a vaporilor de apă, c_{p1}	J/kgK	1881.648
Căldura specifică la presiune constantă a aerului, c_{p2}	J/kgK	1008.424
Constanta caracteristică a aerului, R	J/kgK	307.825
Participația masică a vaporilor, c_1	-	0.119
Participația masică a aerului, c_2	-	0.881

Sistemul de ecuații diferențiale a fost integrat numeric folosind o metodă de tip shooting, cuplată cu metoda de integrare numerică Runge-Kutta.

Grosimea stratului limită dinamic se determină din condiția uzuală ca viteza u_x să ajungă la valoarea $0,99 U_{\infty}$. Pentru determinarea grosimii stratului limită termic se folosește condiția ca $\theta(\eta) \cong 0.01$. Analog, pentru concentrația vaporilor, $\phi(\eta) \cong 0.01$. Cu aceste condiții s-au obținut

grosimile stratului limită de-a lungul suprafeței de evaporare, reprezentate în figura 1.1. Se observă că grosimile stratului limită cresc cu creșterea lui x . Acest lucru influențează gradientii de energie cinetică, temperatură și concentrație de-a lungul suprafeței de evaporare. Prin urmare și fluxurile de căldură și de masă vor avea valori diferite pe suprafața de evaporare.

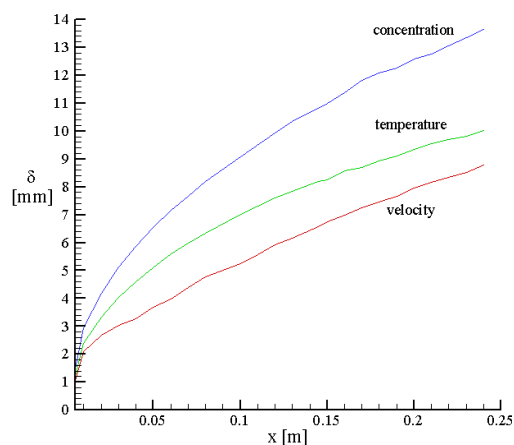


Fig. 1.1. Dezvoltarea grosimii stratului limită dinamic, termic și de masă de-a lungul plăcii plane

Soluția integralei ecuației de mișcare permite determinarea grosimii stratului limită laminar de viteză [C1]:

$$\delta_{v(x)} = 4.64 \sqrt{\frac{v \cdot x}{u}} \quad (1.38)$$

în care $\delta_{v(x)}$ reprezintă grosimea stratului limită de viteză la distanța x față de marginea plăcii.

Pentru determinarea caracteristicilor stratului limită termic se utilizează ecuația bilanțului de căldură în stratul limită prin analogie cu ecuația de mișcare, obținându-se:

$$\frac{\delta_t(x)}{\delta_v(x)} = \frac{1}{1.026 \cdot \sqrt[3]{Pr}} \quad (1.39)$$

în care: $\delta_t(x)$ este grosimea stratului limită termic la distanța x față de marginea plăcii.

În cazul caracteristicilor stratului limită de difuzie se aplică ecuația integrală a fluxului de masă pentru un amestec binar (aer uscat și vapori de apă) și prin analogie cu stratul limită termic se obține:

$$\frac{\delta_{D(x)}}{\delta_{v(x)}} = \frac{1}{1.026 \cdot \sqrt[3]{Sc}} \quad (1.40)$$

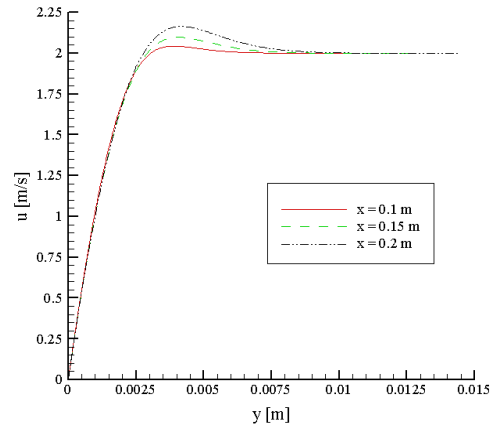
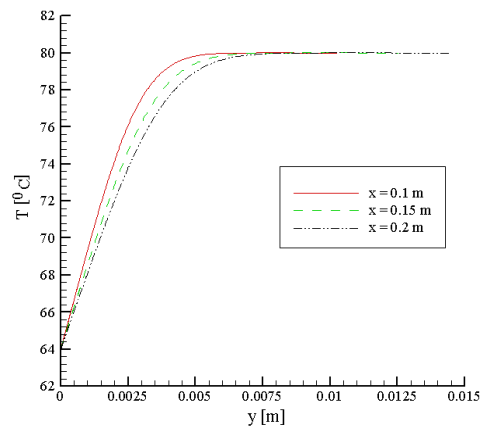
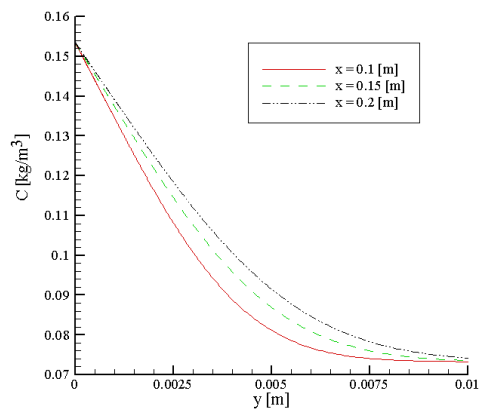
în care: $\delta_{D(x)}$ este grosimea stratului limită de difuzie la distanța x față de marginea plăcii.

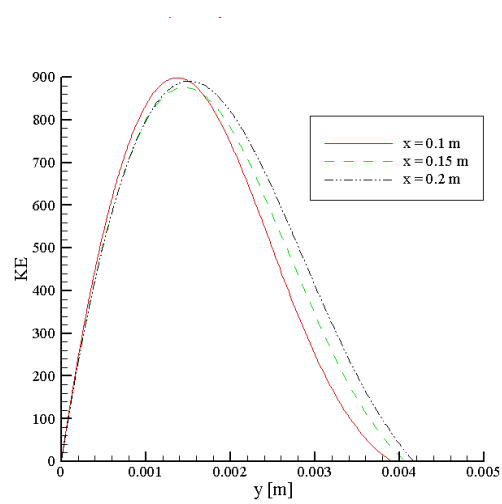
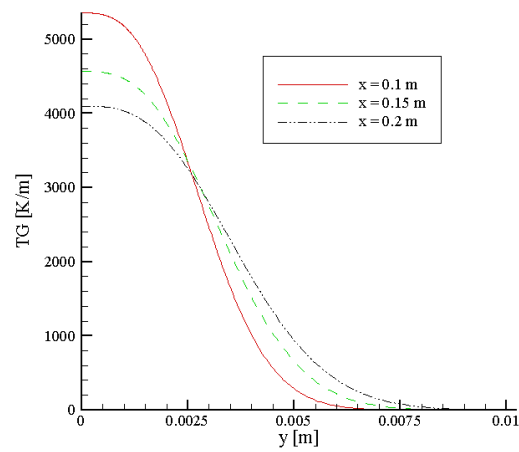
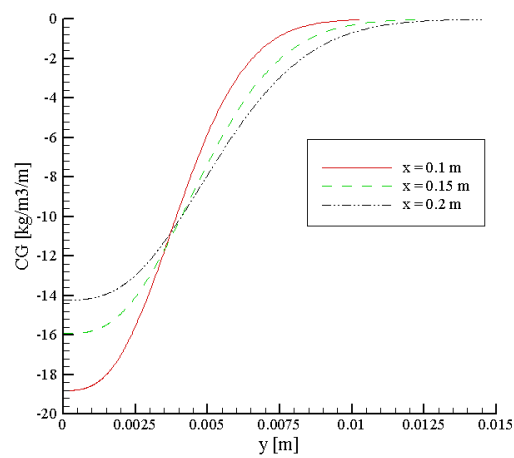
Rezultă din relațiile (1.39) și (1.40), pentru datele din problema analizată, că grosimea cea mai mare o are stratul limită de difuzie, urmat de stratul limită termic și apoi de stratul limită de viteză, ceea ce s-a obținut și din analiza numerică (figura 1.1).

În figurile 1.2, 1.3 și 1.4 pot fi urmărite distribuțiile vitezei, temperaturii și concentrației în stratul limită la distanțele $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 m față de muchia frontală a plăcii.

Se observă în figura 1.2 o creștere a vitezei peste valoarea de 2 m/s, adoptată ca dată de intrare pentru viteza aerului la o distanță de suprafață (U_{∞}), și această creștere se explică prin existența unei curgeri interioare (în apropierea suprafeței) și a unei curgeri exterioare. Pentru curgerea interioară ecuațiile stratului limită sunt valabile, însă pentru curgerea exterioară ele nu mai pot fi aplicate, întrucât teoria stratului limită aproximează această curgere cu o curgere peste o suprafață plană, eliminând existența curgerii interioare. În realitate, particulele de fluid sunt accelerate la marginea stratului limită, la limita dintre curgerea interioară și exterioară. Aceste aspecte se observă la modelarea numerică a stratului limită.

Cei trei gradienti, importanți pentru procesul analizat, sunt gradientul energiei cinetice, gradientul temperaturii și gradientul concentrației vaporilor. Ei se obțin din ecuațiile (1.35)-(1.37). Variația gradientilor în stratul limită este indicată în figurile 1.5, 1.6 și 1.7, la distanțele $x=0.1, 0.15$ și 0.2 m față de muchia frontală a plăcii.

Fig. 1.2. Variația vitezei în stratul limită la $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 mFig. 1.3. Variația temperaturii în stratul limită la $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 mFig. 1.4. Variația concentrației în stratul limită în punctele $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 m

Fig. 1.5. Gradientul energiei cinetice în stratul limită, la $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 mFig. 1.6. Gradientul de temperatură în stratul limită, la $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 mFig. 1.7. Gradientul concentrației în stratul limită, la $x = 0.1, 0.15$ și 0.2 m

S-au folosit următoarele abrevieri:

- KE (fig. 1.5) reprezintă gradientul energiei cinetice, definit ca $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right)$ și exprimat în $\text{kg/m}^2\text{s}^2$,
- TG (fig. 1.6) se referă la $\partial T / \partial y$, exprimat în K/m,
- CG (fig. 1.7) se referă la $\partial C / \partial y$, exprimat în kg/m^4 .

În cazul gradientului energiei cinetice (fig.1.5) se observă o variație de la 0 la o valoare maximă și apoi de la valoarea maximă până la 0. Există o variație nesemnificativă a acestui gradient de-a lungul plăcii. Gradientii de temperatură și de concentrație variază de la o valoare maximă până la valoarea 0. Valoarea lor descrește de-a lungul plăcii. Valorile negative ale gradientilor de concentrație se datorează diferenței $C_\infty - C_s$ (ec. 1.37), care este negativă, concentrația vaporilor fiind mai mare la suprafață. Variații similare ale gradientilor sunt raportate și în [Ș12].

Întrucât gradientii obținuți reprezintă forțe termodinamice care generează fluxurile conjugate lor, variația acestor forțe determină și o variație a fluxurilor în straturile limită.

Valorile medii ale gradientilor sunt introduse în ecuațiile (1.10) și (1.11), pentru determinarea coeficienților fenomenologici. S-au impus patru valori ale lui x , grupate în jurul unei valori x_0 .

În acest fel se obțin opt ecuații, necesare determinării celor șapte coeficienți fenomenologici, întrucât $L_{T1} = L_{1T}$.

În ecuațiile (1.10) și (1.11) coeficienții fenomenologici sunt parametri necunoscuți. De aceea, este necesar ca fluxurile de căldură și de masă să fie determinate din alte condiții. Mărimile J_q și J_1 pot fi obținute fie experimental, fie printr-o metodă analitică. În cazul al doilea, fluxurile de căldură și de masă se determină cu relațiile (1.2) și (1.3), care se pot exprima în condiții locale sub forma:

$$J_q = \frac{\lambda Nu_x}{x} (t_\infty - t_s) \quad (1.41)$$

$$J_1 = \frac{DSh_x}{x} (C_s - C_\infty) \quad (1.42)$$

Pe baza ecuațiilor criteriale propuse de Nesterenko, (1.4) și (1.5), se determină criteriile Nusselt și Sherwood. Rezultatele numerice ale criteriului Reynolds s-au înscris în intervalul ($3.5 \times 10^3 - 2.2 \times 10^4$). În figurile 1.8 și 1.9 sunt prezentate variațiile fluxurilor de căldură și de masă de-a lungul plăcii.

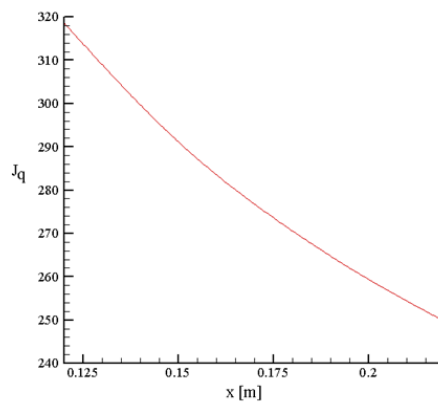


Fig. 1.8. Variația fluxului termic J_q (W/m^2) de-a lungul plăcii

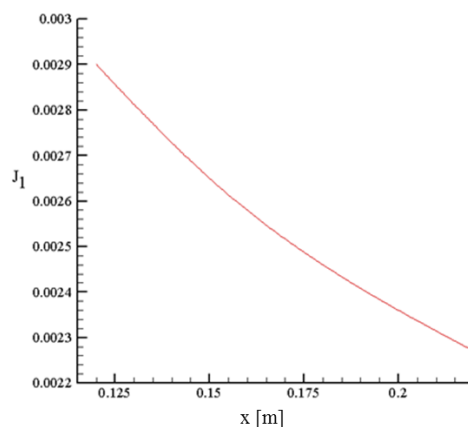


Fig. 1.9. Variația fluxului de masă J_1 (kg/m^2s) de-a lungul plăcii

Ambele fluxuri scad sensibil de-a lungul plăcii, asemenea gradientilor de temperatură și de concentrație.

În tabelul 1.3 sunt redate valorile coeficienților fenomenologici obținuți local prin metoda descrisă mai devreme. Pentru o anumită valoare x se obține o pereche de valori ale coeficienților fenomenologici din care se alege cea mai apropiată de valorile mărimilor fizice care intervin în relațiile de definiție ale coeficienților.

Tabelul 1.3. Coeficienți fenomenologici locali

x [m]	L_{TT} [W/m]	$L_{1T} = L_{T1}$ [kg/ms]	L_{Te1} [m ² /s]	L_{Te2} [m ² /s]	L_{11} [kgs/m ³]	L_{1e1} [s]	L_{1e2} [s]
0.18	90.910	3.618×10^{-5}	-2.206×10^{12}	2.980×10^{12}	-2.119×10^{-11}	-2.008×10^8	2.712×10^7
0.2	389.977	1.068×10^{-5}	-1.976×10^{13}	2.670×10^{12}	-8.055×10^{-9}	-3.203×10^8	4.327×10^7

Dacă în ecuațiile (1.10) și (1.11) fluxurile proprii și cele cuplate sunt considerate pozitive, rezultă că este necesar ca L_{TT} , L_{T1} și L_{11} să fie pozitivi. Pe de altă parte, L_{T1} și L_{11} sunt pozitivi numai dacă este îndeplinită condiția $(r_o + c_{p1}t - c_{p2}t) \frac{DT}{T} > \frac{R}{c_1 c_2} \cdot \frac{T}{p} Dp_1$. Se mai poate observa că semnele coeficienților L_{Te1} și L_{Te2} , respectiv L_{1e1} și L_{1e2} , corespunzători gradientilor energiilor cinetice ai vaporilor și aerului uscat, sunt opuse, ceea ce indică o deplasare în sensuri opuse a celor doi componenți ai aerului în stratul limită.

În încheierea acestui subcapitol se face o comparație între criteriul Nusselt calculat în cazul curgerii aerului cald de-a lungul unei plăci plane și criteriul Nusselt calculat pe baza ecuației criteriale propuse de Nesterenko (1.4). Pentru o curgere laminară cu $Pr > 0.6$, ecuația criterială indicată în [C1] este:

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1.43)$$

Ecuția propusă de Nesterenko în cazul transferului de căldură însoțit de evaporarea care are loc la suprafața liberă a unui lichid, similară cu ecuația (1.4), indicată mai devreme, este:

$$Nu_x = 2 + A \cdot Pr^{0.33} Re_x^n Gu^m \quad (1.44)$$

Variația criteriului Nusselt obținut din cele două ecuații criteriale este indicată în figura 1.10.

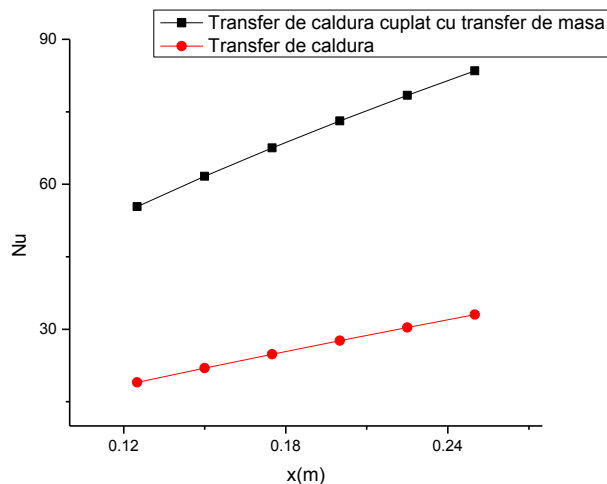


Fig. 1.10. Variația criteriului Nusselt de-a lungul plăcii plane

Se observă că invariantul Nusselt este sensibil mai mare în procesul de transfer de căldură cuplat cu transferul de masă decât în cazul transferului pur de căldură, ceea ce arată că transferul de masă contribuie la intensificarea transferului de căldură.

1.6. Analiza experimentală a stratului limită

1.6.1. Tunelul experimental de uscare

Schema de principiu a tunelului experimental de uscare, existent în laboratorul de Transfer de căldură al Universității Transilvania din Brașov, este prezentată în figura 1.11.

Instalația experimentală de uscare constă dintr-un tunel aerodinamic cu circuit închis, de secțiune dreptunghiulară 1, prevăzut cu o celulă de măsurare 2. Pentru reducerea pierderilor

de căldură în mediul exterior, tunelul este izolat termic. Circulația aerului se realizează cu ajutorul unui ventilator centrifugal 3, care aspiră aer proaspăt și parțial aer utilizat, recirculat.

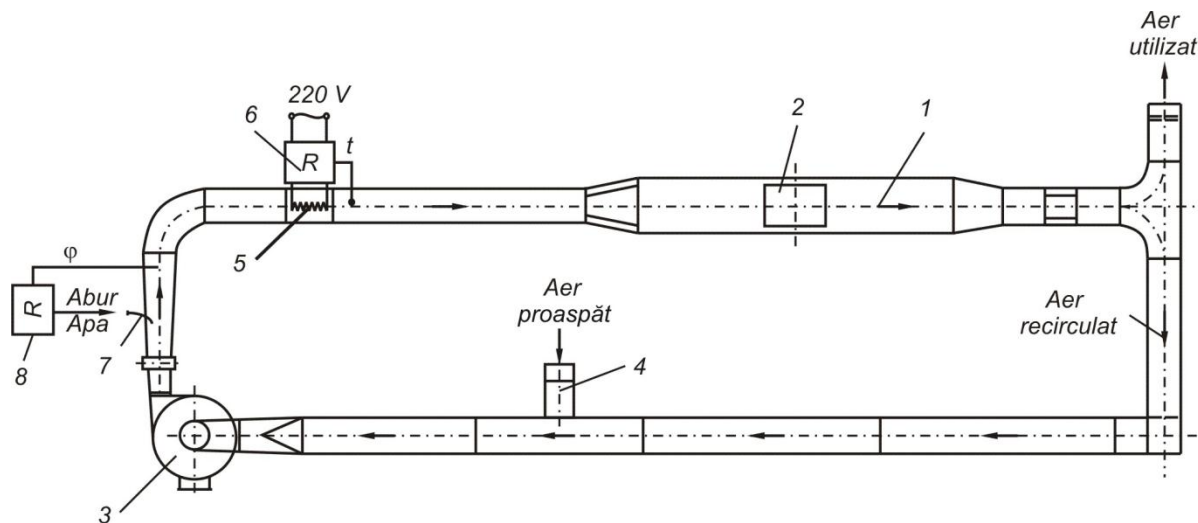


Fig. 1.11. Schema de principiu a tunelului experimental de uscare (adaptat după [Ș12])

Reglarea vitezei aerului în instalație se efectuează cu ajutorul unei clapete 4, situată în racordul de aspirație al ventilatorului și a unui variator de turație.

Încălzirea aerului se realizează cu ajutorul unei baterii de rezistențe electrice 5 montate în aval de ventilator, având posibilitatea reglării tensiunii și intensității curentului electric. Pentru menținerea constantă a temperaturii aerului din instalație, ea este echipată cu un sistem de reglare automată a temperaturii 6.

Pentru realizarea umidificării aerului în condițiile impuse de regimul de uscare, instalația este prevăzută cu un generator de abur, care injectează abur și apă în curentul de aer prin intermediul unui injector 7. Reglarea umidității aerului se realizează cu ajutorul clapetelor amplasate pe coloanele de evacuare a aerului utilizat și de aspirație a aerului proaspăt și a unui sistem de reglare automată a umidității relative 8.

Măsurarea parametrilor aerului în planuri diferite, paralele cu suprafața epruvetei, s-a realizat prin deplasarea probei în direcție verticală prin intermediul unui dispozitiv suport. El a fost conceput și realizat de asemenea și pentru cântărirea epruvetei (în procesul de uscare ea își reduce masa ca urmare a evaporării umidității), cu scopul determinării umidității ei prin stabilirea diferențelor de masă. Dispozitivul este montat pe un actuator electric, care permite deplasarea uniformă în plan vertical a dispozitivului, cu un pas minim de 0.01 mm.

1.6.2. Pregătirea epruvetelor din lemn

Epruvetele utilizate au fost din lemn de brad (*Abies Alba*), o specie de rășinoase cu largă aplicabilitate practică. La pregătirea lor s-a ținut seama ca proprietățile fizice să fie similare pentru întregul lot experimental. S-au debitat patru epruvete în formă de plăci de lungime 240 mm, lățime 240 mm, dimensiuni determinate de dimensiunile celulei de măsurare din tronsonul principal al instalației de uscare, și grosime 20 mm.

Pentru menținerea stabilității formei geometrice a epruvetelor și a planeității lor în timpul uscării, având în vedere anizotropia lemnului, ele s-au debitat radial în raport cu suprafețele de evaporare. De asemenea, pentru a studia procesul de transfer de căldură și de masă numai pe suprafețele principale de evaporare ale epruvetelor, canturile s-au acoperit cu un strat de adeziv poliuretanic monocomponent cu întărire umedă. Deci, direcția fluxurilor de căldură și de masă corespunde cu direcția tangențială a lemnului.

Pentru evitarea uscării naturale a epruvetelor debitate din lemn verde, ele s-au păstrat imersate în apă înainte de a fi introduse în tunelul de uscare. De aceea, umiditatea medie inițială a epruvetelor de lemn a fost ridicată (peste 60%).

1.6.3. Efectuarea măsurărilor de viteză, temperatură și umiditate ale aerului în stratul limită

S-a impus pentru început efectuarea unui calcul aerodinamic și termic al tunelului experimental de uscare pentru alegerea ventilatorului și a bateriei de rezistențe electrice de încălzire. S-au adoptat o viteză a aerului în tunelul de uscare de 1.5 m/s și o temperatură a aerului egală cu 80°C.

Pe baza vitezei aerului, dimensiunilor tunelului experimental de uscare și a coeficienților de pierderi de presiune determinați s-a obținut o pierdere totală de presiune egală cu 4.7 N/m² și un debit volumic de aer egal cu 0.038 m³/s (137.025 m³/h).

Pe baza calculului debitului de aer s-a determinat puterea termică a instalației experimentale în condițiile în care aerul se încălzește până la 80 °C, la o temperatură a aerului exterior de 15°C, obținându-se o valoare de 2.4 kW. S-au determinat și pierderile de căldură de la aerul cald din interiorul tunelului la aerul exterior, rece și a rezultat valoarea de 2 kW.

S-a calculat de asemenea căderea de temperatură pe lungimea tunelului de uscare în condițiile actuale de izolare termică. Plecând de la temperatura aerului încălzit de bateria de rezistențe egală cu 80 °C s-a obținut temperatura la distanța de 10 m, de exemplu, ca fiind egală cu 57.45 °C, căderea de temperatură fiind deci egală cu 22.55 °C. Au rezultat pierderi foarte mari de căldură pe lungimea tunelului experimental de uscare ca urmare a unei izolări necorespunzătoare, care au condus la condensarea vaporilor de apă injectați în curentul de aer și la neatingerea umidităților ridicate cerute de regimul de uscare (peste 60%).

Având în vedere influența parametrilor aerului (ca agent de uscare) asupra transferului de căldură și de masă pe suprafețele de evaporare ale epruvetelor din lemn, cât și asupra calității lemnului uscat, s-a adoptat următorul regim de uscare:

- Viteza medie: $u = 1.4 \text{ m/s}$
- Temperatura medie: $t = 55^\circ\text{C}$
- Umiditatea relativă medie: $\varphi = 50\%$

Pentru determinarea câmpurilor de viteză, temperatură și umiditate în straturile limită ale suprafeței de evaporare a epruvetei de lemn s-a aplicat un singur regim de uscare experimental, impus de condițiile actuale de măsurare și s-au parcurs următoarele etape:

- măsurarea vitezei aerului în plan vertical, în diferite puncte pe înălțimea secțiunii tunelului și apoi s-a calculat viteza medie;
- măsurarea temperaturii și umidității relative a aerului în diferite puncte într-un plan paralel cu suprafața de evaporare;
- determinarea masei probei de lemn.

Pentru efectuarea acestor determinări experimentale s-au utilizat sonde de măsurare a vitezei, temperaturii și umidității relative a aerului de la firma KIMO (AMI 300) și o balanță tehnică AXIS (precizia 0.01 g).

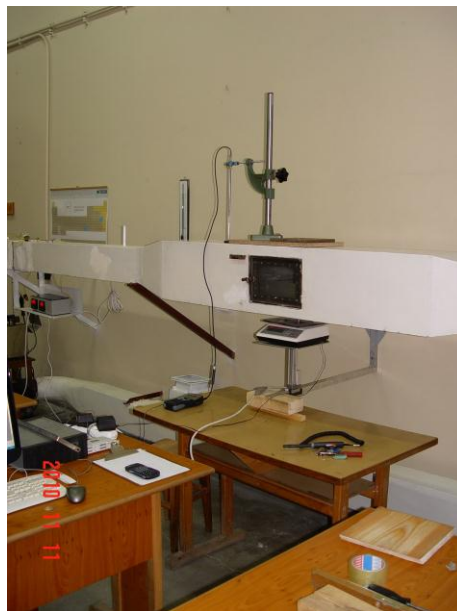


Fig. 1.12. Imagine a tunelului experimental de uscare în timpul măsurării parametrilor aerului [Ș8]

În figura 1.12 este prezentată o imagine a tunelului de uscare cu setul de aparate de măsură și cu proba de lemn pregătită pentru uscare.

Pe baza datelor experimentale și a ecuațiilor (1.38) –(1.40) s-au reprezentat cele trei straturi limită, indicate în figura 1.13.

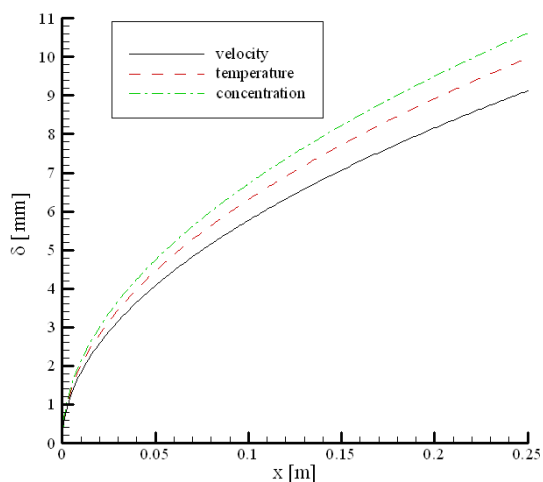


Fig. 1.13. Grosimile stratului limită dinamic, termic și de difuzie obținute experimental

Se observă aceeași amplasare relativă a straturilor limită în cazul ambelor metode, numerică și experimentală. De asemenea, se observă o bună concordanță a rezultatelor numerice și experimentale în cazul grosimii straturilor limită de viteză și temperatură. În cazul grosimii stratului limită de difuzie, rezultatele numerice (figura 1.1) indică o grosime mai mare decât cele experimentale. Această diferență poate fi pusă pe seama analogiei transferului de căldură și de masă (ecuațiile (1.39) și (1.40)), dar și a diferenței între datele utilizate la analiza numerică și datele regimului de uscare experimental.

În figura 1.14 este prezentată variația umidității medii a lemnului pe durata de uscare (curba cinetică de uscare).

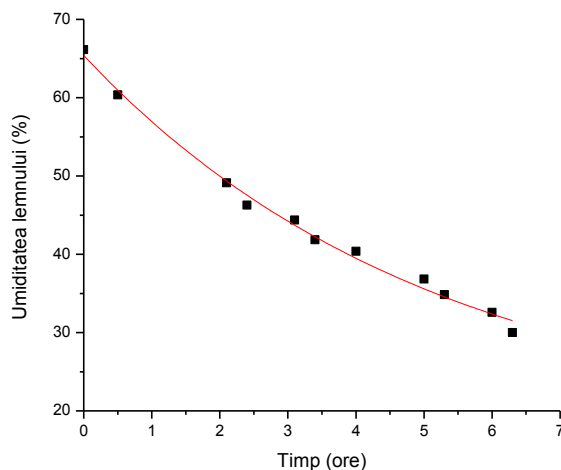


Fig. 1.14. Variația umidității lemnului pe durata uscării

Se observă o scădere liniară a umidității la începutul uscării (în primele 2.5 ore), ceea ce semnifică o viteză constantă de uscare. În această perioadă, temperatura suprafeței lemnului rămâne constantă și este egală cu temperatura de saturație adiabată a aerului [L5].

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol fac parte din raportul tehnico-științific al proiectului CNCSIS tip PN II-ID-PCE, nr. 723/2009: *Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la optimizarea procesului de uscare a materialelor capilar-poroase*, dar au fost publicate și în:

1. Șova D., Bedelean B. (2009) The characteristics of heat and mass transfer during evaporation from free surfaces, International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millenium” (proceedings), pp. 125-132.

2. Șova D., Postelnicu A. (2009) Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul transferului de căldură și de masă la suprafața corpurilor în procesul de uscare, PRO LIGNO, vol. 5, issue 4, pp. 65-75.

3. Postelnicu A., Șova D. (2010) Assessment of the particularities of heat and mass transfer

processes at the surface of capillary-porous materials, 11th International IUFRO Wood Drying Conference "Recent Advances in Wood Drying" (proceedings), 18-22 January 2010, Skellefteå.

4. Șova D., Ungureanu, V.B., Postelnicu A. (2012) Tunelul experimental de uscare – de la teorie la practică, PRO LIGNO, vol. 8, issue 1, pp. 15-27.

Capitolul 2. Optimizarea regimurilor de uscare ale lemnului prin metoda proiectării experimentelor

2.1. Simularea uscării

Uscarea convectivă a lemnului are rolul important de a îmbunătăți proprietățile mecanice și tehnologice ale lemnului. Durata în care lemnul ajunge la conținutul de umiditate final în timpul uscării depinde de agresivitatea regimului de uscare și de caracteristicile camerei de uscare. Alegerea unui regim corect de uscare este dificilă. De exemplu, un regim agresiv conduce la un timp scurt de uscare, dar tensiunile dezvoltate în interiorul lemnului sunt suficient de mari pentru a produce defecte, cum ar fi crăpături ale suprafeței și capetelor și deformări. Pe de altă parte, un regim de uscare moale conduce la un timp de uscare mai lung decât este necesar și, prin urmare, la tensiuni de uscare mai mici. În consecință, există un compromis între timpul de uscare și calitatea lemnului uscat, atunci când urmează să fie elaborat un regim de uscare [P3].

Un regim de uscare constă din trei parametri, temperatură, umiditate relativă și viteză a aerului. Rolul temperaturii este de a stimula evaporarea apei din lemn. Valoarea ei este aleasă în funcție de specie și de conținutul de umiditate al lemnului pentru a evita tensiunile în timpul uscării. Umiditatea relativă este un alt parametru important al procesului de uscare convectivă, deoarece o umiditate relativă prea mică conduce la tensiuni mari în interiorul lemnului, rezultând astfel o calitate inferioară a lemnului uscat. Pe de altă parte, o umiditate relativă prea mare conduce la prelungirea timpului de uscare a lemnului. O umiditate relativă prea mare determină și apariția mușgaiului și/sau a decolorărilor [P3]. Rolul vitezei aerului este important până când umiditatea lemnului scade sub punctul de saturație a fibrei (FSP), care este aproximativ 30% pentru majoritatea speciilor.

Există diferite metode de alcătuire a regimurilor de uscare bazate în principal pe date experimentale. O scurtă descriere a metodelor aplicate pentru a genera un regim de uscare este indicată în [P2].

De-a lungul anilor, cercetătorii au depus eforturi substanțiale pentru a dezvolta modele matematice pentru o mai bună înțelegere și optimizare a procesului de uscare [S10]. Un model practic (TORKSIM) a fost dezvoltat de Salin [S2]. El poate fi utilizat la optimizarea regimului de uscare și la îmbunătățirea procesului de uscare.

Programul TORKSIM a fost verificat prin 28 de măsurări efectuate la procese complete de uscare, iar conținutul final de umiditate măsurat și simulat a condus la o abatere standard de 1.4% [S2, S3]. Programul a fost de asemenea testat de Tamme et al. [T1]. Ei au validat rezultatele simulării cu rezultatele experimentelor de uscare industrială și de laborator.

Programul TORKSIM se bazează pe informații privind proprietățile lemnului, regimul de uscare și modelul camerei de uscare, iar rezultatele constau în timpul de uscare, consumul de energie, calculul costurilor de uscare și aspecte de calitate.

În cadrul cercetărilor prezentate în acest capitol, uscarea convectivă a fost simulată într-o cameră de uscare la scară redusă (figura 1.11), fiind formată dintr-o conductă de aer cu climă controlată, de secțiune dreptunghiulară (145×175 mm) și cu o secțiune de testare dreptunghiulară (250×300×1500 mm).

Datele de intrare ale simulării în programul TORKSIM au fost:

- specia de lemn: molid (*Picea abies*)
- grosimea plăcii: 20 mm
- conținutul inițial de umiditate al lemnului: 90%; 60%; 30%
- conținutul final de umiditate al lemnului: 10%

- ▣ regimul de uscare: în simularea uscării au fost utilizate regimurile de uscare bazate pe conținutul de umiditate

- ▣ vitezele aerului au fost alese dintr-o gamă de valori utilizate în mod obișnuit în camera de uscare industrială pentru uscarea molidului (2-3 m/s)

- ▣ temperatura aerului a variat între 50°C și 75°C

- ▣ umiditatea relativă a aerului a variat între 40% și 58%

- ▣ modelul camerei de uscare: simularea a fost realizată pentru uscarea unei singure plăci în camera de uscare la scară redusă, programul TORKSIM bazându-se pe aceeași abordare.

Datele de ieșire ale simulării au fost:

- ▣ timpul de uscare: timpul necesar pentru uscarea probei de molid, de la conținutul inițial de umiditate (90%; 60%; 30%) până la conținutul mediu de umiditate final (aproximativ 10%).

- ▣ consumul de energie: a inclus pierderile de energie prin transfer termic și datorită aerului evacuat, căldura acumulată în diferitele componente ale instalației și energia consumată pentru evaporarea umidității lemnului.

- ▣ tensiunea relativă: indică riscul apariției crăpăturilor de suprafață. Valorile tensiunii relative calculate cu programul TORKSIM exprimă rezistența la tracțiune a lemnului. Crăpăturile încep să apară la o valoare a tensiunii relative de aproape 0.33 și cresc pe măsură ce tensiunea crește [T3]. Tensiunea relativă maximă care a apărut în stratul de suprafață până la sfârșitul uscării a fost obținută din program.

Regimul de uscare trebuie elaborat astfel încât tensiunile de uscare să nu depășească rezistența lemnului la nici o temperatură și conținut de umiditate.

2.2. Analiza statistică

Până în prezent, metoda **R**(esponse)**S**(urface)**M**(ethodology), care este o clasă de proiectare a experimentelor (Design of Experiments), a fost aplicată pe scară largă la optimizarea uscării alimentelor ([D3], [K3]) și a medicamentelor ([N1], [M1]). Metoda RSM permite reducerea numărului de experimente, ceea ce este necesar când se estimează mai mulți parametri și interacțiunile dintre aceștia. Astfel, timpul și efortul experimental sunt mult reduse.

Cercetările prezentate în continuare au avut rolul de a evalua în ce măsură metoda RSM poate fi utilizată pentru a obține combinația optimă de parametri ai aerului într-o cameră de uscare la scară redusă pe baza criteriilor de minimizare a timpului de uscare, a consumului de energie și a tensiunii relative. Primul și al treilea criteriu au fost de obicei prioritizați în comparație cu reducerea consumului de energie [A1]. Dar, eficiența uscării convective a lemnului trebuie să ia în considerare toți termenii: timp de uscare, consum de energie și calitatea produsului.

Deci, metoda RSM a fost utilizată pentru a estima interacțiunea și efectele pătratice ale variabilelor de intrare asupra răspunsurilor (datelor de ieșire), putându-se în acest fel îmbunătăți sau optimiza un proces [N3]. Mai multe detalii despre bazele teoretice ale modelării cu metoda RSM sunt indicate în [W2]. Cele trei variabile de intrare folosite în acest caz au fost temperatura, viteza și umiditatea relativă a aerului, iar răspunsurile au fost timpul de uscare, consumul de energie și tensiunea relativă. Variabilele de intrare au fost selectate dintre parametri de uscare ai regimurilor de uscare în conformitate cu cerințele proiectării experimentale (Box-Wilson Central Composite Design, notat cu CCD), care a fost utilizată în această cercetare. Acest tip de proiectare experimentală include cinci niveluri ale fiecărui factor: axial sus ($-\alpha$), factorial jos (-1), centru (0), factorial sus (+1) și

axial sus ($+\alpha$), conform figurii 2.1.

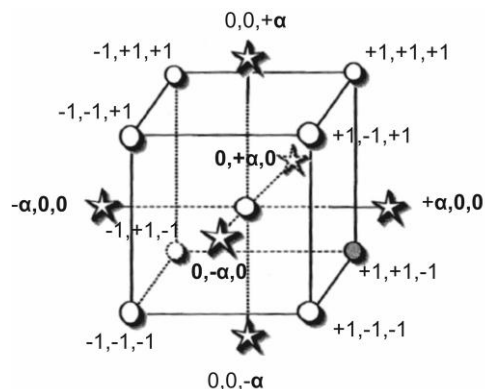


Fig. 2.1. Proiectare tip Face-centered central composite design (FCD) [W2]

Valorile codificate și reale pentru fiecare factor sunt prezentate în tabelul 2.1. Numărul de rulări impus de CCD pentru un număr de 3 factori a fost egal cu 20 (tabelul 2.2).

Acest tip de proiectare experimentală permite obținerea unei ecuații polinomiale de ordinul al doilea de forma:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (2.1)$$

în care: Y reprezintă răspunsul (dată de ieșire), X_i sunt variabilele principale (date de intrare), X_iX_j sunt interacțiunile variabilelor, X_i^2 sunt formele pătratice ale variabilelor, b_i sunt coeficienți. Un coeficient pozitiv denotă că răspunsul crește o dată cu creșterea variabilei, iar un coeficient negativ denotă că răspunsul crește o dată cu scăderea variabilei. Analiza de regresie și analiza varianței (ANOVA) au fost efectuate pentru evaluarea coeficienților și pentru determinarea semnificației parametrilor modelului pentru fiecare variabilă.

ANOVA include valoarea F , care indică semnificația statistică la nivelurile 99% și 95%. Precizia modelului a fost verificată prin coeficientul de determinare.

Tabelul 2.1. Factori și niveluri utilizate în proiectarea factorială

Factori	Niveluri				
	($\alpha = -1.68$)	(-1)	0	(+1)	($\alpha = + 1.68$)
T, °C	41.47	50	62.5	75	83.52
RH, %	33.86	40	49	58	64.13
V, m/s	1.65	2	2.5	3	3.34

Tabelul 2.2. Variabilele de proces independente în proiectarea CCD și răspunsurile

Nr. crt.	T (°C)	RH (%)	V (m/s)	R ₁ : Durată de uscare (ore)			R ₂ : Consum de energie (kWh/m ³)			R ₃ : Tensiune relativă (-)		
				30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
1	75	40	2	14	17	20	79	171.7	267.2	0.32	0.31	0.31
2	62.5	64.1	2.5	64	69	71	105	197.3	287.3	0.32	0.31	0.31
3	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
4	50	40	2	41	47	50	99	215.7	330.7	0.43	0.43	0.42
5	50	58	2	88	95	97	109.8	211.4	310.5	0.38	0.37	0.37
6	75	58	3	20	24	26	77.9	166.6	252.8	0.29	0.29	0.28
7	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
8	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
9	62.5	49	1.65	30	36	40	87.5	185.7	282.7	0.34	0.34	0.33
10	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
11	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
12	75	58	2	21	26	30	78	167.6	256.3	0.28	0.28	0.27
13	62.5	49	2.5	28	32	35	86	182.6	279.4	0.36	0.35	0.35
14	41.47	49	2.5	84	90	92	106.6	222.2	336.5	0.47	0.46	0.45
15	83.52	49	2.5	11	14	16	71.7	159	245.0	0.27	0.27	0.27
16	75	40	3	13	16	18	78	172.6	263.6	0.32	0.32	0.32
17	62.5	33.8	2.5	22	25	27	87.7	196.6	303.8	0.39	0.39	0.38
18	62.5	49	3.34	27	30	32	85.3	181.3	277.1	0.36	0.36	0.36
19	50	40	3	39	48	45	98.4	213.7	328.4	0.45	0.44	0.44
20	50	58	3	84	88	89	108	208.1	306.9	0.40	0.40	0.39

Optimizarea uscării (minimizarea timpului de uscare, a consumului de energie și a tensiunii

relative) a fost realizată prin utilizarea funcției de dezirabilitate (desirability function), una dintre cele mai utilizate metode din industrie pentru optimizarea proceselor cu răspunsuri multiple [N3].

Această metodă de optimizare identifică condițiile X , care oferă cele mai dezirabile valori ale răspunsurilor. Pentru fiecare răspuns $Y_i(X)$, o funcție de dezirabilitate $d_i(Y_i)$ atribuie numere între 0 și 1 valorilor posibile ale lui Y_i , unde $d_i(Y_i) = 0$ reprezintă o valoare complet indezirabilă a lui Y_i , iar $d_i(Y_i) = 1$ reprezintă o valoare a răspunsului complet dezirabilă sau ideală. Dezirabilitatea individuală este apoi combinată folosind media geometrică, din care rezultă dezirabilitatea generală, D .

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2)\dots d_k(Y_k))^{1/k} \quad (2.2)$$

unde k reprezintă numărul de răspunsuri.

În cazul de față, obiectivul urmărit a fost de a determina variabilele optime ale procesului, pentru care toate răspunsurile sunt minime, iar dezirabilitatea globală maximă. De asemenea, a fost efectuată o comparație între răspunsurile anticipate (estimate) și cele simulate.

S-a utilizat pachetul statistic Design-Expert, versiunea 9 (Stat-Ease Inc.), pentru proiectarea experimentelor și a aplicațiilor RSM, analiza de regresie, evaluarea statistică a modelelor, optimizarea proceselor și reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns.

2.3. Rezultatele proiectării cu RSM

2.3.1. Rezultatele simulării și modelării cu RSM

Modelele RSM au fost dezvoltate pe baza datelor simulate în conformitate cu CCD (tabelul 2.2) pentru fiecare răspuns. Toate modelele au fost semnificative la un nivel de 99%.

Conform ANOVA (tabelul 2.3), toți factorii principali au fost semnificativi statistic la un nivel de 95%, cu excepția vitezei din modelul elaborat pentru consumul de energie, când conținutul inițial de umiditate a fost egal cu 30%, respectiv, 60%. Aceasta se explică prin faptul că la un conținut inițial de umiditate de 90% timpul de uscare este mai lung, iar viteza devine semnificativă în modelul dezvoltat pentru consumul de energie.

În privința interacțiunilor dintre factori se pot evidenția următoarele aspecte:

■ interacțiunea dintre temperatură și umiditate relativă a fost semnificativă din punct de vedere statistic la modelele elaborate pentru timp și tensiune relativă, pentru fiecare conținut inițial de umiditate (90%, 60%, respectiv 30%). Acest lucru arată că temperatura și umiditatea relativă nu acționează independent în procesului de uscare, ci există o interacțiune între ele. Prin urmare, pot exista diferite combinații care pot influența negativ sau pozitiv timpul de uscare și/sau tensiunea de uscare care se dezvoltă în lemn. În orice caz, efectul acestei interacțiuni este mai puțin puternic decât efectele individuale ale ambilor parametri (tabelul 2.3). Interacțiunea dintre temperatură și umiditate relativă a fost semnificativă statistic pentru modelul dezvoltat pentru consumul de energie numai atunci când conținutul de umiditate al lemnului a fost 90%. Dar, acțiunea combinată a ambilor parametri asupra consumului de energie are un efect mai mic la acest conținut inițial de umiditate decât acțiunea individuală a fiecărui parametru. În ceea ce privește celelalte conținuturi inițiale de umiditate (30% și 60%), interacțiunea dintre temperatură și umiditate relativă nu are nici o influență asupra consumului de energie, influența individuală fiind dominantă (tabelul 2.3).

■ interacțiunea dintre temperatură și viteză a fost semnificativă la modelul dezvoltat pentru timpul de uscare, când conținutul de umiditate a fost de 90%. Acest efect arată că pentru o anumită combinație de temperatură și viteză se poate obține o reducere a timpului

de uscare în cazul în care conținutul inițial de umiditate este de 90%.

Tabelul 2.3. Rezultatele ANOVA ale diferitelor modele (în termeni de factori codificați)

Variabile / factori	Valoarea F								
	R ₁ : Durată de uscare			R ₂ : Consum de energie			R ₃ : Tensiune relativă		
	30 %	60 %	90 %	30 %	60 %	90 %	30 %	60 %	90 %
Model	1430 ***	700 ***	3964 ***	58 ***	145 ***	282 ***	2389 ***	1508 ***	2227 ***
A: temperatură	8115 **	4108 **	2275 6 **	427 **	1203 **	2264 **	18568 **	11527 **	16274 **
B: umiditate relativă	2690 **	1263 **	7689 **	38 **	5.5 **	123 **	2536 **	1749 **	2827 **
C: viteză	14 **	14 **	241 **	1	2.57	7.46 **	176 **	154 **	275 **
Interacțiunea AB	895 **	339 **	2088 **	12	0.001	10.1 **	20 **	21 **	53 **
Interacțiunea AC	2.36	0.61	19 **	0.04	0.73	0.03	13 **	12 **	16 **
Interacțiunea BC	0.59	5.45 **	9.8 **	0.002	0.27	0.03	0.83	1.6	3.3
A ² : efectul pătratic	788 **	397 **	2020 **	4.34	25 **	48.3 **	162 **	78 **	92.81 **
B ² : efectul pătratic	463 **	225 **	1093 **	44.49 **	80 **	97.07 **	10 **	8.6 **	21.71 **
C ² : efectul pătratic	0.16	1.4	4.71	0.11	0.36	0.15	3.65	8.6 **	14.38 **

*** semnificativ statistic la nivelul $\alpha = 0.01$; ** semnificativ statistic la nivelul $\alpha = 0.05$; valorile fără asterisc nu sunt semnificative statistic

Efectul acestei interacțiuni este mai mic decât efectul fiecărui parametru și decât efectul interacțiunii dintre temperatură și umiditate relativă (tabelul 2.3 și figura 2.2). De asemenea, această interacțiune a fost semnificativă la modelul dezvoltat pentru tensiune relativă, indiferent de conținutul inițial de umiditate. Din nou, unele combinații de

temperatură și viteză pot influența pozitiv sau negativ tensiunea de uscare care se dezvoltă în timpul uscării pentru toate cele trei conținuturi inițiale de umiditate care au fost analizate. Efectul acestei combinații este mai mic în comparație cu efectul fiecărui parametru în parte și cu interacțiunea dintre temperatură și umiditate relativă la modelul tensiunii de uscare.

■ interacțiunea dintre umiditate relativă și viteză a fost semnificativă numai pentru modelul dezvoltat pentru timpul de uscare, când conținutul inițial de umiditate a fost de 60%, respectiv 90%. Aceasta înseamnă că o anumită combinație între umiditatea relativă și viteză poate reduce timpul de uscare, atunci când umiditatea inițială este de 60%, respectiv 90%. Oricum, efectul acestei combinații este mai mic decât cel al interacțiunii dintre temperatură și umiditate relativă (tabelul 2.3). De asemenea, efectul individual al ambilor parametri este mai important. La un conținut inițial de umiditate de 60%, interacțiunea dintre umiditatea relativă și viteză este mai puternică decât interacțiunea dintre temperatură și viteză.

Efectele pătratice ale temperaturii și umidității relative au fost semnificative statistic la un nivel de 95% la modelele corespunzătoare timpului de uscare, energiei și tensiunii relative. O excepție a fost modelul energiei, la care efectul pătratic al temperaturii nu a fost semnificativ pentru conținutul inițial de umiditate de 30%. Efectul pătratic al vitezei a fost semnificativ statistic numai pentru modelul tensiunii relative, când conținutul inițial de umiditate a fost egal cu 60%, respectiv 90%. Acest efect este mai puțin puternic decât efectele pătratice ale temperaturii și umidității relative (tabelul 2.3).

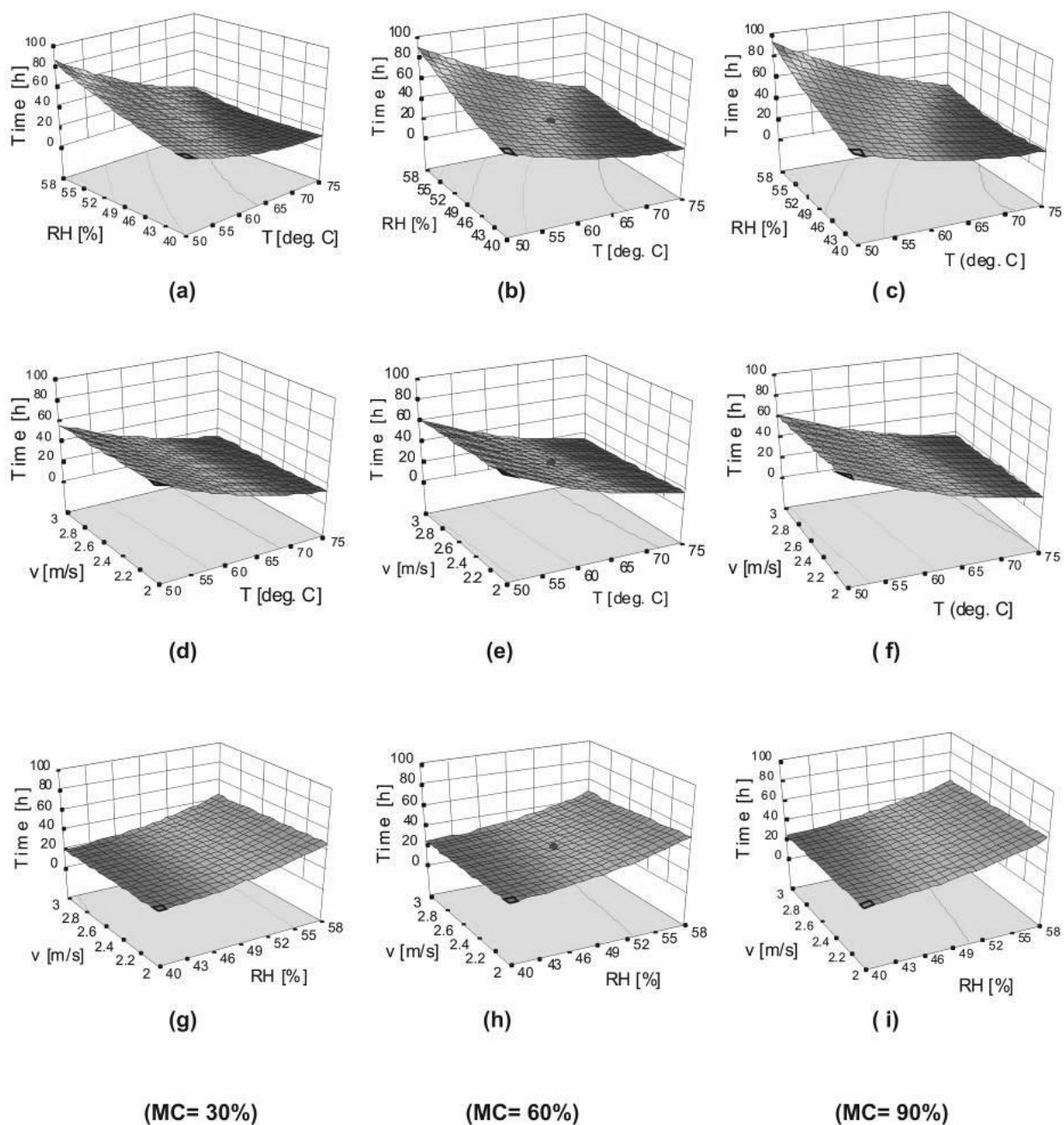


Fig. 2.2. Graficul suprafeței de răspuns care indică efectele parametrilor de uscare asupra timpului de uscare: (a, b și c) temperatura și umiditatea relativă la viteza aerului de 2.5 m/s; (d, e și f) temperatura și viteza la umiditatea relativă a aerului de 49%; (g, h și i) viteza și umiditatea relativă la temperatura aerului de 62.5 °C

Coeficienții de regresie ai ecuațiilor polinomiale de ordinul al doilea pentru variabilele procesului și coeficienții de determinare sunt indicați în tabelul 2.4.

Tabelul 2.4. Coeficienții de regresie ai modelelor polinomiale pentru variabilele de proces (în factori codificați)

Variabile / Factori	Coeficienți estimați								
	R ₁ : Durată de uscare			R ₂ : Consum de energie			R ₃ : Tensiune relativă		
	30%	60%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
Constante	28.01	31.99	35	85.99	182.6	279.39	0.36	0.36	0.35
T	-22.46	-23.64	-23.05	-11.79	-20.26	-28.59	-0.057	-0.056	-0.05
RH	12.93	13.11	13.40	3.54	-1.38	-6.67	-0.021	-0.022	-0.02
V	-0.96	-1.40	-2.38	-0.59	-0.94	-1.64	0.005	0.006	0.006
T x RH	-9.75	-8.88	-9.12	-2.59	-0.02	2.50	0.002	0.003	0.004
T x V	0.50	0.38	0.88	0.16	0.65	-0.15	-0.002	-0.002	-0.002
V x RH	-0.25	-1.12	-0.63	-0.037	-0.40	-0.15	0.0005	0.0008	0.001
T ²	6.82	7.15	6.69	1.16	2.85	4.07	0.005	0.004	0.003
RH ²	5.22	5.39	4.92	3.70	5.10	5.76	-0.001	-0.0015	-0.0019
V ²	0.098	0.44	0.32	0.18	0.34	0.23	-0.0007	-0.0015	-0.0015
R² estimat	0.99	0.98	0.99	0.85	0.94	0.97	0.99	0.99	0.99

Coeficienții de determinare sunt mari, foarte apropiați de 1, arătând că un procent ridicat din date este apropiat de regresia optimă.

Efectele variabilelor procesului asupra răspunsurilor sunt ilustrate în figurile 2.2, 2.3 și 2.4. Acestea arată suprafețele de răspuns tridimensionale și efectele a câte doi factori diferiți asupra răspunsurilor.

Durata de uscare a fost influențată în cea mai mare măsură de temperatură, care a avut un efect pătratic, scăzând considerabil o dată cu creșterea temperaturii, dar crescând ușor o dată cu creșterea conținutului inițial de umiditate (figura 2.2 și tabelul 2.4). Umiditatea relativă a aerului a fost al doilea factor care a influențat timpul de uscare.

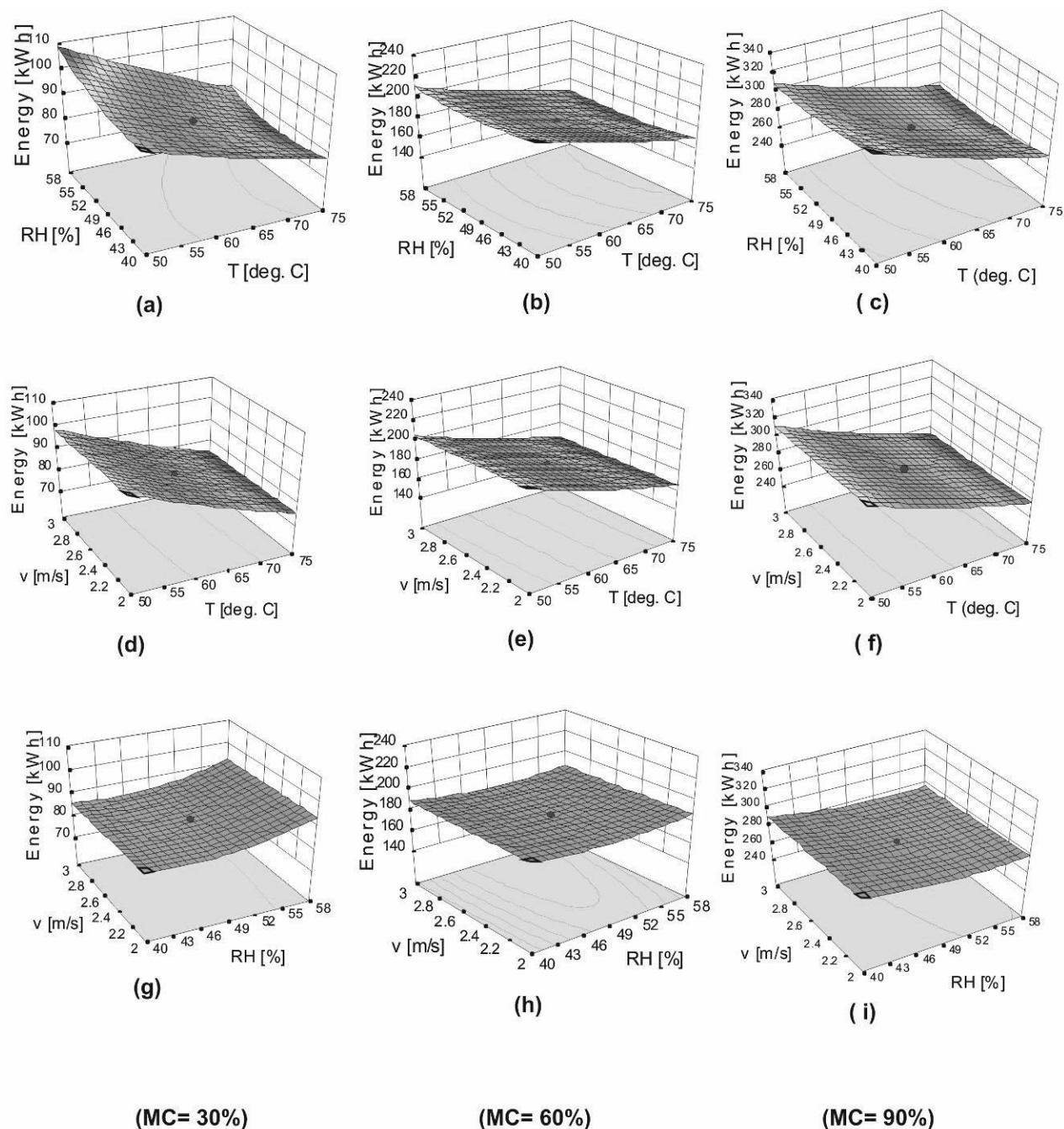


Fig. 2.3. Graficul suprafeței de răspuns care indică efectele parametrilor de uscare asupra consumului de energie: (a, b și c) temperatura și umiditatea relativă la viteza aerului de 2.5 m/s; (d, e și f) temperatura și viteza la umiditatea relativă a aerului de 49%; (g, h și i) viteza și umiditatea relativă la temperatura aerului de 62.5 °C

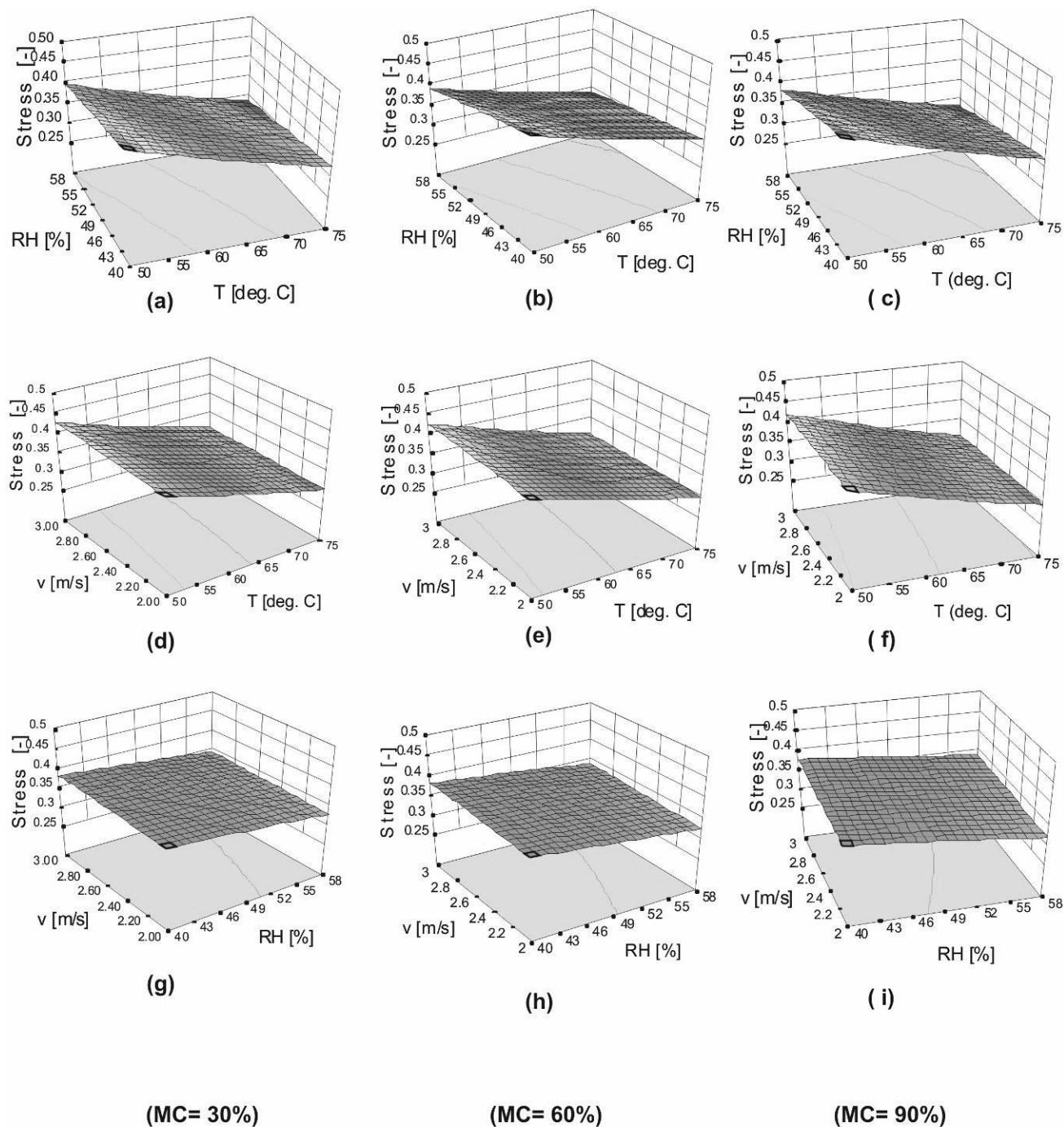


Fig. 2.4. Graficul suprafeței de răspuns care prezintă efectele parametrilor de uscare asupra tensiunii relative: (a, b și c) temperatura și umiditatea relativă la viteza aerului de 2.5 m/s; (d, e și f) temperatura și viteza la umiditatea relativă a aerului de 49%; (g, h și i) viteza și umiditatea relativă la temperatura aerului de 62.5 °C

Creșterea umidității relative a avut un efect negativ asupra timpului de uscare, crescând o dată cu creșterea conținutului inițial de umiditate. Umiditatea relativă ridicată încetinește procesul de evaporare a umidității, crescând astfel timpul de uscare. Influența vitezei a fost mai puțin importantă. Rezultatele cercetărilor arată că o uscare rapidă se poate realiza în camere de uscare la temperaturi cât mai ridicate posibil și la umidități relative cât mai scăzute posibil, după cum a concluzionat și Bergman [B2].

Rezultatele privind consumul de energie arată, de asemenea, un efect important al temperaturii asupra consumului de energie prin valoarea coeficientului său ridicat, care scade o dată cu creșterea temperaturii procesului, mai evident la o umiditate relativă mai mare decât la o umiditate relativă mai mică (figura 2.3). Scăderea este mai evidentă la un conținut inițial de umiditate de 30%. Spre deosebire de durata de uscare, consumul de energie a scăzut ușor o dată cu creșterea umidității relative, la conținutul inițial de umiditate de 60%, respectiv 90%. La un conținut inițial de umiditate de 30%, consumul de energie a scăzut brusc o dată cu scăderea umidității relative. Acest rezultat este în concordanță cu afirmația că umiditatea relativă scăzută stimulează difuzia prin scăderea conținutului de umiditate la suprafața corpului, crescând viteza de difuzie [B2]. Pe măsură ce evaporarea umidității încetinește, căldura necesară pentru evaporarea umidității crește. Atât temperatura, cât și umiditatea relativă au influențat consumul de energie datorită efectelor pătratic. Viteza nu a fost un parametru semnificativ pentru consumul de energie. Analiza parametrilor de proces cu privire la tensiunea relativă a arătat că temperatura a avut o influență importantă asupra tensiunii relative, în timp ce viteza și umiditatea relativă nu au fost parametri importanți. Tensiunea de uscare a scăzut o dată cu creșterea temperaturii, mai evident la o umiditate relativă mai mare decât la o umiditate relativă mai

mică, la toate conținuturile inițiale de umiditate (figura 2.4).

Toate rezultatele arată concordanța cu afirmația că temperatura este cel mai important factor de proces, deoarece reprezintă cauza principală pentru apariția defectelor din fiecare categorie posibilă de defecte [B2].

2.3.2. Rezultatele optimizării

Programul Design-Expert a generat un șir de parametri de proces și răspunsuri, ordonat ierarhic, unde toate răspunsurile au fost evaluate în mod egal. Soluțiile optime cu cea mai mare valoare a dezirabilității globale sunt prezentate în tabelul 2.5. S-a efectuat o nouă simulare cu programul TORKSIM cu parametri optimi, iar rezultatele au fost comparabile cu cele estimate de model, confirmând o bună predictibilitate și validitate a modelului aplicat în proiectarea experimentală.

În concluzie, temperatura aerului a avut efectul cel mai important asupra tuturor rezultatelor uscării. Creșterea temperaturii a condus la scăderea tuturor datelor de ieșire ale uscării. Viteza a jucat un rol minor. De asemenea, interacțiunea dintre temperatură și umiditate relativă asupra rezultatelor a fost mai puternică decât celelalte interacțiuni. Efectul neliniar al temperaturii a fost mai important decât efectul umidității relative, atât pentru timpul de uscare, cât și pentru tensiune. Pentru consumul de energie, efectul neliniar al umidității relative a fost mai important decât efectul temperaturii. Parametrii medii ai aerului, și anume viteza de 3 m/s, temperatura de 72°C și umiditatea relativă de 44% au fost considerați optimi pentru uscarea convectivă a molidului, când conținutul inițial de umiditate a fost de 30%, 60%, respectiv 90%.

Tabelul 2.5. Parametrii optimi ai aerului și răspunsurile

Conținutul de umiditate		Temperatura aerului (°C)	Umiditatea relativă a aerului (%)	Viteza aerului (m/s)	Timpul de uscare (ore)	Consumul de energie (kWh/m ³)	Tensiunea relativă (-)	Dezirabilitatea (-)
30%	Predicția cu modelul polinomial	72.74	43.82	3	12.76	77.26	0.330*	0.94
	Simularea TORKSIM				16	77.6	0.329	-
	Eroarea relativă (%)				20	0.4	0.3	-
60%	Predicția cu modelul polinomial	71.96	44.60	2.96	16.21	170.85	0.330*	0.92
	Simularea TORKSIM				20	171.6	0.333	-
	Eroarea relativă (%)				19	0.44	0.9	-
90%	Predicția cu modelul polinomial	71.44	44.38	3	18.59	263.6	0.330*	0.91
	Simularea TORKSIM				22	265	0.330	-
	Eroarea relativă (%)				15.5	0.52	0	-

*Cerința a fost ca tensiunea relativă să fie egală cu valoarea 0.33

Valorile optime de răspuns obținute din simulare și din predicția modelului polinomial au fost apropiate, arătând că metoda RSM oferă informații valoroase, permițând o bună înțelegere a procesului dezvoltat într-un model de cameră de uscare la scară redusă.

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol au fost publicate în:

Șova D., Bedeleian B., Sandu V. (2016) *Application of Response Surface Methodology to optimization of wood drying conditions in a pilot-scale kiln*, Baltic Forestry, vol. 22, issue 2, pp. 348-356.

Alte cercetări preliminare legate de studiul influenței parametrilor de uscare asupra duratei de uscare și a consumului de energie au fost publicate în următoarele lucrări:

1. Șova D., Bedeleian B. (2013) *Statistical analysis of simulated wood drying schedules as regards drying time reduction in an experimental kiln*, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.715-720.

2. Bedeleian B., Șova D. (2013) *Revealing the relation between independent variables and drying time implemented in Torksim by means of artificial neural networks: a preliminary study*, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.721-728.

3. Șova D., Bedeleian B. (2014) *Effects of air parameters on drying time and energy consumption*, Revista Termotehnica, vol. 1, pp. 48-52.

Capitolul 3. Studiul apariției crăpăturilor superficiale pe durata uscării prin evaluarea câmpului de umiditate în lemn

3.1. Modelul matematic care descrie câmpul de umiditate în interiorul lemnului în timpul uscării convective

Transferul de căldură și de masă care se manifestă la suprafața corpurilor umede în timpul uscării convective este acompaniat de modificări ale proprietăților fizice și mecanice ale corpului. Aceste modificări pot conduce la defecte de calitate în cazul în care sunt aplicate regimuri de uscare neadecvate. O influență a transferului de căldură și de masă asupra lemnului supus procesului de uscare o reprezintă modificarea dimensiunilor și a formei datorită contragerii lemnului, ca urmare a variației umidității și temperaturii pe grosimea lui.

Evaporarea umidității de pe suprafață în stratul limită determină o modificare continuă a câmpului de umiditate în interiorul lemnului și de aici rezultă modificarea dimensiunilor în diferitele straturi ale lui pe durata uscării. Prin urmare, se dezvoltă la suprafața și în interiorul lemnului tensiuni, care conduc la crăpături în condițiile în care scăderea conținutului de umiditate depășește o limită maximă. Întrucât absența crăpăturilor este cerința fundamentală care se impune calității lemnului uscat, este necesară determinarea câmpului de umiditate în decursul procesului de uscare și adoptarea unui criteriu de similitudine care să permită caracterizarea câmpului de umiditate în momentul apariției crăpăturilor. Cauza principală de formare a tensiunilor o reprezintă gradientul de umiditate și rezultatul constă în micro- și macrofisuri.

Câmpurile de temperatură și de umiditate ale unui corp supus uscării convective pot fi determinate din soluția sistemului de ecuații diferențiale de transfer de căldură și masă

cuplate [L7]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 M + a_m \delta \nabla^2 T \quad (3.2)$$

în care: α (m^2/s) este coeficientul de difuzivitate termică, ε este un coeficient de transformare de fază din lichid în vapori, r (J/kg) este căldura latentă de vaporizare, c (J/kgK) este căldura specifică a corpului, a_m (m^2/s) este coeficientul de difuzie a umidității, δ (K^{-1}) este coeficientul termic datorat variației umidității (coeficient de termodifuzie). Temperatura și umiditatea sunt funcții de timp și spațiu (x, y, z), iar $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

În cazul plăcilor foarte lungi, cu grosimea $2R$ ($x=R, y=0, z=0$), considerând simetria transferului de căldură și de masă față de suprafețele plăcii, se pot scrie următoarele condiții inițiale:

$$t(x,0) = t_0 = \text{const} \quad (3.3)$$

$$M(x,0) = M_0 = \text{const} \quad (3.4)$$

în care: t_0 și M_0 sunt valorile inițiale constante ale temperaturii și umidității.

Condițiile la limită sunt:

$$\frac{\partial M(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad a_m \rho_0 (\nabla M)_s + a_m \rho_0 \delta (\nabla T)_s + J_1(\tau) = 0, \quad (3.5)$$

$$-k(\nabla T)_s + h(t_{air} - t(R, \tau)) - r(1 - \varepsilon)J_1(\tau) = 0$$

unde: indicele s se referă la suprafață ($x=R$), ρ_0 (kg/m^3) este densitatea corpului absolut uscat, $J_1(\tau)$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) este fluxul de masă pe unitatea de suprafață, k (W/mK) este coeficientul de conductivitate termică, h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) este coeficientul de transfer de căldură

prin convecție. ∇M și ∇T sunt gradientii de umiditate și temperatură. Dacă se neglijează difuzia datorată temperaturii ($\delta = 0$), atunci ecuațiile (3.1) și (3.5) devin:

$$\frac{\partial M(x, \tau)}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 M(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

$$a_m \rho_0 \frac{\partial M(R, \tau)}{\partial x} + J_1(\tau) = 0 \quad (3.7)$$

iar soluția indicată de Luikov pentru ecuația diferențială (3.6) este:

$$\begin{aligned} \frac{M_0 - M(x, \tau)}{M_0} = & \int_0^\tau \frac{J_1(\tau)}{R \rho_0 M_0} d\tau - Ki^*(\tau) \frac{R^2 - 3x^2}{6R^2} + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos \frac{n\pi x}{R} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{a_m \tau}{R^2}\right) \times \left[Ki^*(0) + \int_0^\tau \exp\left(\frac{n^2 \pi^2 a_m \tau}{R^2}\right) \frac{dKi(\tau)}{d\tau} d\tau \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

în care: $M(x, \tau)$ este valoarea locală a conținutului de umiditate, $Ki^*(\tau) = \frac{J_1(\tau)R}{a_m \rho_0 (M_0 - EMC)}$

reprezintă criteriul de similitudine higrometric Kirpichev.

Dacă apariția crăpăturilor are loc în perioada de uscare cu viteză constantă, când transferul de masă atinge intensitatea maximă și este constant în această perioadă ($\frac{dJ_1(\tau)}{d\tau} = 0$), atunci

se consideră că și criteriul de similitudine este constant în această perioadă ($\frac{dKi^*(\tau)}{d\tau} = 0$). În

aceste condiții, ecuația (3.8) devine:

$$\frac{M_0 - M(x, \tau)}{M_0 - EMC} = Ki^* \left[Fo^* - \frac{R^2 - 3x^2}{6R^2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos \frac{n\pi x}{R} \exp(-n^2 \pi^2 Fo^*) \right] \quad (3.9)$$

unde: $Fo^* = \frac{a_m \tau}{R^2}$ este criteriul higrometric Fourier, iar EMC este umiditatea de echilibru.

Creșterea valorii criteriului Fourier pe măsură ce uscarea avansează în timp, determină ca termenii seriei din ecuația (3.9) să devină repede convergenți, iar pentru valori începând cu $Fo^* \geq 0.54$ ei pot fi neglijați în raport cu primii doi termeni și astfel soluția poate fi scrisă sub

forma [L4]:

$$\frac{M_0 - M(x, \tau)}{M_0 - EMC} = Ki^* \left(Fo^* - \frac{R^2 - 3x^2}{6R^2} \right) \quad (3.10)$$

În acest caz, conținutul de umiditate local pe grosimea plăcii va fi o funcție liniară de timp datorită criteriului Fourier, iar distribuția lui pe grosimea plăcii este parabolică.

Considerând că formarea crăpăturilor are loc la suprafața plăcii în prima perioadă de uscare, când intensitatea transferului de masă este maximă, se poate adopta un criteriu de similitudine care să caracterizeze câmpul de umiditate care favorizează apariția crăpăturilor superficiale [Ș12], și anume:

$$K = \frac{M(0, \tau) - M(R, \tau)}{M_0 - EMC} \quad (3.11)$$

în care: $M(0, \tau)$ și $M(R, \tau)$ corespund conținutului de umiditate din centrul și de la suprafața plăcii la un moment de timp, M_0 reprezintă conținutul inițial de umiditate.

Ecuția (3.10) poate fi particularizată pentru $x = 0$ și $x = R$, obținându-se astfel două ecuații. Scăzând cele două ecuații obținute, rezultă o relație între criteriul de similitudine K și criteriul higrometric Kirpichev:

$$K = \frac{M(0, \tau) - M(R, \tau)}{M_0 - EMC} = \frac{1}{2} Ki^* \quad (3.12)$$

Pentru plăci cu o distribuție simetrică a conținutului de umiditate pe grosime, conținutul mediu de umiditate poate fi exprimat sub forma:

$$\bar{M}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R M(x, \tau) dx \quad (3.13)$$

și, înlocuind expresia lui $M(x, \tau)$ din ecuația (3.10) în ecuația (3.13), se obține după integrare următoarea ecuație:

$$\bar{M}(\tau) = M_0 - (M_0 - EMC)Ki^*Fo^* \quad (3.14)$$

Pentru un criteriu Ki^* constant, $\bar{M}(\tau)$ este o funcție liniară de τ . Prin diferențierea ecuației (3.14) rezultă:

$$d\bar{M}(\tau) = -(M_0 - EMC)Ki^*dFo^* \quad (3.15)$$

care mai poate fi scrisă și sub forma:

$$\frac{d(M_0 - \bar{M}(\tau))}{dFo^*} = (M_0 - EMC)Ki^* \quad (3.16)$$

sau

$$Ki^* = \frac{d}{dFo^*} \left(\frac{\bar{M}(\tau) - M_0}{EMC - M_0} \right) = \frac{M_0 - \bar{M}(\tau)}{(M_0 - EMC)Fo^*} \quad (3.17)$$

Luând în considerare ecuația (3.12), ecuația (3.17) devine:

$$Ki^* = \frac{M_0 - \bar{M}(\tau)}{(M_0 - EMC)Fo^*} = 2 \frac{M(0, \tau) - M(R, \tau)}{M_0 - EMC} = 2K \quad (3.18)$$

Trebuie menționat că $\bar{M}(\tau)$ variază între M_0 (umiditatea inițială) și EMC (umiditatea de echilibru). O valoare mică a criteriului Kirpichev indică o rezistență internă mică la difuzia umidității în placă și invers, o valoare mare, o rezistență mare la difuzie. Ecuația (3.18) stabilește relația dintre criteriul higrometric Kirpichev și conținutul mediu de umiditate al plăcii. Gradientul de umiditate pe grosimea plăcii determină mărimea criteriului.

Criteriul higrometric Kirpichev poate fi utilizat pentru evaluarea câmpului de umiditate pe grosimea plăcii în perioada de uscare cu viteză constantă, reprezentând astfel o măsură a mărimii tensiunilor interne care favorizează apariția crăpăturilor superficiale. Întrucât intensitatea fluxului de masă depinde de parametrii regimului de uscare (viteză, temperatură și umiditatea relativă a aerului), rezultă că există o relație între criteriul higrometric Kirpichev (distribuția umidității) și parametrii aerului în această perioadă de uscare. Pentru evitarea

crăpăturilor superficiale, parametrii aerului trebuie să fie astfel aleși încât în orice moment al perioadei de uscare, criteriul Kirpichev să aibă valori inferioare unei valori maxime (critice), corespunzătoare momentului apariției crăpăturilor superficiale. Prin utilizarea acestei metode se poate recomanda un domeniu optim al regimurilor de uscare cu scopul asigurării calității lemnului uscat, din care se poate alege acel regim care are intensitatea maximă de uscare.

3.2. Modelul numeric

Pentru elaborarea modelului numeric s-a utilizat într-o primă fază expresia (3.9), care necesită evaluarea numerică a seriei respective. S-a constatat că seria este destul de rapid convergentă.

Pentru calculul criteriului higrometric Kirpichev, s-a folosit ecuația (3.10). Calculul demonstrează că în expresia umidității medii, dată de ecuația (3.13), termenii din serie dispar la integrare.

Valorile pentru conținutul mediu de umiditate $\bar{M}(\tau)$ au fost obținute din simulările efectuate cu programul TORKSIM.

3.3. Simularea câmpului de umiditate

Pentru aplicarea metodei indicate în subcapitolul 3.1 s-au supus unui număr de cinci regimuri de uscare probe de lemn de pin cu umidități inițiale diferite, 130% și 60%, și cu grosimea de 28 mm. Primul regim de uscare este unul standard, utilizat în practică, propus de Seba Industrial Company (2008) și indicat în tabelul 3.1 (treptele I și II), în timp ce celelalte patru regimuri (i, ii, iii și iv) corespund valorilor vitezei constante ($3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperaturii ($50 - 80^\circ\text{C}$) și umidității

relative (40 – 60%), după cum se poate observa în tabelul 3.2.

Tabelul 3.1. Regim de uscare standard (Seba Industrial Company)

Treptele procesului	Umiditatea lemnului, %	Temperatură, °C	Umiditate de echilibru, %
I	40	58	17
II	28	65	10

Tabelul 3.2. Regimuri de uscare propuse

Procesul				Umiditate relativă, %
i	ii	iii	iv	
Temperatură, °C				
50	60	70	80	40
50	60	70	80	50
50	60	70	80	60

S-au aplicat două metode pentru determinarea criteriului higrometric Kirpichev; una este utilizată pentru calculul variației criteriului pe grosimea plăcii pe baza ecuației (3.10), în timp ce a doua metodă este folosită pentru stabilirea variației criteriului în timp, în funcție de regimul de uscare aplicat, considerând ecuația (3.18). Variația conținutului de umiditate în timp, temperatura medie a plăcii și conținutul ei mediu de umiditate s-au obținut din programul de simulare a uscării lemnului, TORKSIM, versiunea 5.0 (2008).

Pentru determinarea coeficientului de difuzie a umidității în lemn, s-a utilizat următoarea relație aproximativă [L5]:

$$a_m = 0.845 \times 10^{-18.3} \times T^{10} \times \rho_0^{-3.9} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.19)$$

în care: T (K) este temperatura medie a lemnului, considerată inițial egală cu temperatura termometrului umed. Densitatea lemnului absolut uscat de pin este $\rho_0 = 430 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

În figura 3.1 este prezentată variația criteriului higrometric Kirpichev în funcție de timp, în trei

puncte de pe grosimea plăcii, ținând seama de ecuația (3.10) și de regimul de uscare standard. Se observă că criteriul Kirpichev este aproape independent de coordonata x . Figura indică de asemenea o creștere a criteriului în timp.

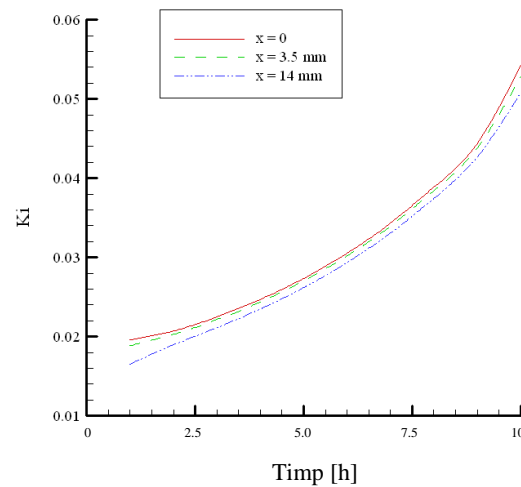


Fig. 3. 1. Variația criteriului higrometric în funcție de timp, la diferite grosimi, (regimul standard de uscare)

În figurile 3.2, 3.3 și 3.4 sunt indicate variațiile criteriului Kirpichev în funcție de timp pentru regimurile de uscare considerate.

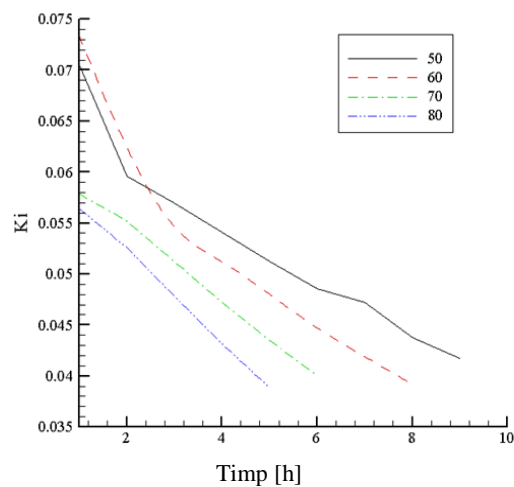


Fig. 3.2. Variația criteriului higrometric în funcție de timp, la umiditatea relativă $RH=40\%$ și diferite temperaturi

Se poate observa creșterea lui α o dată cu scăderea umidității relative.

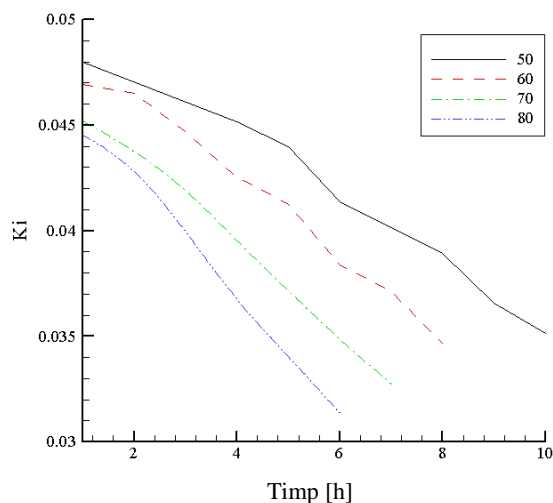


Fig. 3.3. Variația criteriului higrometric în funcție de timp la o umiditate relativă $RH=50\%$ și diferite temperaturi

Este de asemenea interesant de menționat că criteriul higrometric descrește cu creșterea temperaturii. Prin urmare, temperaturi și umidități relative ridicate reduc riscul apariției crăpăturilor. Pentru toate cele patru regimuri de uscare, criteriul Kirpichev descrește în timp.

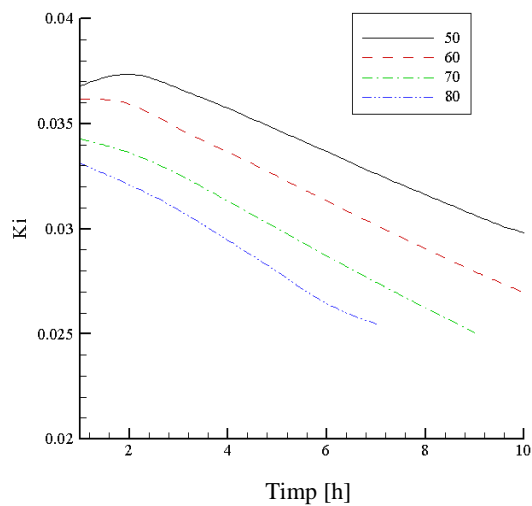


Fig. 3.4. Variația criteriului higrometric în funcție de timp la o umiditate relativă $RH=60\%$ și diferite temperaturi

Rezultatele experimentale ale uscării lemnului indicate în [Ș12] susțin aceste concluzii.

Dacă în ecuația (3.18) se înlocuiește expresia criteriului Fourier, se obține următoarea relație:

$$Ki^* = \frac{M_0 - \bar{M}(\tau)}{(M_0 - EMC)Fo^*} = \frac{M_0 - \bar{M}(\tau)}{(M_0 - EMC)a_m\tau} R^2 \quad (3.20)$$

Se observă o variație parabolică a criteriului Kirpichev cu dimensiunea $x=R$, iar cu creșterea timpului scade umiditatea lemnului, iar criteriul Kirpichev crește.

De asemenea, creșterea sau descreșterea criteriului higrometric, comparând figura 3.1 cu figurile 3.2, 3.3 și 3.4, poate fi explicată dacă se compară ecuațiile (3.10) cu (3.18). Astfel, conform ecuației (3.10) trebuie satisfăcută relația:

$$\frac{M_0 - M(x, \tau)}{M_0 - EMC} > Fo^* - \frac{R^2 - 3x^2}{6R^2} \quad (3.21)$$

iar conform ecuației (3.18) trebuie satisfăcută relația:

$$\frac{M_0 - \bar{M}(\tau)}{M_0 - EMC} < Fo^* \quad (3.22)$$

Evaluarea matematică a calității uscării a fost efectuată pentru prima perioadă de uscare, pentru care, conform programului de simulare a uscării lemnului TORKSIM, nu apar tensiuni relative. De aceea, pentru a obține criteriul Kirpichev critic (la care apar primele crăpături), a fost necesar să se considere un interval suplimentar al conținutului de umiditate, cuprins între 30% și 20%, din care a fost preluat acel moment de timp în care s-a înregistrat prima tensiune relativă. Temperatura medie a plăcii și conținutul ei mediu de umiditate au fost considerate, de asemenea, la același moment de timp.

Figura 3.5 indică faptul că valorile minime ale criteriului sunt situate între 70°C și 80°C. Din nou, riscul minim de apariție a crăpăturilor este la 80°C și 60% umiditate relativă. Se poate afirma că pentru un anumit conținut de umiditate al lemnului, regimurile de uscare optime

trebuie astfel alese încât să se obțină valori ale criteriului K_i situate în domeniul de sub curbele $K_i^* = f(t)$ reprezentate în figura 3.5.

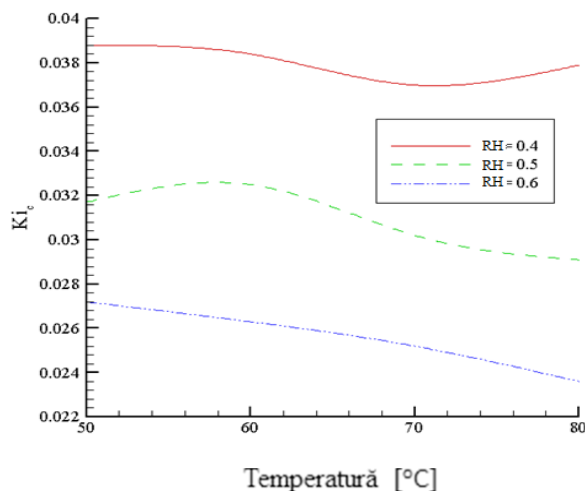


Fig. 3.5. Criteriul higrometric critic în funcție de temperatură pentru diferite umidități relative ale aerului

Pentru fiecare specie de lemn se poate obține prin urmare un domeniu optim al regimurilor de uscare. Nu rezultă deci numai un regim optim de uscare, ci un întreg domeniu optim al regimurilor de uscare, ceea ce înseamnă că se poate alege acel regim care are durata minimă de uscare.

Corelația dintre criteriul higrometric și tensiunea relativă determinată cu programul TORKSIM este reprezentată în figura 3.6.

Se poate observa că există o bună corelație între cei doi parametri, factorul de corelație fiind

$$\frac{K_i^*}{\text{Tensiune relativă}} \cong 0.1. \text{ Conform observațiilor experimentale care stau la baza conceperii}$$

programului TORKSIM, crăpăturile încep să apară la valori ale tensiunii relative apropiate de 0.33 și cresc apoi o dată cu creșterea tensiunii relative.

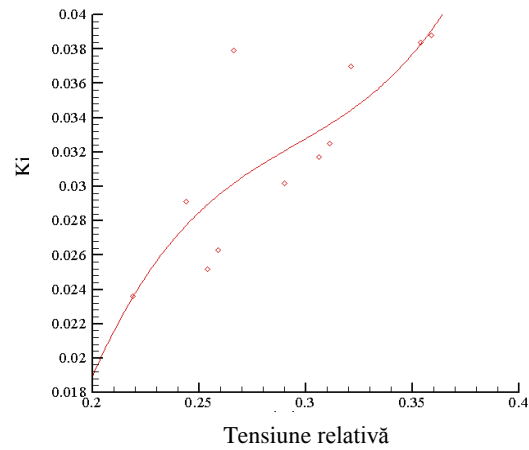


Fig. 3.6. Corelația dintre criteriul higrometric și tensiunea relativă

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol au fost publicate în:

1. Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) Criterial assessment of the drying quality, The final conference of COST Action E53 "The future of quality control for wood & wood products", 4-7th May 2010, Edinburgh (proceedings).
2. Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) Assessment of drying quality by use of Kirpichev number, International Wood Products Journal, vol. 1, issue 2, pp. 70-74.

(B-iii) Cercetări în domeniul biomasei lemnoase

Capitolul 4. Conductivitatea termică efectivă a biomasei lemnoase sub formă de brichete

4.1. Conductivitatea termică a lemnului și a biomasei lemnoase în cercetările actuale

Brichetarea și peletizarea reprezintă densificarea sau compactarea biomasei prin aplicarea unei presiuni. Brichetele se diferențiază de peleți prin dimensiunile lor. Peleții au în mod normal lungimea cuprinsă între 5 și 30 mm, față de brichete, care au diametrul cuprins între 30 mm și 200 mm, iar lungimea variază de la 50 mm până la 400 mm. Pe lângă creșterea densității materialului și a conținutului de energie pe unitatea de volum, procesul de brichetare mai prezintă și alte avantaje, precum obținerea unui produs omogen dintr-un amestec de materiale eterogene sau obținerea unui produs puternic coeziv din materiale disperse, care în starea originală sunt greu de procesat și cu costuri ridicate [C2].

Proprietățile combustibile ale biomasei necesare analizei arderii sunt grupate în proprietăți fizice, chimice, termice și minerale. Proprietățile termice sunt căldura specifică, conductivitatea termică și emisivitatea, care variază în funcție de conținutul de umiditate, temperatură și gradul de descompunere termică [S1].

Folosind tehnica sursei plane nestaționare (transient plane source technique), Sjöström și Blomqvist [S7] au măsurat căldura specifică și conductivitatea termică a peleților din lemn în vrac în intervalul de temperatură cuprins între 22 și 120 °C. Ei au investigat de asemenea și posibilitatea de a măsura aceste proprietăți la un pelete individual, studiind în același timp și dependența de conținutul de umiditate.

Fasina și Sokhansanj [F1] au studiat influența conținutului de umiditate asupra proprietăților

termice ale peleților din lucernă cu umiditatea cuprinsă între 7.5-18% (raportată la masa materialului umed), utilizând "Metoda sursei liniare de căldură".

Lemnul este un material anizotrop, cu o structură eterogenă complexă, iar conductivitatea termică este diferită când căldura se transferă perpendicular sau paralel cu axa fibrelor. Există diferite modele care descriu conductivitatea termică a lemnului și a materialelor poroase. Siau [S6] a dezvoltat un model teoretic care descrie conductivitatea termică efectivă a lemnului folosind analogia electrică (model echivalent de circuit rezistiv). Modelul unicelular propus, cu dimensiuni unitare, reprezintă toate celulele lemnului orientate longitudinal. Modelul de celulă constă din pereții laterali și transversali și din golul celular (lumen), care conține doar aer stagnant.

Un alt model teoretic de estimare a conductivității termice a lemnului în direcțiile radială și tangențială pentru un interval mare de umidități a fost prezentat în [G1]. Modelele geometrice au fost concepute pe baza observațiilor microscopice: procentul lemn timpuriu/lemn târziu, procentul de perete celular și distribuția lor pe două direcții. Gu și Hunt au dezvoltat într-o serie de lucrări [G2, G3, H2, H3] un model cu elemente finite bidimensionale pentru estimarea conductivității termice efective a lemnului cu diferite densități și umidități. În comparație cu modelul de celulă cu dimensiuni unitare al lui Siau, modelul descris în [H3] are lungimea totală L care include un strat exterior de apă legată.

Thunman și Leckner [T2] au dezvoltat un model teoretic pentru estimarea conductivității termice efective a lemnului în diferite stadii ale arderii. Modelul lor geometric este format dintr-o celulă pătrată cu trei straturi: solid, apă și gaz. Modelarea conductivității termice este aplicată atât lemnului, cât și lemnului carbonizat, întrucât lemnul își menține structura fibrelor în timpul conversiei termice. Autorii sugerează că modelul propus poate fi aplicat și

peleților, respectiv plăcilor aglomerate din aşchii.

Spre deosebire de lemn, care este un material biologic poros, anizotrop și neomogen, peleții și brichetele sunt considerate materiale izotrope datorită orientării aleatorii a fibrelor în timpul procesului de brichetare.

Literatura existentă oferă puține informații cu privire la conductivitatea termică a unui pelete sau brichete de lemn și nu există un model care să descrie conductivitatea termică efectivă.

Cercetarea întreprinsă a constatat în a investiga dacă și în ce măsură modelele existente de determinare a conductivității termice efective a lemnului pot fi aplicate și la brichetele de lemn. În acest scop, au fost utilizate trei circuite electrice rezistive pentru un transfer de căldură perpendicular și paralel față de axa brichetei pentru a analiza comportamentul celulei de lemn, atunci când conținutul de umiditate al brichetelor variază.

4.2. Modele de conductivitate termică efectivă aplicate brichetelor de lemn

Siau [S6] a propus un model geometric pentru o celulă de lemn anhidru cu dimensiunile de ansamblu unitare și a analizat-o ca un circuit serie-paralel. A obținut ecuații pentru conductivitatea termică efectivă transversală și longitudinală, în funcție de direcția fluxului termic, perpendiculară sau paralelă cu axa fibrelor. Modelul conductivității termice transversale a fost analizat de alți autori [T2] prin dispunerea celor trei straturi (solid, umiditate și gaz), ca elemente rezistive, în paralel, respectiv în serie, în funcție de direcția fluxului termic. Mai departe, Hunt et al. [H3] au făcut o serie de ipoteze cu privire la geometria celulei și distribuția umidității.

Plecând de la modelele lui Siau [S6], Thunman și Leckner [T2], respectiv Hunt et al. [H3], a fost analizat în continuare un nou model geometric de celulă lemnoasă, indicat în figura 4.1.

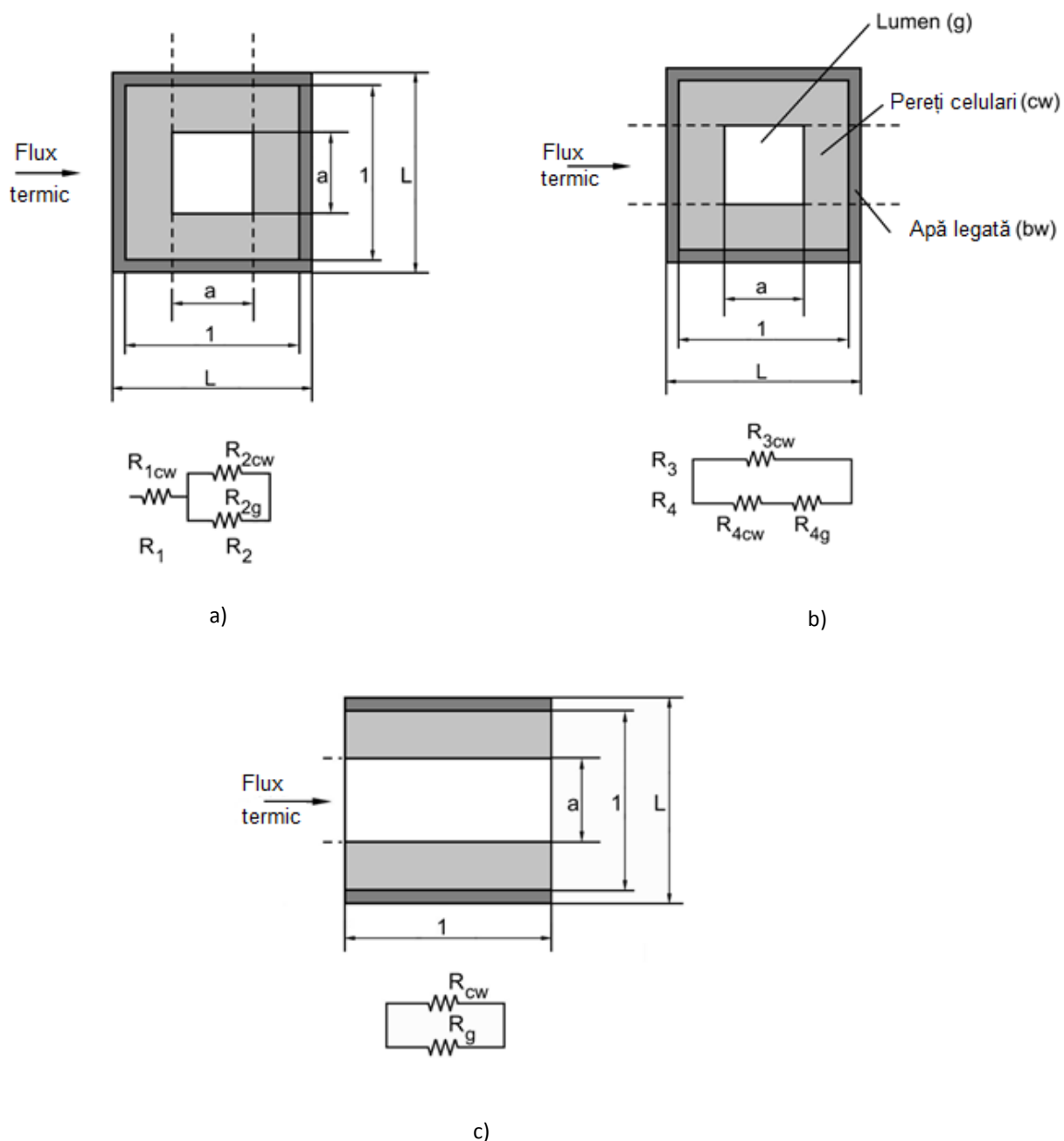
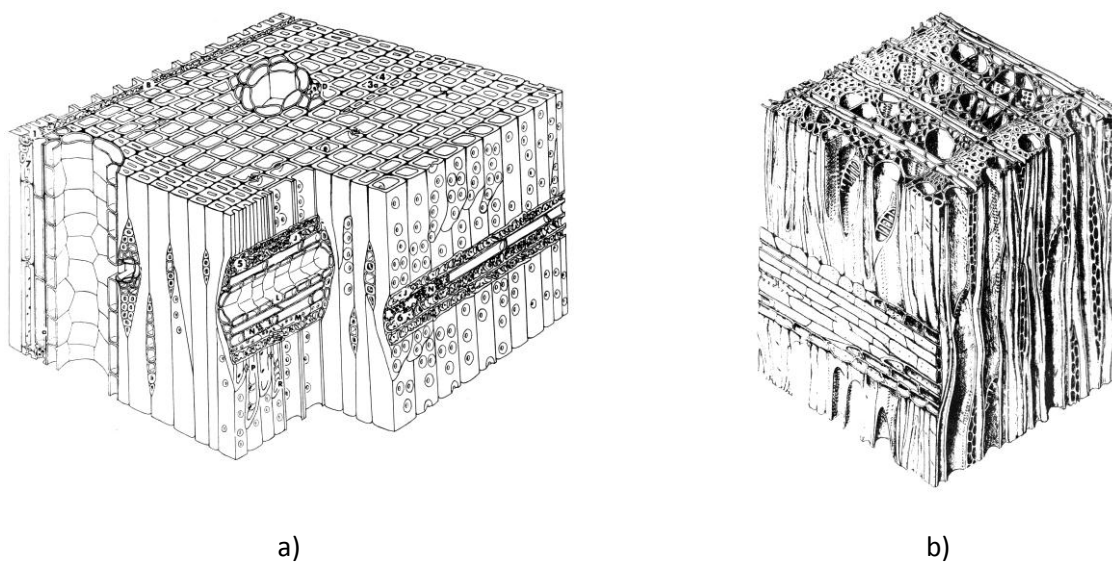


Fig. 4.1. Modele de circuite electrice rezistive care descriu transferul de căldură într-o celulă lemnoasă
 a) transfer de căldură în direcție transversală (serie), b) transfer de căldură în direcție transversală (paralel), c) transfer de căldură în direcție longitudinală

Modelul de celulă se bazează pe structura lemnului de rășinoase și foioase (fig. 4.2), indicată de Siau [S6] și Thunman și Leckner [T2].



a)

b)

Fig. 4.2. Structura anatomică a
a) lemnului de rășinoase, b) lemnului de foioase, [56]

Celula este pătrată, cu dimensiuni unitare și în condiții anhidre. Cu creșterea conținutului de umiditate, dimensiunile lumenului (golului celular) rămân aceleași, iar apa legată se adaugă ca un strat exterior la dimensiunile celulei. Astfel, dimensiunile de ansamblu ale celulei cresc de la 1 la L . Dimensiunea maximă a celulei este la starea de saturație a fibrei ($FPS=30\%$). S-a admis ipoteza că lumenul conține doar gaz (aer stagnant sau un amestec de aer și vapori de apă) și nu conține apă liberă.

În alcătuirea circuitului electric rezistiv, s-au considerat trei configurații diferite. Primul model de circuit rezistiv – transfer de căldură transversal (serie) - presupune legarea în serie a rezistențelor delimitate de liniile verticale întrerupte, (fig. 4.1a). Prima rezistență ($R_1=R_{1cw}$) reprezintă peretele celular, care include apa legată, dacă ea există. A doua rezistență, R_2 reprezintă circuitul care include peretele celular cu apa legată (R_{2cw}) și gazul (aer sau aer și vapori de apă), (R_{2g}), rezistențe care sunt legate în paralel.

Conform celui de-al doilea model - transfer de căldură transversal (paralel) - (fig. 4.1b),

celula lemnoasă este împărțită în rezistențe legate în paralel (linii orizontale întrerupte). Prima rezistență ($R_3=R_{3cw}$) reprezintă peretele celular cu apa legată, iar a doua rezistență este formată din circuitul de rezistențe legate în serie, R_{4cw} (peretele celular cu apa legată) și R_{4g} (gazul).

Al treilea model – transfer de căldură longitudinal (fig. 4.1c) - presupune transferul de căldură în direcție paralelă cu celula lemnoasă, în care prima rezistență R_{cw} reprezintă peretele celular care include apa legată, iar a doua rezistență R_g reprezintă gazul.

Considerând geometria peretelui (fig. 4.1a), ecuația rezistenței efective pentru modelul rezistiv transversal în serie este:

$$R_{eff \perp, A_1} = R_{1cw} + \frac{R_{2cw} R_{2g}}{R_{2cw} + R_{2g}} \quad (4.1)$$

în care: $R_{eff \perp, A_1}$ este rezistența efectivă pentru modelul rezistiv în serie, R_{1cw} este prima rezistență a peretelui celular cu apa legată, R_{2cw} este a doua rezistență a peretelui celular cu apa legată, R_{2g} este rezistența gazului din lumenul celular.

Rezistențele corespunzătoare celulei lemnoase și ale diferitelor componente ale celulei s-au calculat cu următoarele relații:

$$R_{eff \perp, A_1} = \frac{L}{k_{eff \perp, A_1} L^2} \quad (4.2)$$

$$R_{1cw} = \frac{L-a}{k_{cw \perp} L^2} \quad (4.3)$$

$$R_{2cw} = \frac{a}{k_{cw \perp} (L-a)L} \quad (4.4)$$

$$R_{2g} = \frac{a}{k_g a L} \quad (4.5)$$

în care: L este lungimea totală a celulei, a este dimensiunea lumenului, $k_{eff\perp,A_1}$ este conductivitatea termică efectivă transversală a celulei lemnoase obținută din modelul rezistiv în serie, $k_{cw\perp}$ este conductivitatea termică transversală a peretelui celular, k_g este conductivitatea termică a gazului.

După înlocuirea termenilor în ec. (4.1) și în urma simplificării, se obține conductivitatea termică efectivă pentru o celulă de lemn:

$$k_{eff\perp,A_1} = \left(\frac{\omega_{cw}}{k_{cw\perp}} + \frac{\omega_g}{\omega_{cw}k_{cw\perp} + \omega_g k_g} \right)^{-1} \quad (4.6)$$

în care: $\omega_{cw} = \frac{L-a}{L}$ este lungimea adimensională a lungimii peretelui celular, $\omega_g = \frac{a}{L}$ este lungimea adimensională a lumenului. Ecuația (4.6) este similară cu cea obținută de Siau în [S6] pentru conductivitatea termică transversală.

Pentru modelul rezistiv transversal în paralel (fig. 4.1b), ecuația rezistenței efective este:

$$\frac{1}{R_{eff\perp,B_1}} = \frac{1}{R_{3cw}} + \frac{1}{R_{4cw} + R_{4g}} \quad (4.7)$$

în care: $R_{eff\perp,B_1}$ este rezistența efectivă pentru modelul rezistiv în paralel, R_{3cw} este prima rezistență a peretelui celular cu apă legată, R_{4cw} este a doua rezistență a peretelui celular cu apă legată, R_{4g} este rezistența gazului din lumenul celular.

Rezistențele individuale au fost exprimate prin relațiile următoare:

$$R_{eff\perp,B_1} = \frac{L}{k_{eff\perp,B_1} L^2} \quad (4.8)$$

$$R_{3cw} = \frac{L}{k_{cw\perp} (L-a)L} \quad (4.9)$$

$$R_{4cw} = \frac{L-a}{k_{cw\perp} a L} \quad (4.10)$$

$$R_{4g} = \frac{a}{k_g a L} \quad (4.11)$$

în care: $k_{eff \perp, B_1}$ este conductivitatea termică efectivă a celulei lemnoase ca model rezistiv în paralel.

După înlocuirea termenilor în ecuația (4.7) și după simplificare, se obține ecuația conductivității termice efective sub forma:

$$k_{eff \perp, B_1} = \omega_{cw} k_{cw \perp} + \frac{\omega_g}{\frac{\omega_{cw}}{k_{cw \perp}} + \frac{\omega_g}{k_g}} \quad (4.12)$$

Ecuația (4.13) exprimă rezistența efectivă pentru modelul rezistiv longitudinal în paralel (fig. 4.1c):

$$\frac{1}{R_{eff \parallel}} = \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \quad (4.13)$$

în care: $R_{eff \parallel}$ este rezistența efectivă a celulei lemnoase ca model rezistiv longitudinal în paralel, R_{cw} este rezistența celulei lemnoase cu apa legată, R_g este rezistența gazului din lumenul celulei.

Rezistențele constitutive au fost determinate pe baza următoarelor relații:

$$R_{eff \parallel} = \frac{1}{k_{eff \parallel} L^2} \quad (4.14)$$

$$R_{cw} = \frac{1}{k_{cw \parallel} (L^2 - a^2)} \quad (4.15)$$

$$R_g = \frac{1}{k_g a^2} \quad (4.16)$$

în care: $k_{eff \parallel}$ este conductivitatea termică efectivă longitudinală a celulei lemnoase, $k_{cw \parallel}$ este conductivitatea termică longitudinală a peretelui celular.

Conductivitatea termică efectivă a acestui model devine prin urmare:

$$k_{eff\parallel} = (1 - \omega_g^2)k_{cw\parallel} + \omega_g^2 k_g \quad (4.17)$$

Dimensiunile celulei, a și L nu sunt mărimi constante, ci depind de densitatea brichetelor de lemn la stare anhidră și de umiditatea lor. După cum este indicat în [S6] și [H3], lungimea lumenului, a se determină din porozitatea materialului uscat,

$$P_d = \frac{a^2}{L^2}$$

$$a = (P_d)^{0.5} \quad (4.18)$$

Porozitatea brichetei uscate se obține din ecuația următoare:

$$P_d = \frac{\rho_{cw_d} - \rho_d}{\rho_{cw_d} - \rho_{aer}} \quad (4.19)$$

în care: $\rho_{cw_d} = 1540 \text{ kg/m}^3$ este densitatea substanței peretelui celular [S6], ρ_d este densitatea brichetei la stare anhidră, $\rho_{aer} = 1.194 \text{ kg/m}^3$ este densitatea aerului la 20°C [I2].

Densitatea brichetei la starea anhidră se determină din:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_d} \quad (4.20)$$

în care: ρ_d (kg/m^3) este densitatea brichetei uscate, m_d (kg) este masa brichetei uscate, V_d (m^3) este volumul brichetei uscate.

Porozitatea brichetei umede se calculează cu ecuația (4.21), [H3]:

$$P_w = \frac{a^2}{L^2} = \frac{(1 - V\%_{bw})P_d}{1 - V\%_{bw} P_d} \quad (4.21)$$

în care: $V\%_{bw}$ este participația volumică a apei legate din celula lemnoasă. Participația volumică se determină în funcție de umiditatea brichetei, pe baza ecuației (4.22), [H3]:

$$V\%_{bw} = \frac{MC \rho_{cw_d}}{\rho_{bw} + MC \rho_{cw_d}} \quad (4.22)$$

în care: $\rho_{bw} = 1115 \text{ kg/m}^3$ este densitatea apei legate [H3].

Dimensiunea L se determină din ecuația (4.21), ținând seama de expresia porozității anhidre:

$$L = \left(\frac{P_d}{P_w} \right)^{0.5} \quad (4.23)$$

Valorile conductivităților termice ale substanțelor considerate în model sunt indicate în tabelul 4.1. Conductivitatea termică a lemnului s-a obținut pe baza valorilor calculate la 20°C, folosind ecuația (5.23), indicată de Siau în [S6].

Tabelul 4.1. Valori ale conductivităților termice

<i>Substanță</i>	<i>Bibliografie</i>	<i>Simbol</i>	<i>Conductivitate termică (W/mK)</i>
Perete celular \perp (0 % MC)	Hunt et al. [H3]	$k_{cw\perp d}$	0.410
Perete celular \parallel (0 % MC)	Siau [S6]	$k_{cw\parallel d}$	0.840
Apa legată din peretele celular	Hunt et al. [H3] Siau [S6]	k_{bw}	0.650
Aerul din lumen (0 % MC)	Incropera et al. [I2]	k_{aer}	0.026
Vapori de apă din lumen	Incropera et al. [I2]	k_v	0.019

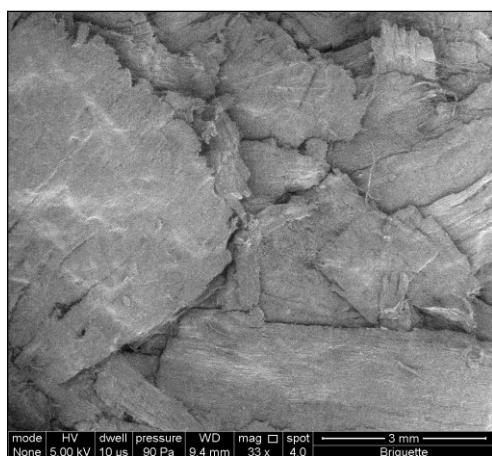
Conductivitatea termică a peretelului celular cu apă legată s-a determinat din regula amestecurilor [H3]:

$$k_{cw} = k_{cw_d} (1 - V\%_{bw}) + k_{bw} V\%_{bw} \quad (4.24)$$

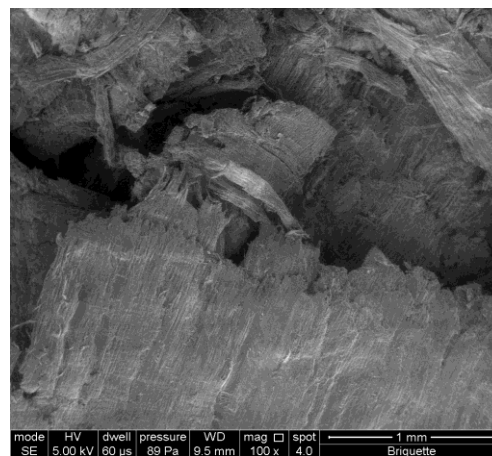
în care: k_{cw_d} este conductivitatea termică a substanței celulei lemnoase, iar k_{bw} este conductivitatea termică a apei legate.

Modelul celulei lemnoase descris mai devreme poate fi aplicat brichetelor la 0% umiditate și la umiditatea de echilibru, când dimensiunile de ansamblu se modifică foarte puțin. Acest

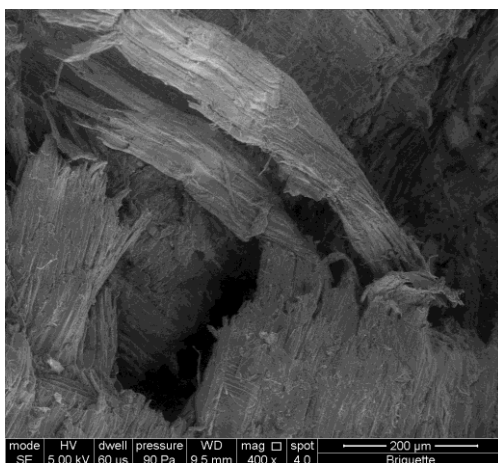
lucru înseamnă că spațiile dintre particulele de lemn (așchii) rămân aproape neschimbate. Folosind microscopul ESEM Quanta 250 (FEI) s-au obținut imagini ale suprafețelor brichetelor, pentru a putea observa interconectarea mecanică a așchiilor și spațiile formate între ele, la scara 33x, 100x, 400x, și 1000x (fig. 4.3).



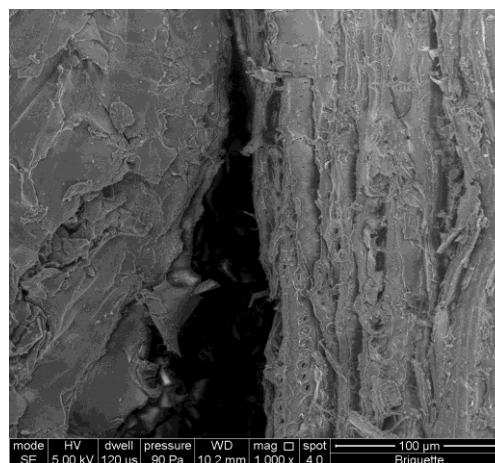
a)



b)



c)



d)

Fig. 4.3. Imagini obținute prin Scanning Electron Microscopy (ESEM) ale suprafeței brichetelor la umiditatea de echilibru

a) Mărire de 33x, b) Mărire de 100x, c) Mărire de 400x, d) Mărire de 1000x

Figura 4.3a indică clar suprafața discontinuă a brichetei rezultată din interconectarea

mecanică a așchiilor. Se pot observa goluri cu diferite dimensiuni. Figura 4.3b indică atât goluri mari, cât și goluri mici, cu limite distincte. În figura 4.3c se observă limitele unui gol mic, care sunt foarte bine conturate. Figura 4.3d prezintă diferența între mărimea golurilor formate între așchii și mărimea lumenului celulelor lemnoase.

O dată cu creșterea conținutului de umiditate al brichetei de la 0% până la umiditatea de echilibru, crește totodată și conductivitatea termică efectivă. Procesul de umidificare conduce atât la absorbția apei și umflarea fibrelor, cât și la o mărire a golurilor dintre așchiile brichetei, astfel încât dimensiunile de ansamblu ale brichetei cresc semnificativ cu creșterea conținutului de umiditate peste umiditatea de echilibru. Prin urmare, deși umiditatea brichetei crește, este de așteptat ca, conductivitatea termică efectivă să scadă datorită creșterii numărului de goluri.

Pentru un conținut de umiditate mai mare decât umiditatea de echilibru ($MC > EMC$), noul model de celulă lemnoasă presupune un lumen mai mare, a' , care include și spațiile dintre așchii, după cum se poate vedea în figura 4.4. Conținutul de umiditate nu depășește umiditatea de saturație a fibrei și nu există apă liberă în lumen.

Variabila geometrică L' se obține din proporționalitatea dintre volumul celulei și volumul brichetei în condiții anhidre și în condițiile de umiditate curentă, conform relațiilor (4.25) și (4.26):

$$\frac{L'^2 \times 1}{1^3} = \frac{V_b}{V_{bd}} \quad (4.25)$$

$$L' = \left(\frac{V_b}{V_{bd}} \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

în care: L' este noua dimensiune de ansamblu a celulei, V_b este volumul brichetei la

umiditatea curentă, $V_{b,d}$ este volumul brichetei în condiții anhidre.

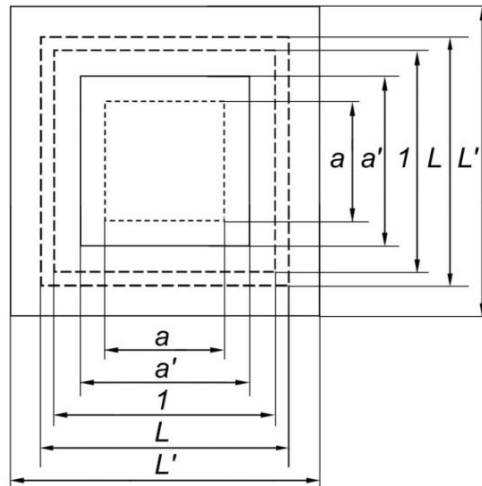


Fig. 4.4. Modelul de celulă lemnoasă pentru $MC > EMC$

Dimensiunea lumenului a' se determină din egalitatea:

$$a' - a = L' - L \quad (4.27)$$

Noii termeni utilizați în modelele rezistive sunt:

$$P_w' = \frac{a^2}{L^2} \quad (4.28)$$

$$\omega_g' = \frac{a'}{L'} \quad (4.29)$$

și

$$\omega_{cw}' = 1 - \omega_g' \quad (4.30)$$

Conform autorilor Thunman și Leckner [T2], modelul rezistiv transversal în serie (ec. 4.6) tinde să supraestimeze conductivitatea termică, iar modelul rezistiv transversal în paralel (ec. 4.12) tinde să subestimeze conductivitatea termică. Pentru a reduce diferența dintre conductivitățile termice, celulele lemnoase sunt combinate în circuite în serie și paralel, după

cum se poate vedea în figura 4.5, pentru exemplul $i = 3$ (i reprezintă numărul de combinații).

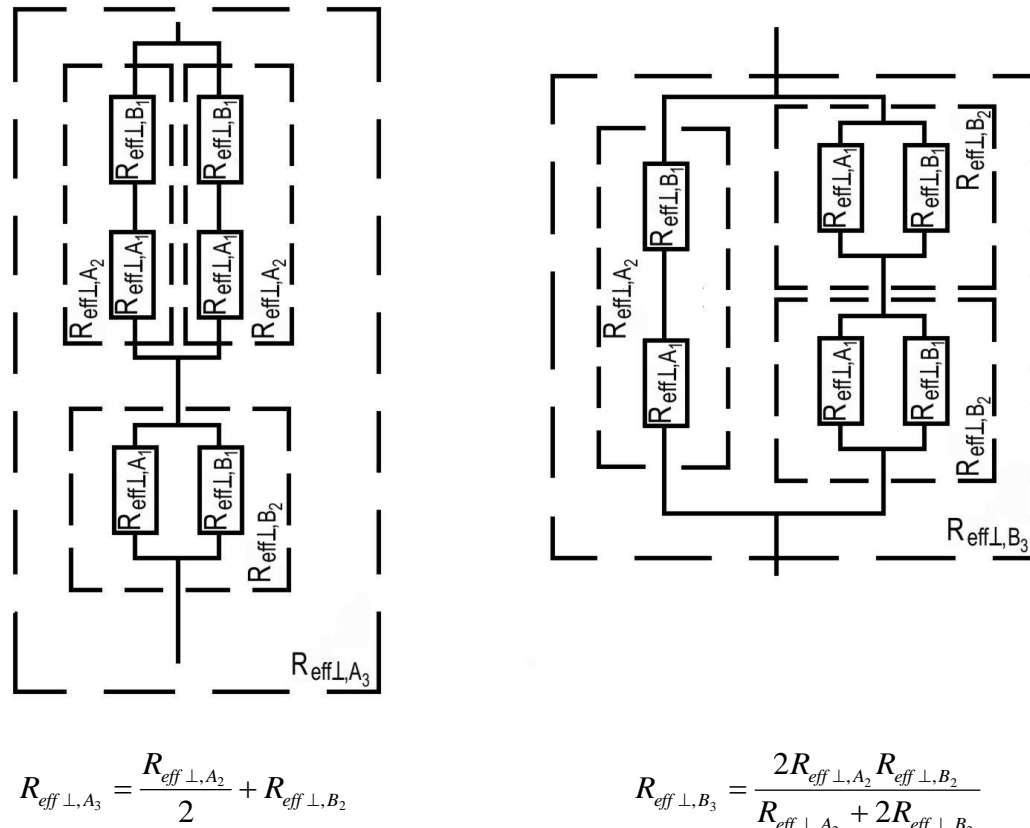


Fig. 4.5. Circuite în serie și în paralel pentru rezistențele efective, $R_{eff \perp, Ai}$ și $R_{eff \perp, Bi}$

Rezultatele combinării a două celule în circuite în serie și în paralel ($i = 2$), după cum se poate observa în figura 4.5, sunt următoarele:

$$R_{eff \perp, A_2} = R_{eff \perp, A_1} + R_{eff \perp, B_1} \quad (4.31)$$

și

$$\frac{1}{R_{eff \perp, B_2}} = \frac{1}{R_{eff \perp, A_1}} + \frac{1}{R_{eff \perp, B_1}} \quad \text{sau} \quad R_{eff \perp, B_2} = \frac{R_{eff \perp, A_1} R_{eff \perp, B_1}}{R_{eff \perp, A_1} + R_{eff \perp, B_1}} \quad (4.32)$$

În continuare, rezistențele efective în direcție transversală pentru numărul de combinații

$i = 3$ sunt:

$$R_{eff \perp, A_3} = \left(\frac{1}{R_{eff \perp, A_2}} + \frac{1}{R_{eff \perp, A_2}} \right)^{-1} + R_{eff \perp, B_2} = \frac{R_{eff \perp, A_2}}{2} + R_{eff \perp, B_2} \quad (4.33)$$

și

$$\frac{1}{R_{eff \perp, B_3}} = \frac{1}{R_{eff \perp, A_2}} + \frac{1}{R_{eff \perp, B_2} + R_{eff \perp, B_2}} \quad \text{sau} \quad R_{eff \perp, B_3} = \frac{2R_{eff \perp, A_2} R_{eff \perp, B_2}}{R_{eff \perp, A_2} + 2R_{eff \perp, B_2}} \quad (4.34)$$

Conductivitatea termică efectivă poate fi exprimată în urma combinării a două celule lemnoase ($i = 2$) în circuite în serie și în paralel astfel:

$$k_{eff \perp, A_2} = \frac{2}{\frac{1}{k_{eff \perp, A_1}} + \frac{1}{k_{eff \perp, B_1}}} \quad (4.35)$$

$$k_{eff \perp, B_2} = \frac{k_{eff \perp, A_1} + k_{eff \perp, B_1}}{2} \quad (4.36)$$

Ecuțiile generale (dacă $i > 1$) pentru conductivitățile termice efective sunt:

$$k_{eff \perp, A_{i+1}} = \frac{a_{i+1}}{\frac{a_i}{k_{eff \perp, A_i}} + \frac{b_i}{k_{eff \perp, B_i}}} \quad (4.37)$$

$$k_{eff \perp, B_{i+1}} = \frac{b_i k_{eff \perp, A_i} + a_i k_{eff \perp, B_i}}{a_{i+1}} \quad (4.38)$$

în care a_i și b_i sunt coeficienți corelați prin ecuațiile (4.39) și (4.40):

$$a_{i+1} = a_i + b_i \quad (4.39)$$

$$b_i = a_{i-1} b_{i-1} \quad (4.40)$$

Valorile inițiale sunt $a_1 = 1$ și $b_1 = 1$. O dată cu creșterea numărului de combinații i , diferența dintre conductivitățile termice scade până când ajunge la 0, când i tinde la infinit.

În funcție de numărul de combinații, conductivitatea termică efectivă în direcție transversală poate fi calculată acum ca medie a celor două conductivități.

$$k_{eff \perp} = \frac{k_{eff \perp, A_{i+1}} + k_{eff \perp, B_{i+1}}}{2} \quad (4.41)$$

Conductivitățile termice efective exprimate prin ecuațiile (4.6) și (4.12) pot fi de asemenea combinate prin utilizarea unui factor de ponderare, ξ :

$$k_{eff \perp} = \xi k_{eff \perp, A_i} + (1 - \xi) k_{eff \perp, B_i} \quad (4.42)$$

Thunman și Leckner au indicat în [T2] că factorul de ponderare variază cu densitatea într-un interval îngust, și anume 0.47-0.5.

4.3. Realizarea brichetelor de lemn și determinarea experimentală a conductivității termice

Brichetele realizate dintr-un amestec aleatoriu de așchii de rășinoase și foioase au fost utilizate ca material experimental. Materia primă a constat din resturi rezultate din prelucrarea secundară a lemnului (așchii), care au avut dimensiunile medii de 8 mm (lungime și lățime) și 0.15 mm (grosime). Brichetele au fost obținute în laboratorul de compozite din lemn al Universității Transilvania din Brașov prin utilizarea unei prese de brichetare hidraulică tip MB4 Goldmark, cu caracteristicile principale indicate în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Specificații ale prese hidraulice de brichetare

Puterea prese [kW]	4
Presiune [bar]	150
Capacitate maximă [kg/h]	40
Diametrul brichetei [mm]	40
Lungimea brichetei [mm]	30-75
Conținutul maxim de umiditate [%]	17
Diametrul rezervorului [mm]	800
Dimensiunile prese (LxHxW) [mm]	1200x980x1300

Numeroase materiale conțin lianți naturali, cum ar fi rășina, ceara sau lignina. Lignina (un component important al majorității plantelor) acționează ca un liant în condițiile unei comprimări adecvate (mai mare de 5 MPa) [C2]. Prin urmare, în experimentul efectuat, amestecul de așchii de foioase și rășinoase a fost comprimat fără lianți și s-au obținut brichete cilindrice.

S-a prelevat un lot de 200 de brichete din rezervorul preseii și s-au depozitat în laboratorul de transfer de căldură la temperatura de 20 ± 1 °C și umiditatea relativă de 45 ± 2 %. Au fost măsurate câte două lungimi și două diametre la fiecare brichetă cu ajutorul unui șubler digital (ULTRA, precizie de 0.01 mm) și apoi s-au calculat valorile medii. Brichetele au avut o secțiune transversală circulară relativ uniformă ($\varnothing=40.7-41.3$ mm) și lungimi diferite, cuprinse între 30 și 75 mm. Distribuția lungimii brichetelor este indicată în figura 4.6.

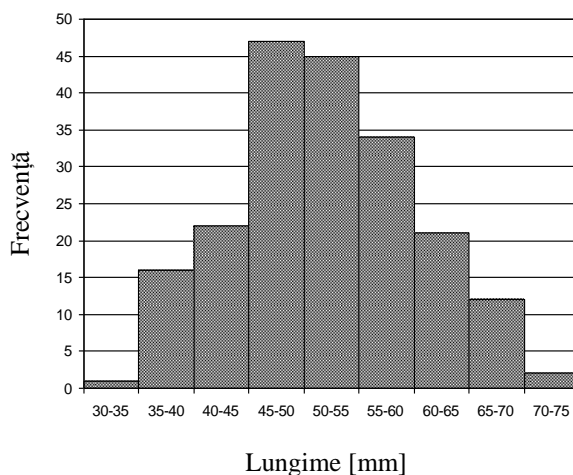


Fig. 4.6. Distribuția lungimii lotului de brichete

Din lotul de 200 de brichete s-au ales 20 de brichete pentru măsurări ulterioare, cu lungimea medie cuprinsă în distribuția centrală indicată în figura 4.6. Pentru determinarea densității brichetelor s-a utilizat o metodă stereometrică [R1]. Brichetele au fost cântărite cu ajutorul

balanței tehnice KERN-EW 3000 g (precizie de 0.01 g). Apoi au fost uscate până la starea anhidră, la temperatura de 103 ± 2 °C (până la masă constantă) pentru a determina conținutul de umiditate (raportat la masa uscată). Conținutul de umiditate s-a calculat pe baza maselor brichetelor uscate și umede (SR EN 13183-1-2003/AC-2004 [S12]). În final, s-au măsurat dimensiunile brichetelor anhidre. S-au determinat apoi densitățile brichetelor uscate și umede, folosind relațiile (4.20) și (4.43):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (4.43)$$

în care: ρ_w (kg/m³) este densitatea brichetelor umede, m_w (kg) este masa brichetelor umede, V_w (m³) este volumul brichetelor umede.

Pentru a determina conductivitatea termică s-au efectuat două orificii de $\varnothing=1.3$ mm x 30 mm în fiecare brichetă. Nouă brichete au fost găurite paralel cu axa brichetei (indicele L), iar alte nouă brichete au fost găurite perpendicular pe axa brichetei, de-a lungul razei (indicele R). Două brichete au fost găurite atât paralel, cât și perpendicular față de axă. Conductivitatea termică s-a măsurat cu aparatul KD2 Pro analyzer (Decagon Devices Inc.) folosind senzorul dual SH-1 (cu două ace cu lungimea de 30 mm, diametrul de 1.30 mm și distanța de 6 mm), pe baza metodei sursei liniare tranzitorii de căldură (transient line heat source method), ilustrată în figura 4.7.

S-au efectuat câte două sau trei măsurări la fiecare brichetă, la 0% conținut de umiditate (MC) și la umiditatea de echilibru (EMC), pentru a mări gradul de încredere al rezultatelor. Conținutul de umiditate are un efect important asupra conductivității termice [G4, S7, H3].

Pentru a mări conținutul de umiditate al brichetelor în experimentul de determinare a conductivității termice a brichetelor la diferite umidități, ele au fost umidificate în camera

climatică (KPK 200/FEUTRON) la 20°C până la 90% umiditate relativă. Conținutul de umiditate al brichetelor s-a determinat pe baza aceleiași metode indicate mai devreme [S12]. El a fost mărit atâta timp cât brichetele și-au menținut forma și a fost posibilă efectuarea măsurărilor. Conductivitatea termică s-a măsurat la fiecare brichetă în parte cu ajutorul aparatului KD2 Pro analyzer, iar densitatea s-a obținut prin metoda stereometrică indicată.

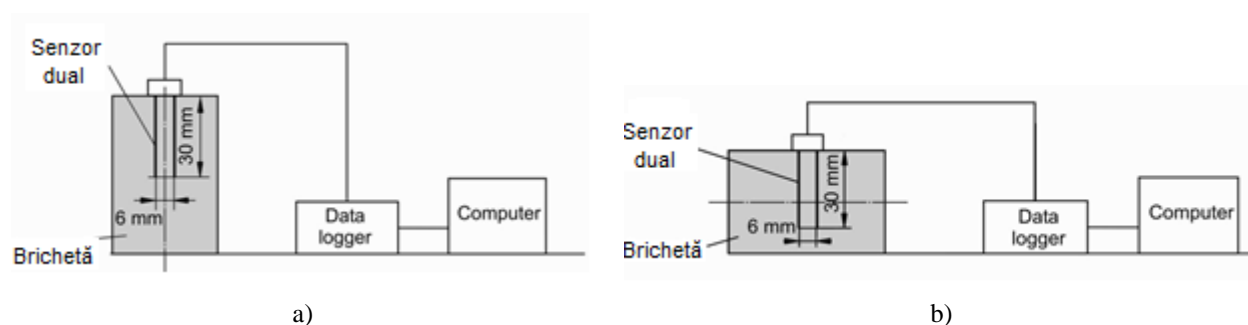


Fig. 4.7. Măsurarea conductivității termice pe baza metodei sursei liniare tranzitorii de căldură
a) paralel față de axa brichetei, b) perpendicular față de axa brichetei

Din considerente geometrice, așchiile de lemn se orientează în brichetă după două direcții principale. Majoritatea (2/3, conform [T2]) sunt orientate perpendicular pe direcția axei, iar restul (1/3, conform [T2]) sunt orientate în paralel cu axa. Din acest punct de vedere, conductivitatea termică obținută experimental poate fi exprimată în funcție de conductivitățile termice efective în direcție transversală și longitudinală prin folosirea altui factor de ponderare, α :

$$k_{exp} = \alpha k_{eff\parallel} + (1 - \alpha) k_{eff\perp} \quad (4.44)$$

Conductivitatea termică $k_{eff\parallel}$ se referă la așchiile orientate perpendicular față de axa brichetei (fluxul termic este paralel față de celulele așchiilor), iar conductivitatea termică $k_{eff\perp}$ se referă

la așchiile orientate paralel cu axa brichetei (fluxul termic este perpendicular față de celulele așchiilor). Acest lucru corespunde cu structura lemnului, conform căreia celulele sunt dispuse în două direcții principale – direcția longitudinală (paralelă cu direcția fibrelor) și direcția transversală (perpendiculară pe direcția fibrelor).

4.4. Rezultatele experimentale și ale modelelor circuitelor rezistive

Din cele douăzeci de brichete care au fost selectate pentru măsurarea conductivității termice, patru brichete au fost înlăturate din șirul de date întrucât s-au rupt în timpul umidificării lor. Cele mai afectate au fost brichetele care au fost găurite atât paralel, cât și perpendicular față de axă. De aceea, măsurările au fost efectuate doar pe 16 brichete.

Conținuturile de umiditate medii ale brichetelor în timpul umidificării au fost 5.95% (EMC), 12.2%, 13.1%, 16.3%, 17.6%, 21% și 22.7%, raportate la masa uscată.

Ambele conductivități termice efective în direcție transversală, $k_{eff \perp, A_{i+1}}$ și $k_{eff \perp, B_{i+1}}$ au fost calculate pentru cele 16 brichete pe baza relațiilor (4.6), (4.12), (4.35) și (4.36) până când diferența lor a ajuns la 1×10^{-6} . S-a calculat apoi media rezultatelor.

Conductivitățile termice efective în direcție transversală și longitudinală au fost determinate pentru fiecare brichetă la fiecare conținut de umiditate. Modelul descris de ecuațiile (4.18)-(4.23) a fost utilizat pentru umiditățile $MC=0\%$ și $MC=EMC$, iar pentru $MC>EMC$, s-a folosit modelul descris de ecuațiile (4.25)-(4.30). Umiditatea EMC medie a fost 5.95%, raportată la masa uscată. Peleții și brichetele de lemn comercializate au uzual conținutul de umiditate cuprins între 4 și 8%, raportat la masa umedă [G5].

Rezultatele au fost separate în două grupuri; un grup format din brichetele găurite paralel față de axă (indicele L) și un grup de brichete găurite perpendicular față de axă (indicele R).

Figura 4.8 indică valorile conductivității termice experimentale și modelate pentru brichetele găurite în direcție longitudinală cu MC=0% și MC=EMC, în funcție de densitatea brichetelor.

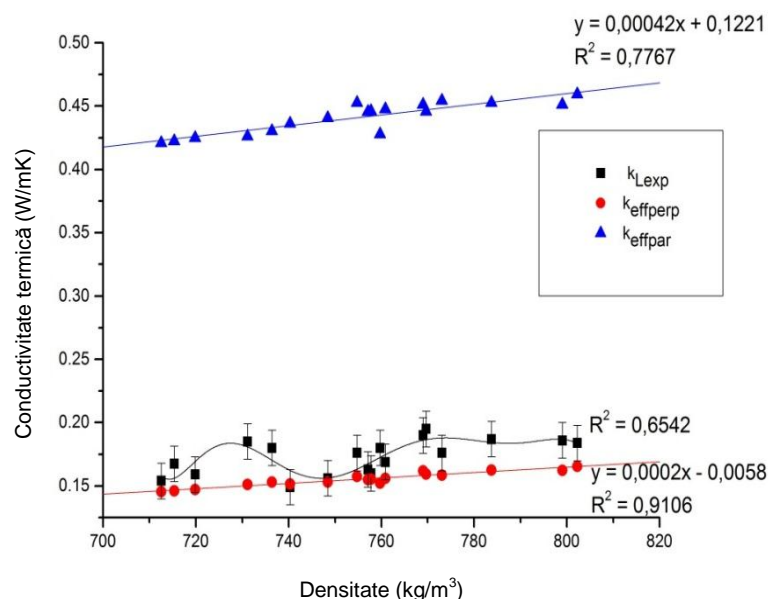


Fig. 4.8. Conductivitatea termică experimentală și modelată a brichetelor găurite longitudinal (paralel cu axa) în funcție de densitate ($MC \leq EMC$)

(k_{Lexp} – rezultate experimentale ale conductivității termice; $k_{effperp}$ – conductivitate termică efectivă în direcție transversală; k_{effpar} – conductivitate termică efectivă în direcție longitudinală)

Conductivitatea termică a brichetelor a fost măsurată la temperaturi cuprinse între 19 °C și 24°C, indicate de aparatul KD2 Pro analyzer la fiecare determinare. Pentru o mai bună înțelegere a rezultatelor s-a reprezentat conductivitatea termică în funcție de densitatea fiecărei brichete și nu în funcție de conținutul de umiditate al brichetei.

Creșterea conținutului de umiditate a condus atât la creșterea densității, cât și la creșterea conductivității termice. Conductivitatea termică obținută pe baza modelelor circuitelor rezistive a crescut cu densitatea după o regresie liniară (95% nivel de încredere). Variația valorilor experimentale ale conductivității termice în raport cu densitatea este polinomială,

tendința fiind de creștere a conductivității termice o dată cu creșterea densității. S-a efectuat și o analiză a erorilor folosind abaterea standard a datelor experimentale. Rezultatele conductivității termice se corelează bine cu densitatea, în special la modelele circuitelor rezistive, cu coeficienți de determinare (R^2) rezonabili. Coeficientul de determinare este mai mare pentru modelul rezistiv transversal.

Rezultatele experimentale și ale modelelor de determinare a conductivității termice corespunzătoare brichetelor găurite în direcție radială, având $MC=0\%$ și $MC=EMC$, sunt indicate în figura 4.9.

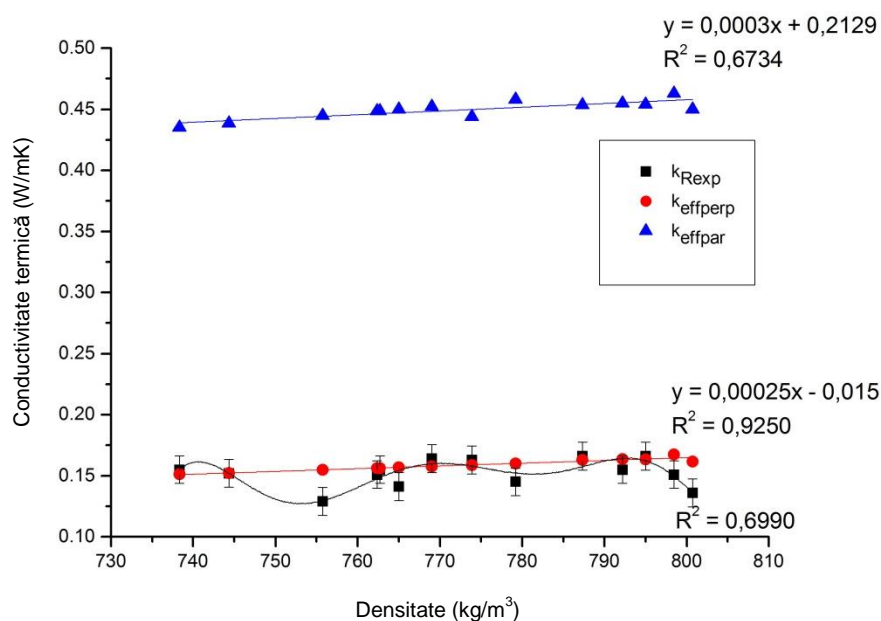


Fig. 4.9. Conductivitatea termică experimentală și modelată a brichetelor găurite radial (perpendicular față de axă) în funcție de densitate ($MC \leq EMC$)

(k_{Rexp} – rezultate experimentale ale conductivității termice; $k_{effperp}$ – conductivitate termică efectivă în direcție transversală; k_{effpar} – conductivitate termică efectivă în direcție longitudinală)

Valorile conductivităților termice ale modelelor circuitelor rezistive sunt într-o funcție liniară cu densitatea brichetelor, cu un nivel de încredere de 95%. Conductivitatea termică a crescut

cu creșterea densității. Coeficientul de determinare pentru modelul rezistiv transversal este din nou mai mare decât coeficientul de determinare pentru modelul rezistiv longitudinal. Rezultatele experimentale sunt împrăștiate (dispersate), indicând posibile diferențe locale de densitate ale brichetelor. Variația lor este mai bine descrisă de o funcție polinomială decât de o funcție liniară, luând în considerare coeficientul de determinare. Analiza erorilor s-a bazat din nou pe abaterea standard a valorilor experimentale.

În fig. 4.10 sunt prezentate conductivitățile termice experimentale și cele obținute din modelare ale brichetelor găurite în direcție longitudinală, având $MC > EMC$, în funcție de densitatea lor.

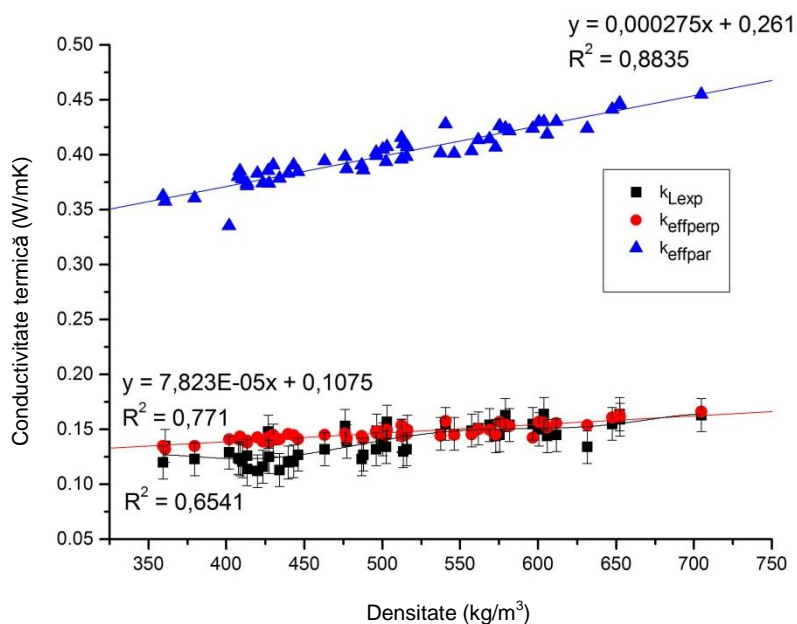


Fig. 4.10. Conductivitatea termică experimentală și modelată a brichetelor găurite longitudinal (în paralel cu axa) în funcție de densitate ($MC > EMC$)

(k_{Lexp} – rezultate experimentale ale conductivității termice; $k_{effperp}$ – conductivitate termică efectivă în direcție transversală; k_{effpar} – conductivitate termică efectivă în direcție longitudinală)

Rezultatele conductivității termice modelate sunt într-o corelație liniară cu densitatea brichetelor, la un nivel de încredere de 95%. În schimb, rezultatele experimentale sunt într-o corelație polinomială cu densitatea brichetelor. Analiza erorilor a fost efectuată folosind abaterea standard a rezultatelor experimentale. Creșterea conținutului de umiditate a determinat scăderea, atât a densității, cât și a conductivității termice, întrucât pe lângă creșterea conținutului de umiditate s-au mărit și spațiile dintre așchii. Conductivitatea termică a scăzut o dată cu scăderea densității în ambele situații, conform experimentului și conform modelelor circuitelor rezistive.

În figura 4.11 sunt prezentate conductivitățile termice experimentale și cele obținute prin modelare pentru brichetele găurite radial, cu $MC > EMC$, în funcție de densitatea brichetelor.

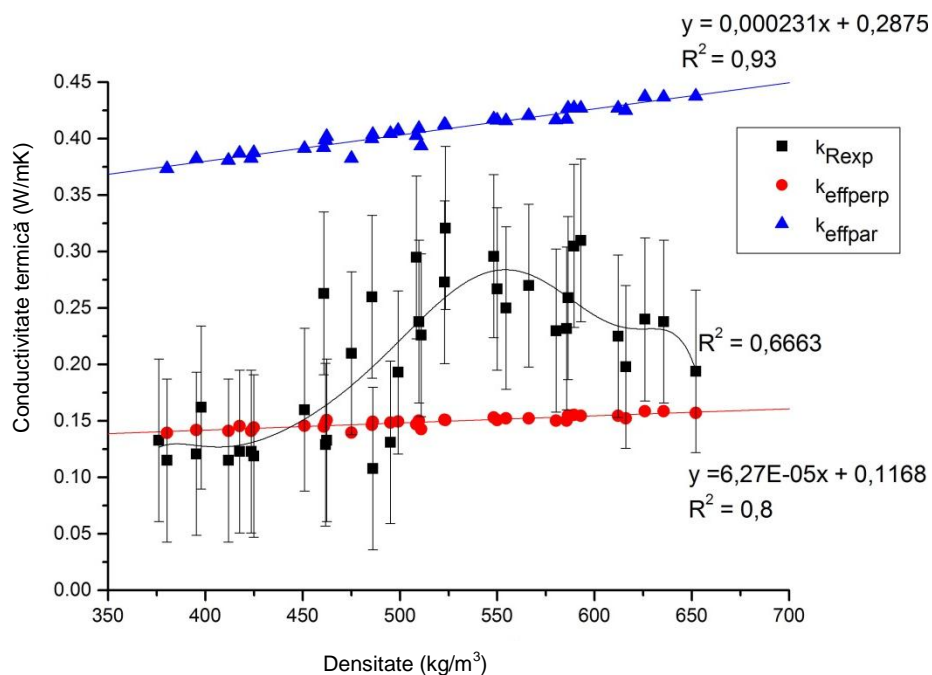


Fig. 4.11. Conductivitatea termică experimentală și modelată a brichetelor găurite radial (perpendicular față de axă) în funcție de densitate ($MC > EMC$)

(k_{Rexp} – rezultate experimentale ale conductivității termice; $k_{effperp}$ – conductivitate termică efectivă în direcție transversală; k_{effpar} – conductivitate termică efectivă în direcție longitudinală)

Rezultatele modelelor circuitelor rezistive sunt într-o corelație liniară cu densitatea brichetelor. Se observă o scădere a conductivității termice cu scăderea densității, semnificativă statistic la un nivel de încredere de 95%. Coeficienții de determinare sunt ridicați pentru ambele modele rezistive. Conductivitățile termice experimentale sunt într-o corelație polinomială cu densitatea. Rezultatele analizei erorilor, indicate de barele de eroare din figura 4.11, s-au obținut pe baza abaterii standard a datelor experimentale. Împrăștierea rezultatelor experimentale se va explica în continuare pe baza factorului de ponderare, α . De asemenea, este posibilă variația semnificativă a conductivității termice cu variația umidității. Creșterea umidității brichetelor conduce la o umflare a fibrei lemnului, mai accentuată în direcție longitudinală, iar umflarea conduce la generarea unei călduri de umflare, necuantificată în experimentul întreprins.

Factorul de ponderare α este bine corelat cu rezultatele indicate în figurile 4.8-4.11. Pentru rezultatele reprezentate în figura 4.8, valorile medii sunt $\alpha = 0.064$, respectiv $1-\alpha = 0.936$, iar pentru cele reprezentate în figura 4.9, ele sunt $\alpha = -0.024$ și $1-\alpha = 1.024$. Valoarea negativă a lui α arată abaterea modelului de la experiment datorită erorilor de măsurare cumulate (ale dimensiunilor, masei, conductivității termice), mai ales la umidități ridicate, când brichetele au început să devină fragile datorită spațiilor dintre așchii din ce în ce mai mari. A existat de asemenea o pierdere totală de masă, echivalentă a 4.59 g, rezultată din măsurările repetate.

Pentru valorile reprezentate în figura 4.10, factorul mediu de ponderare este $\alpha = -0.0269$, și prin urmare $1-\alpha = 1.0269$. În cele din urmă, pentru valorile reprezentate în figura 4.11, factorul mediu de ponderare este $\alpha = 0.238$, respectiv $1-\alpha = 0.762$. Creșterea conținutului de umiditate a produs atât umflarea fibrei lemnoase, cât și creșterea spațiilor dintre așchii. Umflarea fibrei a fost mai importantă pe lungimea brichetelor decât în direcție radială,

datorită caracteristicilor de umflare a lemnului în direcțiile longitudinală, radială și tangențială, indicând că așchiile s-au orientat preponderent perpendicular față de axa brichetei. Figura 4.10 arată că influența conductivității termice transversale ($k_{eff\perp}$ din ec. (4.44)) a fost predominantă, și $1-\alpha$ a crescut comparativ cu brichetele cu $MC \leq EMC$ (fig. 4.8). Conform figurii 4.11, conductivitatea termică longitudinală ($k_{eff\parallel}$ din ec. (4.44)) a devenit din ce în ce mai predominantă la brichetele cu densitatea cuprinsă între 500 kg/m^3 și aproximativ 650 kg/m^3 , iar factorul de ponderare α a crescut comparativ cu brichetele cu $MC \leq EMC$ (fig. 4.9). O cauză pentru aceasta ar putea fi că orientarea anumitor așchii s-a modificat de la orizontal la vertical pe măsură ce conținutul de umiditate și spațiile dintre așchii au crescut și/sau că efectul conținutului de umiditate (și prin urmare, al umflării peretelui celular) asupra conductivității termice a devenit semnificativ. Pe măsură ce volumul brichetelor a crescut și densitatea a scăzut sub 500 kg/m^3 , conductivitatea termică s-a apropiat de conductivitatea termică transversală ($k_{eff\perp}$ din ec. (4.44)) întrucât influența spațiilor dintre așchii a devenit preponderentă.

Figurile 4.8-4.11 arată că rezultatele experimentale ale conductivității termice sunt foarte apropiate de rezultatele modelelor rezistive transversale. Hunt et al. [H3] au comparat două abordări ale unui model de circuit rezistiv cu rezultatele unui model cu elemente finite (FE) 2D pentru estimarea conductivității termice transversale celulare pentru întreaga gamă de densități și umidități ale lemnului. Abordările circuitelor în paralel și în serie au dat rezultate ușor diferite. Abordarea fluxului termic paralel a condus la valori mai mici ale conductivității termice decât valorile modelului FE, iar abordarea fluxului termic în serie a condus la valori ușor mai mari, dar mai apropiate de valorile modelului FE. Ei nu au evaluat și conductivitatea termică în direcție longitudinală a celulelor lemnoase.

Factorul de ponderare ξ (ec. (4.42)) este 0.479 și se găsește în intervalul indicat de Thunman and Leckner în [T2]. El s-a calculat pentru fiecare brichetă în parte prin utilizarea valorii medii a conductivităților termice efective transversale (ec. (4.41)) și a valorilor obținute pentru $k_{eff\perp, A_{i+1}}$ și $k_{eff\perp, B_{i+1}}$. Rapoartele conductivităților termice medii longitudinale și radiale determinate experimental și prin modelare sunt $k_{Lexp} / k_{Rexp} = 0.831$, $k_{Leff\perp} / k_{Reff\perp} = 0.9822$ și $k_{Leff\parallel} / k_{Reff\parallel} = 0.9833$, ceea ce corespunde cu afirmația făcută de Thunman and Leckner în [T2] și anume aceea că, conductivitatea termică efectivă a peleților, și prin extensie, a brichetelor devine aceeași în toate direcțiile. Acest lucru este diferit față de lemn, unde raportul dintre conductivitatea termică transversală și cea longitudinală este de aproximativ 1:2.5 [S6].

Rezultatele experimentale ale conductivității termice a brichetelor depind de densitate, conținut de umiditate, și într-o măsură mai mică, de direcția de măsurare. Densitatea brichetelor a variat de la 330 kg/m³ (la umiditatea admisibilă maximă) până la 802 kg/m³ (la umiditatea de echilibru), iar conținutul de umiditate a variat de la 0% la 24.5%, raportat la masa uscată.

Conductivitatea termică a brichetelor găurite longitudinal a variat între 0.11 și 0.195 W/mK, iar cea a brichetelor găurite radial a variat între 0.103 și 0.32 W/mK. Fasina și Sokhansanj [F1] au determinat conductivitatea termică a peleților din lucernă și au obținut valori cuprinse între 0.112 și 0.204 W/mK într-un interval de umidități de 7.5% și 18% (raportate la masa umedă). Guo et al. [G4] au determinat conductivitatea termică a unui singur pelete din lemn cu umiditatea cuprinsă între 1.7% și 9% (raportată la masa umedă) și densitatea de aproximativ 1200 kg/m³, care a variat între 0.233 și 0.319 W/mK. În intervalul de umidități indicat de autori, conductivitatea termică a crescut cu creșterea umidității peleților.

Conductivitatea termică a unui singur pelete cu umiditatea cuprinsă între 2.9% și 11.7% și cu densitatea de 1290 kg/m^3 a fost măsurată la temperatura de 22°C de Sjöström și Blomqvist [S7]. Rezultatele au variat între 0.185 W/mK și 0.325 W/mK , cu o împrăștiere de 16%. Ei au constatat că, conductivitatea termică a crescut cu creșterea conținutului de umiditate de la 2.9% până la 7.5%, până când peleții au început să se umfle, și apoi a scăzut cu creșterea conținutului de umiditate de la 7.5% până la 11.7%. Ei au explicat rezultatele experimentale obținute prin faptul că creșterea umidității a condus la scăderea densității, și deci a conductivității termice, fără a le compara cu vreun model teoretic.

Ecuțiile dezvoltate pot fi utilizate la determinarea conductivității termice efective a brichetelor din lemn într-un interval de umidități sub umiditatea de saturație a fibrei, contribuind la o mai bună înțelegere a relației așchii de lemn comprimate-umiditate-densitate în procesele de transfer de căldură.

Modelele propuse și utilizate la determinarea conductivității termice efective a brichetelor sunt incluse în lucrarea:

Șova D., Porojan M., Bedeleian I.B., Huminic G. (2018) Effective thermal conductivity models applied to wood briquettes, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 124, issue 2, pp. 1-12.

Capitolul 5. Relația dintre porozitatea și rugozitatea brichetelor de lemn

5.1. Porozitatea și densitatea lemnului și ale brichetelor în cercetările actuale

Porozitatea este una din proprietățile fizice ale lemnului, respectiv brichetelor de lemn, care este importantă la analiza și modelarea arderii, la procesele de transfer de căldură și masă în timpul etapelor de ardere sau la determinarea conductivității termice efective [H3, R3, S4]. Este de asemenea corelată cu densitatea și durabilitatea brichetelor [K1].

Usta [U2] a definit lemnul ca un material celular-poros compus din substanța peretelui celular și din goluri care conțin aer și alte substanțe de extracție. Fără goluri și spații intercelulare, densitatea substanței peretelui celular este constantă (1530 kg/m^3 , raportată la masa și volumul anhidru). De aceea, cantitatea substanței peretelui celular (K) este o funcție de densitatea lemnului, d ($K=d/1530$), iar volumul golurilor (porozitatea, P) este definită în relație cu substanța peretelui celular ($P=1-K$).

Siau [S6] a abordat celula lemnoasă ca un model rectangular de secțiune pătrată, cu dimensiuni totale unitare (fig. 5.1.a).

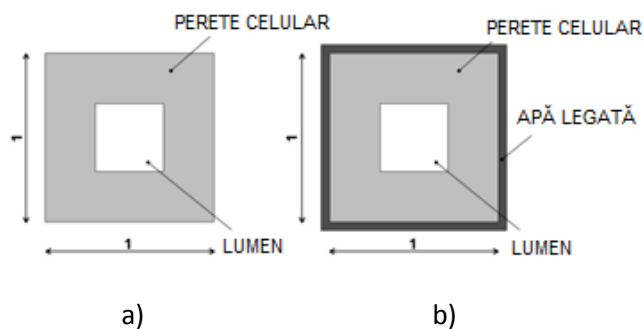


Fig. 5.1. Model de celulă lemnoasă (secțiune transversală)
a) condiții anhidre, b) condiții umede

Toate celulele au aceleași dimensiuni, iar capetele celulelor se neglijează. Golul celular are de

asemenea secțiune pătrată. Modelul se referă la celule aflate la starea anhidră, când lumenul conține doar aer stagnant. Un model mai general al celulei lemnoase, care ia în considerare și conținutul de umiditate al lemnului, a fost descris de Siau [S6], dar și de Hunt et al. în [H3]. În acest caz, apa legată este adăugată sub forma unei arii exterioare, care înconjoară secțiunea transversală a celulei de arie unitară (fig. 5.1.b).

Porozitatea lemnului poate fi determinată prin utilizarea metodelor picnometrice, dislocuirii de lichide și porozimetriei prin intruziunea mercurului [D5, M2, P4]. Dar, lemnul are o configurație diferită de cea a brichetelor de lemn și poate fi supus, prin urmare, diferitelor metode de măsurare a porozității. Porozimetria cu mercur și picnometria cu gaze sunt de regulă folosite la estimarea distribuției dimensiunii porilor și a porozității lemnului. Conform Moura et al. [M2], porozimetria cu mercur este adecvată pentru evaluarea porozității lemnului, celulozei și hârtiei, fiind un instrument util pentru anticiparea unor proprietăți precum rugozitatea, permeabilitatea aerului sau distribuirea peliculelor de acoperire. O limitare a porozimetrului folosit de autori a fost incapacitatea lui de a detecta golurile cu diametre sub $0.007 \mu\text{m}$.

Mai recent, în articolul [H1] s-au utilizat tomografia computerizată (CT) și metoda imagisticii electronice (backscattered electron imaging method) pentru investigarea și cuantificarea porozității lemnului (secțiunea transversală a bambusului). Autorii cercetării au comparat diferitele metode de măsurare a porozității, precum porozimetria cu mercur, picnometria cu gaz, procesarea imaginilor microscopice și tomografia computerizată.

În schimb, s-au folosit mai puține metode de măsurare a porozității brichetelor sau peletilor (porozitatea în vrac sau individuală). Porozitatea individuală a brichetelor realizate din cărbune și știuleți de porumb în diferite proporții, cu liant, a fost determinată de Ikelle și

Ivoms [I1] pe baza cantității de apă absorbite de fiecare brichetă în parte. Porozitatea a fost calculată ca raport între masa de apă absorbită și masa brichetei imersate în apă.

Densitatea brichetelor reprezintă un indicator de calitate al combustibililor densificați, influențând caracteristicile de ardere (conductivitate termică, durată de ardere și viteza de degazificare) [O1]. Există mai multe metode de determinare a densității brichetelor, care este definită ca raport între masa și volumul unei brichete, inclusiv volumul porilor (spații care sunt specifice structurii lemnului și care rezultă din compactarea particulelor de lemn), după cum au indicat Rabier et al. în [R1]. Ei au efectuat măsurări ale densității pentru cinci tipuri de brichete prin metode stereometrice și metode bazate pe dislocuirea lichidului (hidrostatice și prin flotabilitate).

Întrucât porozitatea este importantă la analiza arderii brichetelor, a fost interesant de observat dacă această proprietate poate fi determinată indirect printr-o altă metodă, cum ar fi de exemplu, măsurarea unor parametri de rugozitate ai suprafeței brichetei în corelație cu densitatea brichetei.

Plecând de la diferitele studii efectuate asupra lemnului, se poate aprecia că atât porozitatea [U2], cât și parametrii de rugozitate [G6] sunt proprietăți dependente de densitate.

Literatura analizată nu oferă informații cu privire la determinarea experimentală a porozității brichetelor de lemn, care este o sarcină dificilă având în vedere structura brichetelor de lemn obținute fără lianți. De aceea, a fost util de a observa, pe de o parte în ce măsură relațiile de calcul al porozității lemnului pot fi aplicate la brichete și, pe de altă parte, dacă există corelații între o mărime măsurabilă, precum rugozitatea și o mărime calculată, care este porozitatea. Prin urmare, sunt prezentate în continuare corelațiile obținute între următoarele mărimi: porozitate și densitatea brichetelor, rugozitate și densitatea brichetelor, precum și rugozitate

și porozitatea brichetelor. Atât porozitatea, cât și densitatea s-au determinat prin trei metode diferite.

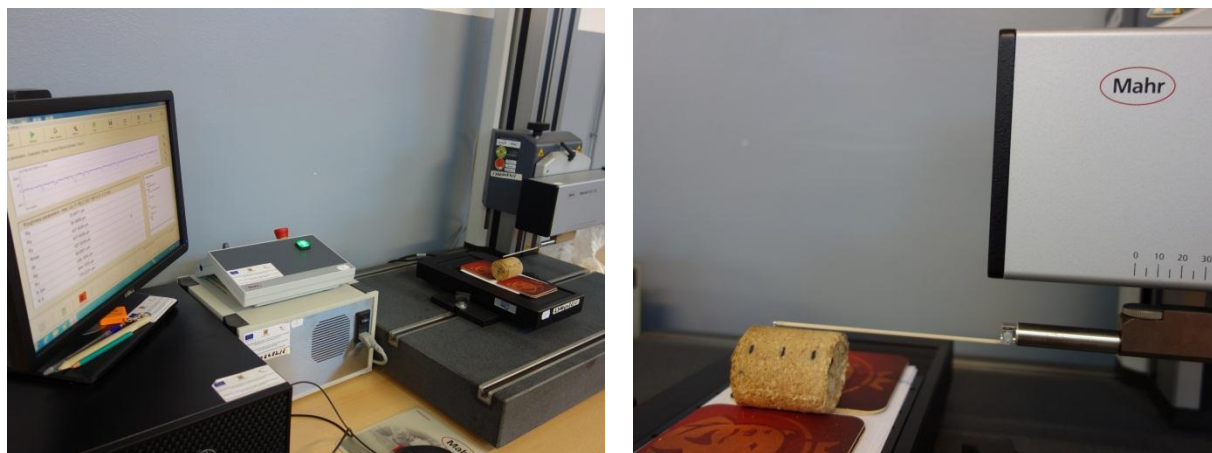
5.2. Descrierea brichetelor

Brichetele utilizate au fost obținute din așchii de fag și molid, provenite din resturile de material rezultate de la prelucrarea secundară a lemnului (rindeluire și șlefuire) în atelierul Facultății de design de mobilier și inginerie a lemnului. În fiecare lună sunt prelucrați 4 m³ de lemn, din care aproximativ 1.2 m³ sunt resturi datorate defectelor lemnului și în jur de 1 m³ sunt deșeuri rezultate de la prelucrare. Lemnul prelucrat în atelier a fost fag și molid provenit din surse locale, într-o proporție 20% : 80%. Conținutul de umiditate al lemnului a variat între 8.1% și 11.4% și a fost măsurat cu un umidometru capacitiv (PM1-E, Merlin). Cea mai mare parte a deșeurilor de prelucrare este valorificată prin compactare în brichete. Dimensiunile așchiilor au variat între 2 mm și 40 mm în lungime, 2 mm și 15 mm în lățime, respectiv 1 mm și 1.5 mm pe grosime. Așchiile au fost comprimate cu ajutorul preseii de brichetare hidraulice MB4 GOLDMARK, cu caracteristicile principale indicate în tabelul 4.2. Amestecul de așchii a fost comprimat fără lianți, obținându-se brichete cilindrice cu diferite lungimi.

5.3. Parametrii de rugozitate ai brichetelor

S-au preluat aleatoriu zece brichete din rezervorul preseii și s-au păstrat într-un mediu controlat (temperatura de 22±1 °C și umiditatea relativă de 40±2 %). Inițial, brichetele au fost supuse măsurărilor de rugozitate. Măsurările s-au efectuat cu instrumentul MarSurf XT20, produs de MAHR Gottingen GMBH și echipat cu un cap de scanare MFW 250, cu brațul de trasare în domeniul ±500 μm și un palpator cu raza vârfului de 2 μm și unghiul vârfului de

90°, care s-a deplasat pe lungimea brichetelor cu o viteză de 0.5 mm/s și o forță de scanare scăzută, de 0.7 mN (fig.5.2). Instrumentul are instalat programul MARWIN XR20 pentru prelucrarea datelor măsurate.



a)

b)

Fig.5.2. Măsurarea rugozității suprafeței brichetelor cu ajutorul echipamentului MarSurf
a) echipament, b) detaliu al palpatorului în contact cu bricheta

Rugozitatea a fost măsurată pe o lungime a brichetelor de 15 mm. S-au efectuat câte patru măsurări la fiecare brichetă, pe lungimi ale brichetei orientate la unghiuri de 90° ale secțiunii transversale, astfel încât s-au obținut în total 40 de profiluri analizate pentru evaluarea în continuare a parametrilor de rugozitate. Rezoluția de măsurare laterală a fost de 5 μm , iar instrumentul a asigurat o rezoluție verticală de 50 nm.

Profilurile de rugozitate s-au obținut prin filtrarea fiecărui profil, utilizând un filtru robust RGRF (Robust Gaussian Regression Filter), specificat în ISO 16610-31 [13]. Acest filtru a fost testat și s-a dovedit a fi util pentru suprafețele lemnoase. Argumentul pentru folosirea profilurilor de rugozitate a fost acela că rugozitatea caracterizează neregularitățile de pe suprafață cu frecvențele cele mai mari, considerate a avea o mai mare probabilitate de a fi

asociate cu porozitatea brichetelor, în comparație cu alte tipuri de neregularități cu frecvență mai mică. După generarea profilurilor de rugozitate, s-a calculat Ra (abaterea medie aritmetică a neregularităților profilelor evaluate) pe lungimile testate, conform ISO 4287 [14]. Alți parametri calculați au fost parametrii curbei Abbot Rpk , Rk și Rvk , conform ISO 13565-2 [15]. Rk reprezintă adâncimea profilului de rugozitate, Rpk este înălțimea medie a vârfurilor proeminente ale profilului de rugozitate, iar Rvk este adâncimea medie a profilului. Rvk este în mod special sensibil la golurile anatomice ale speciei sau la diferite goluri apărute în procesul de brichetare. S-a determinat și suma $Rk+Rpk+Rvk$ pentru comparație, datorită efectului cumulativ asupra rugozității suprafeței, și care împreună cu Rvk ar trebui să fie sensibili la variațiile densității brichetei, respectiv porozității. Pentru fiecare brichetă și parametru de rugozitate, s-au calculat valoarea medie și abaterea standard.

5.4. Densitatea brichetelor

Pentru evaluarea densității brichetelor s-au utilizat două metode stereometrice și o metodă de dislocuire a lichidului. Rațiunea aplicării diferitelor metode a fost de a evalua cea mai bună corelație a densității cu porozitatea și cu parametrii de rugozitate. Prima metodă stereometrică ($St1$) s-a bazat pe măsurarea lungimii și a diametrului fiecărei brichete și pe calculul volumului unui cilindru ca formă geometrică regulată. S-au măsurat două lungimi (pe direcții perpendiculare) și trei diametre (la fiecare capăt și în mijloc) la fiecare brichetă cu ajutorul unui șubler digital (ULTRA, precizie de 0.01 mm). S-au calculat apoi valorile medii și volumele brichetelor. S-au cântărit brichetele cu ajutorul balanței tehnice KERN-EW 3000 g (precizie de 0.01 g). S-a determinat densitatea ca raport între masa și volumul brichetei.

A doua metodă stereometrică ($St2$) a constat în estimarea ariei transversale a fiecărei

brichete prin intermediul unei foi de hârtie cu densitate raportată la arie cunoscută (80 g/m^2), după cum este indicat în [R1]. Bricheta s-a așezat în poziție verticală pe foaie, s-a desenat conturul pe hârtie și s-a decupat suprafața rezultată. S-a cântărit apoi bucata de hârtie și s-a determinat suprafața ei din masa și densitatea hârtiei. Suprafața de hârtie, care aproximează suprafața transversală a brichetei s-a înmulțit cu lungimea medie a brichetei și s-a obținut astfel volumul brichetei. Din nou s-a determinat densitatea ca raport între masa și volumul brichetei.

După aceea brichetele s-au uscat în etuvă la $103 \pm 2^\circ\text{C}$ până la masă constantă pentru a determina conținutul de umiditate (raportat la masa uscată). Conținutul de umiditate s-a calculat pe baza maselor brichetei umede și anhidre (SR EN 13183-1-2003/AC-2004 [S12]). În final, s-au măsurat dimensiunile brichetelor anhidre folosind cele două metode stereometrice prezentate mai devreme. Densitățile brichetelor anhidre și umede s-au calculat pe baza relațiilor (5.1) și (5.2):

$$\rho_{ODbr.} = \frac{m_{0br.}}{V_{0br.}} \quad (5.1)$$

$$\rho_{br.} = \frac{m_{br.}}{V_{br.}} \quad (5.2)$$

în care: $\rho_{ODbr.}$ (kg/m^3) și $\rho_{br.}$ (kg/m^3) sunt densitățile brichetelor uscate și umede, $m_{0br.}$ (kg) și $m_{br.}$ (kg) sunt masele brichetelor uscate și umede, $V_{0br.}$ (m^3) și $V_{br.}$ (m^3) sunt volumele brichetelor uscate și umede. Brichetele umede sunt cele care au umiditatea de echilibru.

Volumul brichetelor uscate și umede obținut prin metoda dislocuirii de lichid a fost determinat prin imersarea (Im) fiecărei brichete în toluen ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$), având densitatea egală cu 865.5 kg/m^3 la 20°C . Volumul brichetei s-a obținut din masa volumului de toluen dislocuit prin imersarea brichetei în lichid. Mai întâi, s-a umplut un pahar Berzelius cu toluen până la

un volum fix (constant) (fig. 5.3a).

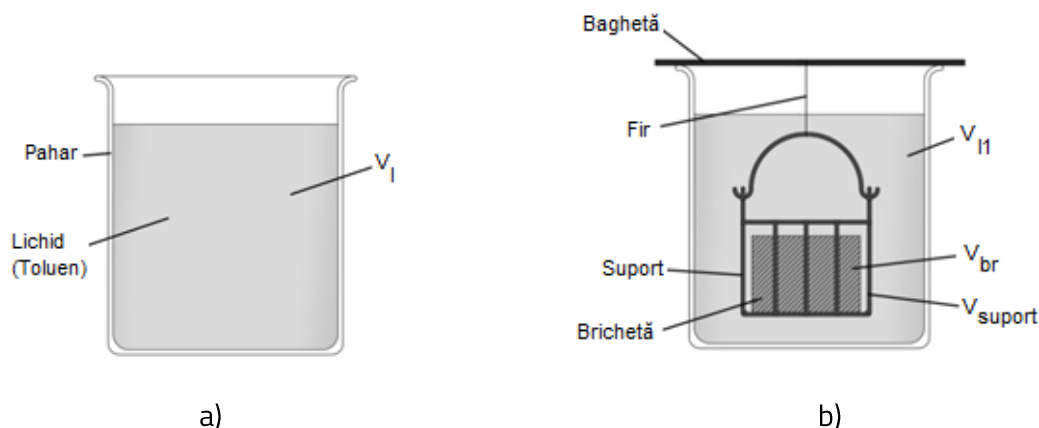


Fig. 5.3. Determinarea volumului brichetei prin metoda dislocuirii de lichid
a) înainte de imersarea brichetei, b) după imersarea brichetei

S-a cântărit paharul cu toluen. Apoi, s-a introdus bricheta într-un suport metalic tip colivie, care s-a imersat în vasul Berzelius cu toluen. Partea de lichid excedentară față de volumul fixat inițial s-a îndepărtat. S-a determinat din nou masa prin cântărire. Suportul metalic a fost atârnat de un fir textil susținut de o baghetă de sticlă sprijinită de pahar (fig.5.3b). Volumul brichetei s-a calculat din densitatea toluenului și diferența maselor de toluen înainte și după imersarea brichetei. Densitatea brichetelor s-a obținut prin această metodă pe baza figurii 5.3b și a ecuațiilor indicate mai jos:

$$V_l = V_{l_1} + V_{br.} + V_{suport} \quad (5.3)$$

în care: V_l (m^3) este volumul de lichid (toluen) din pahar fixat inițial, V_{l_1} (m^3) este volumul de lichid din pahar după imersarea suportului cu bricheta (partea de lichid care a depășit volumul inițial a fost îndepărtată), $V_{br.}$ (m^3) este volumul brichetei, V_{suport} (m^3) este volumul suportului. După rearanjarea termenilor din ecuația (5.3), volumul brichetei devine:

$$V_{br.} = V_l - V_{l_1} - V_{suport} \quad (5.4)$$

Ecuția (5.4) poate fi scrisă și în funcție de mase și densitatea lichidului (ρ_l), sub forma:

$$V_{br.} = \frac{m_l - m_{l_1}}{\rho_l} - V_{support} \quad (5.5)$$

iar expresia densității brichetei devine:

$$\rho_{br.} = \frac{m_{br.}}{\frac{m_l - m_{l_1}}{\rho_l} - V_{support}} \quad (5.6)$$

Termenii m_l (kg) și m_{l_1} (kg) se referă la masele de lichid corespunzătoare volumelor V_l și V_{l_1} .

Masa baghetei de sticlă a fost de fiecare dată extrasă din măsurările masei.

Brichetele sunt materiale poroase. În timpul imersării, o parte din pori (goluri dezvoltate în timpul comprimării așchiilor) s-au umplut cu lichid. Pentru a identifica posibile erori, s-a determinat mai întâi masa lichidului, a brichetei și a suportului, după cum se poate vedea în figura 5.3b; apoi s-au efectuat măsurări separate ale masei lichidului (M_{l_1}), masei brichetei cu pori umpluți cu lichid ($m_{br.u}$) și a suportului ($m_{support}$).

Masa totală este:

$$M = m_{l_1} + m_{br.u} + m_{support} \quad (5.7)$$

iar suma maselor individuale este:

$$M' = M_{l_1} + m_{br.u} + m_{support} \quad (5.8)$$

În timpul măsurărilor succesive ale masei, o parte din toluen s-a evaporat și deci, m_{l_1} poate fi diferit de M_{l_1} . Diferența

$$M - M' = m_{l_1} - M_{l_1} = \Delta \quad (5.9)$$

reprezintă eroarea care apare în timpul măsurărilor masei. Erorile au fost calculate pentru toate brichetele și au fost foarte mici, sub 1 g. A fost evaluat și raportul Δ/M_{l_1} care este sub 0.2%, ceea ce arată că în timpul experimentului pierderile masei de lichid au fost ne semnificative. Lichidul care umple o parte din pori nu influențează determinarea volumului

brichetei prin metoda dislocuirii de lichid. S-au efectuat corecturi la calculul densității pentru ușoare variații ale umidității brichetelor.

Volumul suportului a fost determinat de asemenea prin metoda dislocuirii de lichid și a fost calculat conform următoarelor relații:

$$V_l = V_{l_2} + V_{suport} \quad (5.10)$$

sau

$$V_{suport} = V_l - V_{l_2} = \frac{m_1 - m_{l_2}}{\rho_l} \quad (5.11)$$

unde: V_{l_2} (m^3) este volumul de lichid existent în pahar când s-a imersat suportul și m_{l_2} (kg) este masa corespunzătoare (fig.5.4).

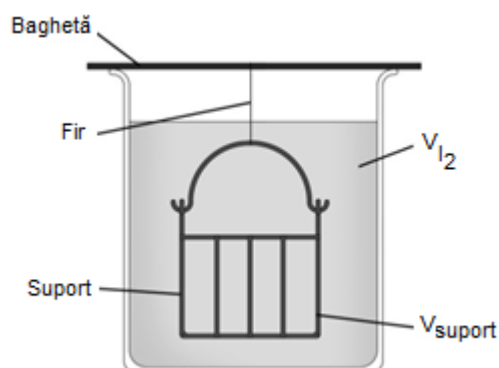


Fig. 5.4. Determinarea volumului suportului pe baza metodei dislocuirii de lichid

5.5. Porozitatea brichetelor

În continuare, s-a calculat porozitatea brichetelor prin trei metode. Una din metode este foarte des menționată în literatură, de exemplu în [P4, H3, H1], iar celelalte două sunt indicate în două articole, Siau [S6] și Hunt et al. [H3], prezentate în continuare.

Prima metodă aplicată se bazează pe relațiile indicate de diferiți autori. Plötze și Niemz [P4] au calculat porozitatea anhidră (P_d) a diferitelor specii de lemn pe baza densității anhidre (ρ_{00})

și a densității peretelui celular (ρ_{cw}), după cum urmează:

$$P_d = 1 - \frac{\rho_{OD}}{\rho_{cw}} \quad (5.12)$$

Hunt et al. [H3] au determinat porozitatea celulei lemnoase anhidre (P_d) din densitatea anhidră (ρ_{OD}), densitatea peretelui celular (ρ_{cw}) și densitatea aerului (ρ_{aer}), pe baza ecuațiilor:

$$\rho_{OD} = \rho_{cw}(1 - P_d) + \rho_{aer}P_d \quad (5.13)$$

și

$$P_d = \frac{\rho_{cw} - \rho_{OD}}{\rho_{cw} - \rho_{aer}} \quad (5.14)$$

Ei au presupus că o dată cu creșterea conținutului de umiditate, dimensiunea lumenului celulei lemnoase rămâne aceeași întrucât conținutul de umiditate (apa legată) este adăugată sub forma unui strat exterior peretelui celular (fig. 5.1b). Totuși, ei au calculat și o porozitate umedă (a se vedea a treia metodă descrisă mai jos), întrucât latura secțiunii transversale a peretelui celular crește o dată cu creșterea conținutului de umiditate (modificarea dimensională datorată creșterii conținutului de umiditate este adăugată în exteriorul dimensiunii peretelui celular).

Similar cu Hunt et al. [H4], Huang et al. [H1] au calculat porozitatea anhidră a lemnului de bambus (P_d) din densitatea aparentă (ρ_{OD}) (care include substanța lemnoasă și golurile) și densitatea structurală (ρ_{cw}) (care exclude golurile lemnului), folosind o relație similară cu ecuația (5.13).

Porozitatea uscată are, conform autorilor menționați, o expresie similară, care ia sau nu în considerare densitatea aerului. Întrucât densitatea aerului este în jur de 1 kg/m^3 , ea poate fi neglijată.

A doua metodă de determinare a porozității lemnului în condiții umede se bazează pe ecuația

lui Siau, indicată în [S6]:

$$P = 1 - \frac{m_0}{1000 V} (0.653 + 0.01MC) \quad (5.15)$$

în care: P este porozitatea lemnului, 0.653×10^{-3} (m^3/kg) este volumul specific al substanței lemnoase, MC (%) este conținutul de umiditate, m_0 (kg) este masa lemnului anhidru și V (m^3) este volumul lemnului umed (la umiditatea de echilibru).

Ecuția (5.15) s-a obținut prin scăderea participației volumice a peretelui celular (substanței lemnoase) ($V\%_{sl}$) și a participației volumice a umidității ($V\%_M$) din 1:

$$P = 1 - V\%_{sl} - V\%_M \quad (5.16)$$

Întrucât compoziția lemnului constă din pereți celulari în stare uscată, apă legată și goluri celulare umplute cu aer, se poate considera o situație similară și în cazul brichetelor, iar ecuația (5.16) devine astfel valabilă și pentru brichetele de lemn. Golurile create în timpul comprimării particulelor din lemn pot fi adăugate la golurile celulare ale lemnului și considerate ca un spațiu total de goluri.

A treia metodă utilizată la calculul porozității lemnului, propusă de Hunt et al. [H3], se bazează pe porozitatea celulei anhidre și pe conținutul de umiditate. Densitatea celulei lemnoase anhidre a fost exprimată în ecuația (5.13), iar porozitatea anhidră a fost definită prin ecuația (5.14). Densitatea peretelui celular uscat $\rho_{cw} = 1530 \text{ kg/m}^3$, utilizată la calculul porozității uscate (ec. (5.14)), se bazează pe determinarea ei prin metoda dislocuirii apei, după cum menționează Siau în lucrarea [S6]. Densitatea aerului la 20°C este $\rho_{aer} = 1.18 \text{ kg/m}^3$ [I2].

Porozitatea umedă a fost obținută de aceiași autori din relația:

$$P = \frac{(1 - V\%_{bw})P_d}{1 - V\%_{bw}P_d} \quad (5.17)$$

în care: $V\%_{bw}$ este participația volumică a apei legate.

Participația volumică a apei legate se calculează în raport cu umiditatea lemnului, conform ecuațiilor (5.18) și (5.19), [H3]:

$$MC = \frac{V\%_{bw} \rho_{bw}}{\rho_{cw}(1 - V\%_{bw})} \quad (5.18)$$

sau

$$V\%_{bw} = \frac{\rho_{cw} MC}{\rho_{cw} MC + \rho_{bw}} \quad (5.19)$$

în care: ρ_{bw} este densitatea apei legate; pentru calculul participației volumice a apei legate autorii lucrărilor [S6, H3] au considerat $\rho_{bw} = 1115 \text{ kg/m}^3$. Ecuațiile prezentate mai sus, dezvoltate de Hunt et al. [H3] pentru lemn, au fost utilizate la calculul conductivității termice efective a brichetelor de lemn cu conținutul de umiditate cuprins între 0% și 22.7%, raportat la masa uscată (capitolul 4). Din nou, celula lemnoasă este componenta structurală atât a lemnului, cât și a brichetelor de lemn, arătând valabilitatea metodei în cazul brichetelor. Modelul celulei lemnoase aplicat la brichete presupune un lumen mai mare, care include și spațiile dintre așchii, după cum s-a arătat pe larg în capitolul 4.

Prima metodă de calcul al porozității, descrisă mai sus, s-a referit doar la calculul porozității caracteristice condițiilor anhidre. Pentru a o putea compara cu a doua și a treia metodă (pentru condiții umede), a fost necesar să se dezvolte o ecuație modificată, care să fie valabilă pentru calculul porozității în condiții umede.

Prin urmare, considerând ecuațiile (5.13) și (5.14), se pot scrie ecuații similare pentru densitatea și porozitatea umedă a celulelor lemnoase. Densitatea poate fi exprimată sub forma:

$$\rho_u = \rho_{cw_M} (1 - P) + \rho_{aer} P \quad (5.20)$$

în care: ρ_{cw_M} reprezintă densitatea peretelui celular cu apă legată.

Densitatea peretelui celular cu apă legată se obține din regula amestecurilor:

$$\rho_{cw_M} = \rho_{cw}(1 - V\%_{bw}) + \rho_{bw}V\%_{bw} \quad (5.21)$$

Porozitatea umedă se obține din ecuația (5.20):

$$P = \frac{\rho_{cw_M} - \rho_w}{\rho_{cw_M} - \rho_{aer}} \quad (5.22)$$

Ecuația nou dezvoltată (ec. (5.22)), bazată pe prima metodă, s-a aplicat în continuare pentru a determina porozitatea umedă a brichetelor. Ea a fost denumită în analiza porozității drept "relație generală". Ecuația (5.22) se poate justifica prin relațiile următoare.

Masa unei celule lemnoase, care constă din perete celular, apă legată și aer în lumen, este:

$$m = m_{cw} + m_{bw} + m_{aer} \quad (5.23)$$

în care: m_{cw} este masa peretelui celular, m_{bw} este masa apei legate, m_{aer} este masa aerului din lumenul celulei lemnoase. Înlocuind masele prin volumele și densitățile corespunzătoare, se obține următoarea relație:

$$\rho \cdot V = \rho_{cw}V_{cw} + \rho_{bw}V_{bw} + \rho_{aer}V_{aer} \quad (5.24)$$

Dacă se împarte fiecare termen al ecuației (5.24) la V , se obține ecuația (5.25):

$$\rho = \frac{\rho_{cw}V_{cw} + \rho_{bw}V_{bw}}{V} + \rho_{aer}P \quad (5.25)$$

Prin definiție, porozitatea este:

$$\frac{V_{aer}}{V} = P \quad (5.26)$$

De asemenea, pot fi scrise următoarele relații:

$$V = V_{cw_M} + V_{aer} \quad (5.27)$$

$$V_{cw_M} = V_{cw} + V_{bw} \quad (5.28)$$

și

$$\frac{V_{cw_M}}{V} = 1 - P \quad (5.29)$$

în care: V_{cw_M} este volumul peretelui celular cu apă legată.

Participațiile volumice ale peretelului celular și apei legate sunt date de expresiile:

$$\frac{V_{cw}}{V_{cw_M}} = 1 - V\%_{bw} \quad (5.30)$$

$$\frac{V_{bw}}{V_{cw_M}} = V\%_{bw} \quad (5.31)$$

Considerând ecuațiile (5.27)-(5.31), ecuația (5.25) devine:

$$P = \frac{\rho - \rho_{cw}(1 - V\%_{bw}) - \rho_{bw}V\%_{bw}}{\rho_{air} - \rho_{cw}(1 - V\%_{bw}) - \rho_{bw}V\%_{bw}} \quad (5.32)$$

Prin înlocuirea ecuației (5.21) în ecuația (5.32), ecuația (5.25) devine:

$$P = \frac{\rho_{cw_M} - \rho}{\rho_{cw_M} - \rho_{air}} \quad (5.33)$$

care este identică cu ecuația (5.22).

Având porozitatea și densitatea brichetelor determinate prin cele trei metode descrise mai devreme, s-au examinat în continuare corelațiile dintre: porozitate și densitatea brichetelor, parametrii de rugozitate ai suprafeței și densitatea brichetelor, rugozitatea suprafeței și porozitatea brichetelor.

5.6. Rezultatele experimentale și corelațiile dintre parametrii experimentali și calculați

Rezultatele obținute din determinarea densității celor 10 brichete aflate la umiditatea de echilibru (EMC) sunt indicate în tabelul 5.1. Umiditatea de echilibru a brichetelor (raportată la masa uscată) a variat între 8.13% și 8.74%, cu o medie de 8.41%.

Tabelul 1. Valori experimentale, valori medii și abaterile standard ale densității (la EMC), porozității și rugozității brichetelor

Densitate (kg/m ³)		Porozitate			Rugozitate (μm)		
		Siau	Hunt et al.	Relație generală	Ra	Rvk	Rk+Rpk+Rvk
Prima metodă stereometrică	906.0	0.39	0.39	0.39	26.7	89.1	194.0
	888.6	0.40	0.40	0.40	25.2	84.9	177.1
	823.2	0.44	0.44	0.45	34.5	95.6	249.1
	894.0	0.39	0.40	0.40	23.6	61.7	178.6
	855.7	0.42	0.43	0.43	32.0	109.4	231.6
	864.2	0.41	0.42	0.42	25.5	92.8	201.1
	864.2	0.41	0.42	0.42	32.7	108.9	222.3
	909.2	0.38	0.40	0.39	25.7	68.7	192.4
	832.9	0.44	0.44	0.44	28.4	104.7	200.0
	907.5	0.38	0.40	0.39	21.7	52.0	150.2
Medie	874.6	0.41	0.42	0.41	27.6	86.8	199.6
Stdev	31.3	0.021	0.018	0.021	4.20	20.05	28.79
A doua metodă stereometrică	834.0	0.43	0.45	0.44	26.7	89.1	194.0
	825.4	0.44	0.45	0.45	25.2	84.9	177.1
	757.5	0.49	0.48	0.49	34.5	95.6	249.1
	830.7	0.44	0.44	0.44	23.6	61.7	178.6
	776.8	0.47	0.47	0.48	32.0	109.4	231.6
	804.1	0.46	0.46	0.46	25.5	92.8	201.1
	780.4	0.47	0.47	0.48	32.7	108.9	222.3
	841.7	0.43	0.44	0.44	25.7	68.7	192.4
	808.4	0.45	0.46	0.46	28.4	104.7	200.0
	879.0	0.40	0.42	0.41	21.7	52.0	150.2
Medie	813.8	0.45	0.46	0.45	27.6	86.8	199.6
Stdev	35.9	0.024	0.019	0.024	4.20	20.05	28.79
Metoda dislocuirii de lichid	820.6	0.44	0.44	0.45	26.7	89.1	194.0
	833.2	0.43	0.44	0.44	25.2	84.9	177.1
	796.7	0.46	0.47	0.47	34.5	95.6	249.1
	805.6	0.45	0.45	0.46	23.6	61.7	178.6
	797.8	0.46	0.45	0.46	32.0	109.4	231.6
	819.7	0.44	0.46	0.45	25.5	92.8	201.1
	831.4	0.44	0.45	0.44	32.7	108.9	222.3
	862.9	0.41	0.43	0.42	25.7	68.7	192.4
	823.5	0.44	0.45	0.45	28.4	104.7	200.0
	848.4	0.42	0.40	0.43	21.7	52.0	150.2
Medie	824.0	0.44	0.44	0.45	27.6	86.8	199.6
Stdev	21.2	0.015	0.017	0.014	4.20	20.05	28.79

Cele mai mari valori ale densității s-au obținut din prima metodă stereometrică (St1), iar cele mai mici valori ale densității s-au obținut din a doua metodă stereometrică (St2) (tab. 5.1).

Tabelul 5.1 indică o mare variabilitate a densității (la EMC), care este influențată de metoda de măsurare și de brichetă (umiditate inițială, presiune de comprimare, dimensiunea particulelor). Cea mai mare diferență a densităților medii a fost înregistrată între prima și a doua metodă stereometrică, în timp ce a doua metodă stereometrică și metoda dislocuirii de lichid (Im) au prezentat valori similare din punct de vedere statistic, conform testului ANOVA cu un singur factor, pentru un nivel de încredere $p < 0.05$. Analiza de regresie a densităților a indicat o corelație slabă între valorile individuale de densitate determinate cu metoda St2 și metoda dislocuirii de lichid ($R^2 = 0.469$) și o mai bună corelație cu metoda St1 ($R^2 = 0.7$). Rabier et al. [R1] au obținut de asemenea o variabilitate ridicată a densității diferitelor tipuri de brichete, mai ales în cazul metodelor stereometrice. Ei au explicat această variabilitate prin proprietățile fizice instrinseci ale brichetelor, printre care și rugozitatea suprafeței. De asemenea, din rezultatele statistice ei au concluzionat că cele două metode stereometrice nu pot fi considerate echivalente, ceea ce corespunde cu rezultatele cercetărilor indicate aici. Ușoarele diferențe de umiditate ale brichetelor pot influența de asemenea variabilitatea densității.

Relația dintre porozitatea individuală și densitatea brichetelor la EMC este indicată în figurile 5.5, 5.6 și 5.7, iar valorile calculate, valorile medii și abaterile medii sunt incluse în tabelul 5.1. Cum era de așteptat, toate figurile indică descreșterea porozității cu creșterea densității. Aceasta este în concordanță cu rezultatele obținute pentru lemn ([U2] și [P4]).

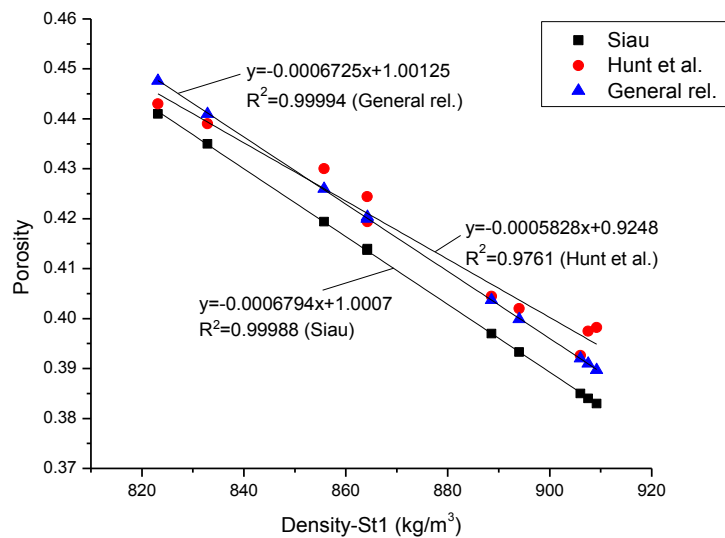


Fig. 5.5. Porozitatea brichetelor în funcție de densitatea obținută din prima metodă stereometrică (St1)

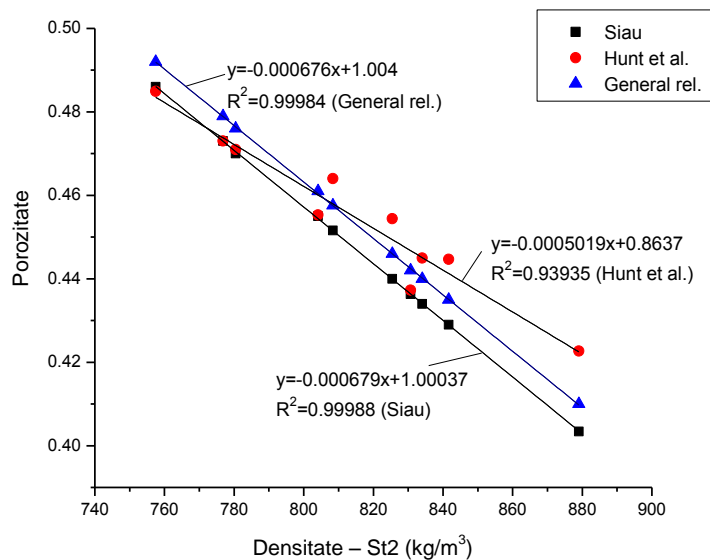


Fig. 5.6. Porozitatea brichetelor în funcție de densitatea obținută din a doua metodă stereometrică (St2)

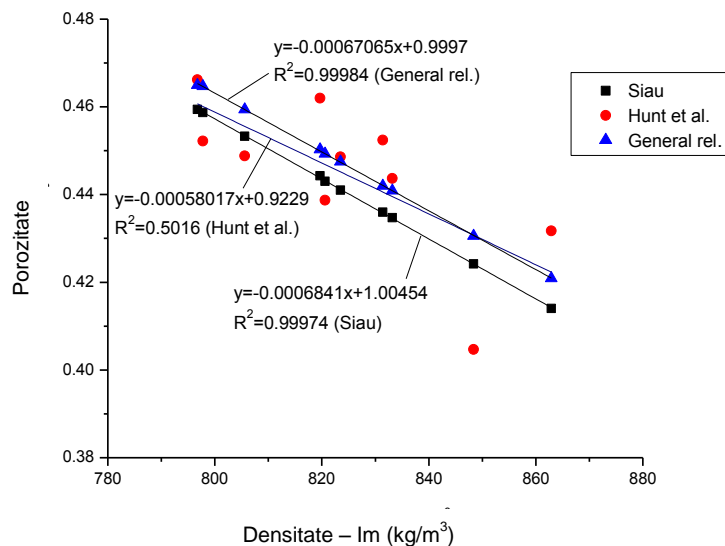


Fig. 5.7. Porozitatea brichetelor în funcție de densitatea obținută prin metoda dislocuirii de lichid (Im)

Există o corelație puternică între porozitatea determinată cu metoda Siau și metoda relației generale și densitate, indiferent de metoda de măsurare. Prin aplicarea metodei descrise de Hunt et al. pentru determinarea porozității, metoda de măsurare a densității a influențat rezultatele porozității. În timp ce porozitatea determinată cu metoda Hunt et al. a prezentat o bună corelație cu densitatea obținută prin metodele St1 și St2 (0.976, respectiv 0.939), ea s-a depreciat la 0.5016 în cazul metodei dislocuirii de lichid (fig. 5.7). Acest rezultat arată că determinarea porozității cu metoda Hunt et al. este mai puțin precisă atunci când densitatea se obține prin metoda dislocuirii de lichid. Analiza de regresie a indicat o corelație mai slabă a valorilor de porozitate calculate cu ecuația Hunt et al. decât în cazul celorlalte două relații, când densitatea s-a determinat prin imersare.

O analiză preliminară a parametrilor de rugozitate a arătat o mare variabilitate și o corelație inversă slabă cu densitatea. Aceasta poate fi ca urmare a variației densității locale a

brichetelor pe circumferință. Profilurile de rugozitate au fost trasate astfel încât două profiluri să corespundă cu generatoarea cu densitate mare a brichetei, iar celelalte două să corespundă cu generatoarea cu densitate mică a brichetei, după o evaluare vizuală. Dată fiind variația mare a densității, s-a considerat că selecția liniilor de măsurare pentru fiecare brichetă poate influența evaluarea rugozității în ansamblu. Studii anterioare cu privire la lemnul masiv șlefuit au evidențiat o relație inversă între densitate și rugozitatea suprafeței [G6]. Este de așteptat ca densitatea brichetelor să aibă o relație similară cu rugozitatea suprafeței lor. Pentru a verifica această presupunere, s-a aplicat o procedură matematică care selectează medii ale parametrilor de rugozitate din combinații a trei profiluri din datele măsurate. Astfel, deși au fost măsurate 4 profiluri, rezultând o valoare medie unică a celor patru profiluri (1, 2, 3, 4), calculele au luat în considerare mai multe medii formate din grupuri/combinații a 3 profiluri, care au fost în continuare analizate pentru cea mai bună corelație cu densitatea, și indirect, cu porozitatea. De exemplu, combinațiile au fost medii ale profilurilor: 1+2+3; 1+2+4; 2+3+4 și 1+3+4. Cu cât se fac mai multe măsurări, cu atât se obțin mai multe medii și cu atât mai bună este șansa unei aproximații mai bune a calității suprafeței.

Procedura matematică urmărește să găsească regresia liniară parametri de rugozitate-densitate, cu pantă negativă și coeficient de determinare maxim. Pentru cele zece brichete au fost obținute zece densități și patru medii diferite de parametri de rugozitate (cele patru medii menționate mai devreme) pentru fiecare brichetă, adică o matrice cu zece rânduri și patru coloane. Pentru această matrice se consideră următoarea funcție $f : \{l_1, l_2, \dots, l_{10}\} \rightarrow \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, în care $l_i, i = 1 \dots 10$ reprezintă liniile matricei, iar $c_j, j = 1 \dots 4$ sunt coloanele matricei. Numărul total de combinații posibile este $4^{10} = 1048576$, conform

următoarei teoreme: numărul total de funcții $f : D \rightarrow E$ este $N = |E|^{|D|}$, unde D și E sunt șiruri finite [58]. Algoritmul a fost implementat în limbajul de programare Python (versiunea 3.7, Python Software Foundation).

Tabelul 5.2 indică corelațiile dintre parametrii medii de rugozitate și densitatea brichetelor la EMC, precum și porozitatea brichetelor.

Tabelul 5.2. Coeficienții de determinare ai corelațiilor porozitate și densitate cu rugozitatea brichetelor

Metodă densitate	Metodă porozitate	Coeficient de determinare (R^2): porozitate-parametru de rugozitate			Coeficient de determinare (R^2): densitate-parametru de rugozitate		
		Ra	Rvk	$Rk+Rpk+Rvk$	Ra	Rvk	$Rk+Rpk+Rvk$
Prima metodă stereometrică	Siau	0.576	0.541	0.582	0.580	0.537	0.584
	Hunt et al.	0.619	0.546	0.604			
	Rel. gen.	0.579	0.539	0.585			
A doua metodă stereometrică	Siau	0.847	0.694	0.910	0.853	0.693	0.911
	Hunt et al.	0.891	0.757	0.883			
	Rel. gen.	0.850	0.695	0.911			
Metoda dislocării de lichid	Siau	0.271	0.229	0.363	0.272	0.226	0.363
	Hunt et al.	0.448	0.500	0.620			
	Rel. gen.	0.267	0.228	0.360			

Pentru a analiza corelațiile densității cu rugozitatea, precum și ale porozității cu rugozitatea, s-a utilizat Instrumentul de analiză a regresiei (Regression analysis tool). Această funcție

analizează cum, de exemplu, rugozitatea suprafeței brichetei este afectată de valorile densității sau porozității brichetei. Corelații bune indică o dependență puternică între cele două mărimi.

Valorile parametrilor de rugozitate descresc cu creșterea densității. Figura 5.8 indică un exemplu de corelație între parametrii de rugozitate și densitatea brichetelor obținută prin metoda St2.

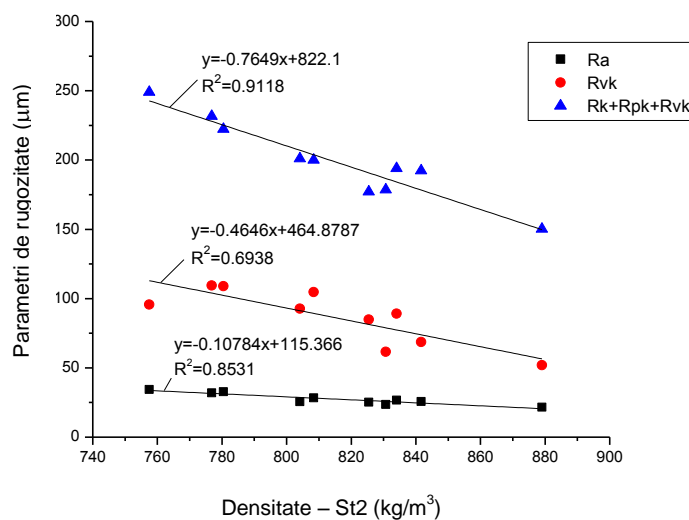


Fig. 5.8. Parametrii de rugozitate ai brichetelor în funcție de densitatea obținută din a doua metodă stereometrică (St2)

Corelațiile au fost rezonabile în cazul primei metode stereometrice de măsurare a densității, conform tabelului 5.2 și al analizei de regresie; s-au obținut însă corelații semnificativ mai bune în cazul celei de-a doua metode stereometrice de măsurare a densității. Aceasta s-a observat în special la corelația parametrului $Rk+Rpk+Rvk$ cu densitatea, unde coeficientul de determinare este 0.911. Corelațiile nu au fost semnificative din punct de vedere statistic când s-a aplicat metoda dislocuirii de lichid. Aceasta arată că alegerea metodei de măsurare a

densității are o influență importantă asupra parametrilor de rugozitate. Tabelul 5.2 indică, de asemenea, corelațiile dintre rugozitatea suprafeței și porozitatea obținută prin cele trei metode de calcul și pentru fiecare metodă de măsurare a densității. Din tabelul 5.2 și din analiza de regresie s-a observat că rugozitatea suprafeței crește cu creșterea porozității brichetei.

În cazul măsurării densității cu metoda St1, porozitatea determinată cu cele trei relații a prezentat corelații similare moderat pozitive cu rugozitatea brichetelor ($R^2 > 0.5$), semnificative statistic la un nivel de încredere $p < 0.05$.

Când densitatea a fost determinată prin metoda St2, porozitatea calculată cu cele trei metode a prezentat corelații pozitive puternice cu rugozitatea brichetelor (tabelul 5.2). Corelațiile între cele trei metode au fost aproape similare și au fost semnificative din punct de vedere statistic la un nivel de încredere $p < 0.05$. Corelații foarte bune s-au obținut la toți cei trei parametri de rugozitate, dar cea mai bună a fost pentru parametrul compus $R_k + R_{pk} + R_{vk}$. Coeficientul de determinare R^2 a fost mai mare de 0.9 pentru porozitatea determinată cu metodele Siau și relația generală și pentru parametrul de rugozitate compus $R_k + R_{pk} + R_{vk}$ (fig. 5.9). Corelația porozității cu R_a nu a diferit considerabil în funcție de metoda de calcul al porozității. Corelația porozității cu R_{vk} a fost mai slabă în comparație cu ceilalți doi parametri, dar a fost mai bună când s-a aplicat metoda Hunt et al. de calcul al porozității. Dintre cele trei relații ale porozității, doar relația Hunt et al. a determinat o corelație pozitivă slabă cu rugozitatea suprafeței, la un nivel de încredere $p < 0.05$, când densitatea s-a obținut prin imersare, în timp ce celelalte relații ale porozității nu au produs nici o corelație cu rugozitatea suprafeței (tabelul 5.2).

În concluzie, estimarea porozității brichetelor prin evaluarea calității suprafeței poate fi

obținută dacă se măsoară parametrul de rugozitate $Rk+Rpk+Rvk$, urmat foarte aproape de Ra . Corelații foarte puternice cu rugozitatea s-au obținut pentru porozitatea calculată cu cele trei relații, iar când densitatea s-a determinat prin metoda St2.

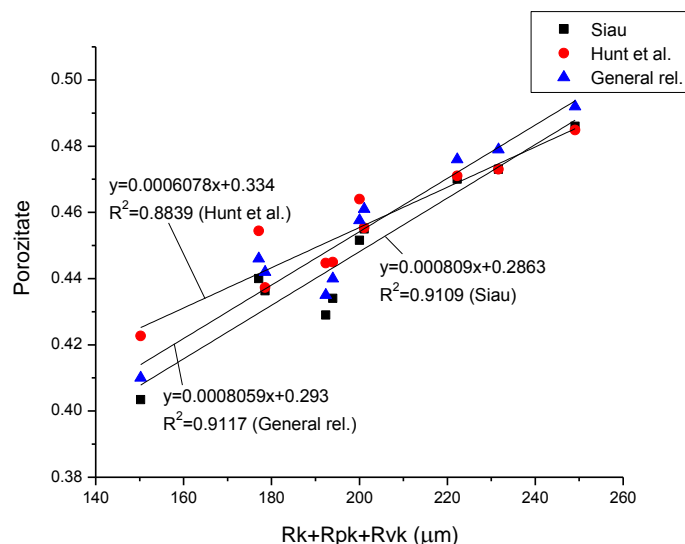


Fig.5.9. Porozitatea brichetelor (St2) în funcție de parametrul de rugozitate ($Rk+Rpk+Rvk$)

Rezultatele sunt încurajatoare întrucât ele oferă o metodă alternativă de estimare a porozității brichetelor bazată pe parametrii de rugozitate mășurați. Pentru a mări gradul de încredere (generalitate), numărul măsurărilor de rugozitate trebuie mărit, întrucât brichetele sunt formate din particule de lemn comprimate, cu structură și suprafață neuniformă. Densitatea locală pe circumferință poate fi variabilă, iar suprafața brichetelor este erodabilă, ceea ce poate modifica local topografia suprafeței. Aceste limitări trebuie luate în considerare; din acest motiv, cu cât este mai mare numărul măsurărilor de rugozitate, cu atât mai exactă devine și corelația rugozitate-porozitate. Un avantaj al metodei noi propuse este acela că este atât necostisitoare (nu necesită aparate costisitoare), cât și accesibilă.

Sunt necesare în continuare și alte cercetări pentru a verifica dacă aceste rezultate sunt

consistente și reproductibile la alte brichete din combinații de diferite specii de lemn.

Noutatea pe care o aduc cercetările întreprinse constă în extinderea aplicabilității modelelor de porozitate dezvoltate inițial pentru lemn la brichetele de lemn, iar relația de determinare a porozității umede aplicată brichetelor nu a mai fost prezentată în alte publicații.

Corelațiile prezentate au fost publicate în articolele științifice:

Șova D., Gurău L., Porojan M., Sandu V. (2015) Assessment of wood briquettes porosity by use of roughness parameters, International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millenium” (proceedings), Brașov, pp. 811-819.

Șova D., Gurău L., Porojan M., Florea O., Sandu V., Purcaru M. (2022) Indirect evaluation of the porosity of waste wood briquettes by assessing their surface quality, Waste and Biomass Valorization, vol. 13, issue 1, pp. 739–753.

Capitolul 6. Studiul proprietăților fizice, chimice, termice și mecanice ale brichetelor din amestecuri de specii lemnoase

6.1. Proprietăți ale brichetelor de lemn în cercetările actuale

Brichetele produse din biomasă lemnoasă reprezintă un combustibil ecologic și au o serie de avantaje în comparație cu lemnul. Densitatea brichetelor este mai mare decât a particulelor de lemn, și prin urmare, căldura generată de brichete pe unitatea de volum este de 3-5 ori mai mare decât cea generată în timpul arderii lemnului. Brichetele de lemn prezintă și avantaje economice întrucât sunt produse din resturi de lemn, scoarță de copac sau deșeuri de lemn provenite de la prelucrarea industrială a lemnului. De asemenea, brichetele au un conținut de umiditate constant (aproximativ 10%) [U1].

Lemnul are conținutul de cenușă sub 1%, iar puterea calorică este cuprinsă între 18 MJ/kg și 20 MJ/kg. O creștere a conținutului de cenușă cu 1% determină scăderea puterii calorice cu 0.2 MJ/kg, întrucât cenușa nu contribuie la eliberarea căldurii în timpul arderii, chiar dacă unele elemente minerale din cenușă reprezintă catalizatori pentru descompunerea termică a combustibilului. De asemenea, creșterea conținutului de cenușă conduce la scăderea conținutului de carbon, elementul chimic care determină creșterea puterii calorice a lemnului. O creștere a conținutului de carbon cu 1% determină creșterea puterii calorice cu 0.39 MJ/kg. Aceste rezultate s-au obținut la specii cu densitate mare, cum sunt fagul și carpenul [U1].

Proprietățile termice ale brichetelor lignocelulozice, precum conductivitatea termică și căldura specifică, și proprietățile chimice, precum puterea calorică, conținutul de cenușă, densitatea de energie, conținutul de volatili sau de carbon fixat trebuie luate în considerare la producerea brichetelor. Autorii lucrării [D2] au determinat puterea calorică a brichetelor din lemn de fag cu densitatea de 1200 kg/m³ și cu umiditatea de 12%–15%, obținând valoarea de

21.68 MJ/kg, în timp ce brichetele din lemn de fag cu densitatea de 720 kg/m^3 au avut puterea calorică de numai 14.84 MJ/kg. Cercetările raportate în [D4] au arătat că puterea calorică superioară a biomasei lemnoase uscate (0% umiditate) a scăzut de la 19.8 MJ/kg până la 12 MJ/kg, la un conținut de umiditate de 70%.

Lemnul de bambus este ușor de recunoscut datorită secțiunii circulare cu un lumen interior foarte mare. El are multe aplicații datorită structurii sale uniforme, iar resturile de la prelucrare pot fi utilizate cu ușurință la fabricarea brichetelor. Puterea calorică și compoziția elementală a lemnului de bambus au fost evaluate prin spectroscopie în infraroșu de Posom și Sirisomboon [P5]. Liu et al. [L3] au investigat caracteristicile combustibile ale lemnului de bambus. Umiditatea inițială și densitatea lemnului au fost 10.1%, respectiv 600 kg/m^3 . Lemnul a fost condiționat într-o cameră climatică, iar umiditatea a scăzut la valori cuprinse între 7.8% și 8.8%. Puterea calorică superioară a variat în aceste condiții între 18.2 MJ/kg și 19.2 MJ/kg. Ei au concluzionat că lemnul de bambus are caracteristici combustibile bune, care sunt influențate de conținutul de C, H, O, N și S, umiditate și conținutul de volatile.

Din cele prezentate se observă o preocupare constantă de a descoperi noi surse de biomasă lemnoasă pentru producerea brichetelor lignocelulozice. De asemenea, se fac încercări de a combina diferite tipuri de biomasă pentru a obține proprietăți îmbunătățite ale brichetelor, dar și de a reduce costurile lor.

6.2. Realizarea brichetelor de lemn de fag și bambus și determinarea proprietăților fizice, chimice, termice și mecanice

6.2.1. Realizarea brichetelor de lemn de fag și bambus

Brichetele s-au realizat din amestecuri din lemn de bambus și de fag în proporții diferite.

Lemnul de fag a provenit de la deșeurile rezultate de la prelucrarea lemnului în atelierul Facultății de design de mobilier și ingineria lemnului. Capete scurte de trunchi de bambus provenite din prelucrări anterioare au fost colectate din Sasso Marconi, provincia Bologna, Italia. Capetele de bambus au fost secționare de-a lungul fibrei cu ajutorul unui fierăstrău circular la lungimi de aproximativ 40 mm (fig. 6.1a).

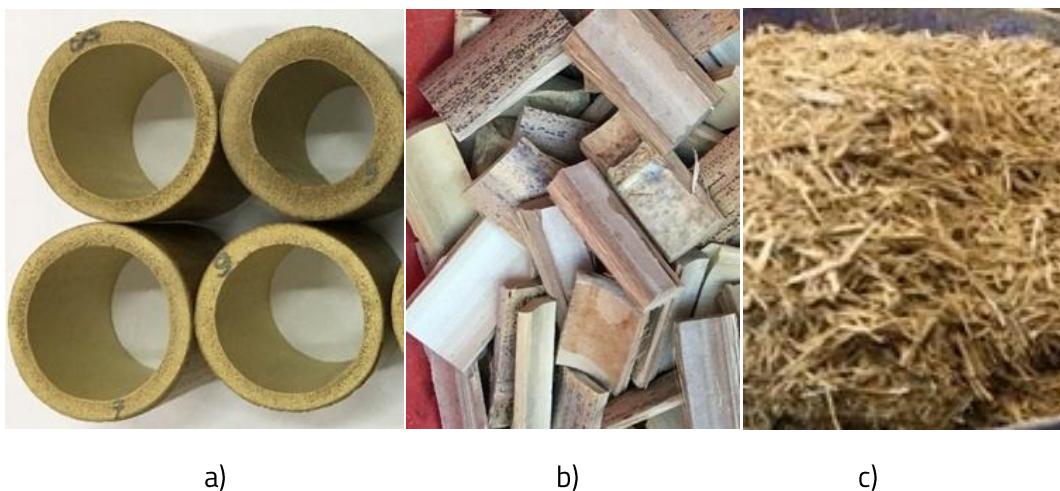


Fig. 6.1. Lemnul de bambus

a) eșantioane cu lungimea de 40 mm, b) bucăți, c) particule (așchii)

După o evaluare vizuală au fost selectate zece eșantioane de bambus cu secțiunea transversală apropiată de cea circulară. Pentru a determina densitatea bambusului, eșantioanele au fost cântărite cu ajutorul unei balanțe analitice (Kern-Ew, precizia de 0.01 g). S-au măsurat câte două diametre exterioare și două diametre interioare pe direcții perpendiculare și de asemenea două lungimi cu ajutorul unui șubler digital (precizia de 0.01 mm). Densitatea lemnului de bambus s-a calculat ca raport între masa și volumul lemnului (sub formă de cilindru gol):

$$\rho_b = \frac{m_b}{\frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)L} \quad (6.1)$$

în care: m_b (kg) reprezintă masa eșantionului, D_e și D_i (m) reprezintă diametrele medii exterioare și interioare ale eșantionului, L (m) este lungimea medie a eșantionului. Conținutul de umiditate (raportat la masa anhidră) s-a determinat la cinci eșantioane, alese arbitrar și uscate în etuvă la $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Pentru a determina densitatea lemnului de fag, s-au tăiat zece bucăți cubice de lemn cu dimensiunile $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. Înainte de a măsura dimensiunile, suprafațele au fost șlefuite pentru a obține măsurări precise.

Lemnul de bambus a fost tăiat în bucăți (aproximativ 10-12 bucăți din fiecare eșantion), (fig. 6.1b), care au fost ulterior mărunțite cu ajutorul unei mori de laborator cu ciocane în particule (granulație) de 1-3 mm (fig. 6.1c). S-au utilizat site cu dimensiunile ochiurilor de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, respectiv $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, iar fracțiile mai mari sau mai mici decât dimensiunile ochiurilor au fost înlăturate. Moara cu ciocane a fost conectată la o unitate mobilă de aspirație (Elektra Beckum SPA-1000) care a colectat particulele de lemn. Ele au fost păstrate în pungi de plastic și menținute în laborator la parametri atmosferici constanți (temperatura de 20°C și umiditatea relativă de 45%). Particulele de bambus și de fag au fost comprimate în brichete în diferite raporturi de masă (bambus-Ba și fag-Be): 100% Ba:0% Be, 75% Ba:25% Be, 50% Ba:50% Be, 25% Ba:75% Be, și 0% Ba:100% Be, simbolizate prin 100B, 75B, 50B, 25B și 0B. Particulele de lemn au fost cântarite cu ajutorul balanței analitice pentru a obține fracțiile de masă folosite la brichetare. Particulele de lemn de bambus și de fag au fost amestecate foarte bine, obținând astfel amestecuri uniforme ale celor două specii.

Pentru a obține dimensiuni similare ale particulelor, ele au fost sortate prin folosirea

acelorași site ca și în cazul bambusului. Frațiunile rămase după trecerea lor prin site, cu dimensiunile cuprinse între 1 mm și 3 mm au fost în continuare folosite pentru realizarea brichetelor într-o presă hidraulică (MB4 Goldmark). S-au obținut brichete cilindrice. Pentru fiecare raport de amestec s-au selectat câte zece brichete având forme și dimensiuni similare. Nu s-au utilizat lianți sau aditivi la producerea brichetelor, întrucât lignina are proprietăți adezive în anumite condiții de comprimare (presiunea mai mare de 5 MPa și temperatura în jur de 90-100 °C [L8]).

Pentru determinarea densității brichetelor s-au măsurat patru diametre în direcții perpendiculare și două lungimi la fiecare brichetă. S-au calculat valorile medii ale lungimii și diametrului la fiecare brichetă și apoi s-a obținut volumul, considerând forma perfect cilindrică a brichetelor. De asemenea, s-au cântărit brichetele cu ajutorul balanței analitice și s-a determinat masa lor. Densitatea s-a determinat ca raport între masă și volum.

Brichetele au fost depozitate în pungi din polietilenă în condiții atmosferice constante pentru evaluări ulterioare ale proprietăților.

6.2.2. Determinarea puterii calorice a brichetelor

Pentru început s-au determinat puterile calorice superioare și inferioare ale brichetelor cu ajutorul calorimetrului XRY-1C (Shanghai Geological, China) prin măsurarea diferenței de temperatură a unei cantități definite de apă care răcește calorimetrul. S-a determinat căldura eliberată în timpul arderii unei cantități cunoscute de combustibil solid și ulterior, puterea calorică. Pentru măsurări s-a folosit o cantitate mică din fiecare brichetă, cu masa sub 1 g (de regulă, 0.4-0.8 g), care a fost arsă în calorimetru. S-au efectuat zece măsurări pentru fiecare tip de brichetă.

6.2.3. Determinarea conținutului de cenușă al brichetelor

Pentru a determina conținutul de cenușă, s-au utilizat particule de lemn din fiecare specie. Particulele au fost sortate prin intermediul unei site cu dimensiunea ochiurilor de 1 mm × 1 mm, iar fracțiunile care au trecut prin ochiurile sitei au fost utilizate în continuare. Particulele de lemn s-au uscat timp de 30 de minute într-un cuptor de laborator (Memmert, Germania) la 103°C până la umiditatea de 0%. După care, s-au pregătit zece creuzete de calcinare realizate dintr-un aliaj nichel-crom termorezistent (până la 750°C), ceea ce înseamnă curățare, șlefuire, ardere timp de 3 minute, răcire și cântărire. Apoi s-au amplasat trei straturi de material sortat și uscat în fiecare creuzet și s-au cântărit împreună. Ele au fost arse până când au dispărut flacăra și fumul, pentru a evita efectul negativ al funinginii asupra cuptorului de calcinare (Protherm STS, Ploiești, România).

După cântărirea creuzetelor cu materialul rămas, s-a determinat conținutul de cenușă neagră (AC_b) cu ajutorul relației:

$$AC_b = \frac{(m_{cs} - m_{ec}) - (m_{cba} - m_{ec})}{m_{cs} - m_{ec}} \quad (6.2)$$

în care: m_{cs} (kg) este masa creuzetului cu materialul uscat, m_{ec} (kg) este masa creuzetului gol, m_{cba} este masa creuzetului cu cenușă neagră (kg).

Fiecare creuzet cu materialul ars a fost amplasat apoi în cuptorul de calcinare la temperatura de 750°C și menținut aproximativ 1 h, până la calcinarea completă a cenușii (ASTM E1755) [A4]. Acest lucru a fost evidențiat de culoarea gri deschis a cenușii. După răcirea în desicator până la temperatura camerei, creuzetele au fost cântărite cu ajutorul balanței analitice (precizie 0.001 g) pentru a determina conținutul de cenușă calcinată, utilizând relația:

$$AC_b = \frac{m_{cca} - m_{ec}}{m_{cs} - m_{ec}} \quad (6.3)$$

în care: m_{cca} (kg) este masa creuzetului cu cenușa calcinată.

6.2.4. Determinarea căldurii specifice și a conductivității termice ale brichetelor

Pentru a măsura căldura specifică și conductivitatea termică ale brichetelor s-au selectat câte patru brichete din fiecare tip, care au fost găurite la un capăt pentru a obține două orificii paralele cu axa brichetei, având dimensiunile de 1.3 mm (diametru) și 30 mm (lungime). Cele două proprietăți termice au fost măsurate cu aparatul KD2 Pro Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) pe baza metodei sursei liniare tranzitorii de căldură. S-a utilizat un senzor dual, ca și în cazul celorlalte măsurări ale conductivității termice, descrise mai devreme. S-au efectuat câte trei măsurări la fiecare brichetă, iar rezultatul final a fost obținut din media aritmetică a datelor măsurate pentru fiecare brichetă și pentru fiecare grup de patru brichete corespunzător unui anumit tip.

6.2.5. Determinarea rezistenței la rupere a brichetelor

Rezistența la rupere a brichetelor a fost măsurată conform normativului EN ISO 17225-1 [E1], utilizând un stand de testare format din două plăci de comprimare (model IMAL 300, Italia). Bricheta a fost amplasată între cele două plăci, după cum este indicat în figura 6.2 [S9].

Rezistența la rupere s-a calculat cu relația:

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{d \cdot l} \quad (6.4)$$

în care: F_{\max} (N) este forța maximă de rupere, d (m) este diametrul brichetei, l (m) este

lungimea brichetei.

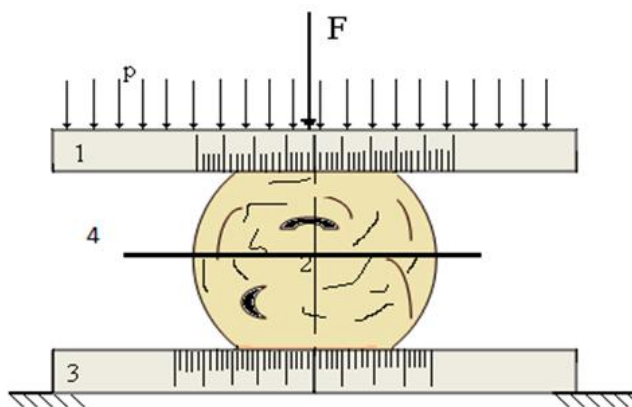


Fig. 6.2. Poziționarea brichetei între două plăci de comprimare

1. Platan superior; 2. Brichetă; 3. Platan inferior; 4. Secțiunea de rupere; p-presiune; F-forță, ([S9])

Analiza statistică a datelor experimentale a fost efectuată cu ajutorul programului Minitab 18 (Minitab Inc. State College, PA, USA). Toți parametrii statistici au fost obținuți la un nivel de încredere de 95%.

6.3. Rezultate experimentale

6.3.1. Densitatea și conținutul de umiditate ale lemnului de fag și de bambus, respectiv ale brichetelor

Densitatea lemnului de bambus a variat între 549.1 kg/m^3 și 614.4 kg/m^3 , cu o abatere standard de 19.67 kg/m^3 și o valoare medie de 574.64 kg/m^3 , după cum se poate observa în figura 6.3. Valoarea medie a densității lemnului de fag, calculată pe baza densităților a zece probe examinate a fost 710 kg/m^3 , cu o abatere standard de 5.76 kg/m^3 . S-a observat că lemnul de fag a fost mai omogen decât lemnul de bambus în ceea ce privește densitatea speciilor. Densitatea lemnului de bambus a fost mai mică decât densitatea lemnului de fag,

raportată în [L8] la valoarea de 720 kg/m^3 , la umiditatea de echilibru de 12.15%.

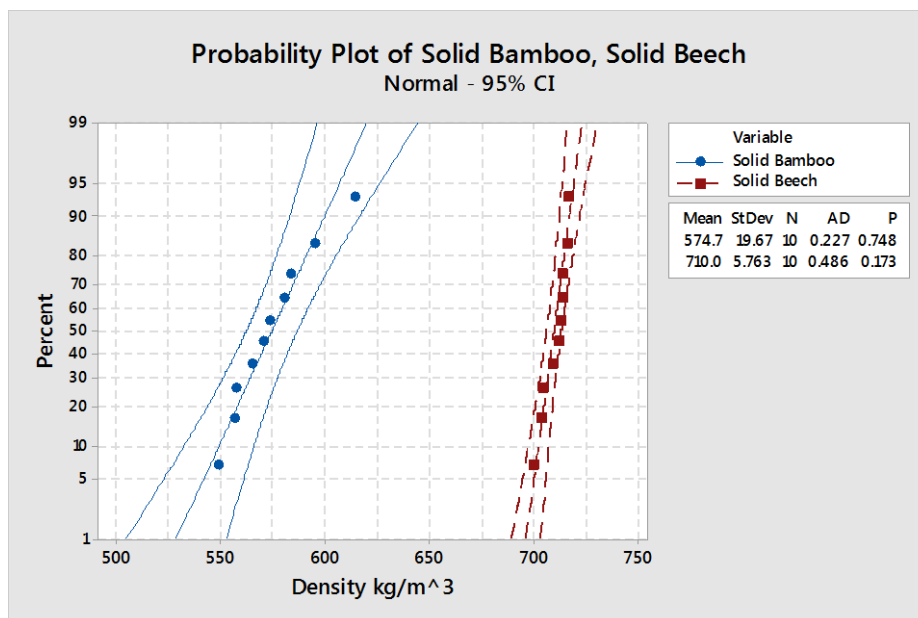


Fig. 6.3. Densitatea lemnului de bambus și de fag

Autorii lucrării [L2] au determinat densitatea lemnului de bambus cu umiditatea de 6.13% ca fiind 650 kg/m^3 . Este important să se cunoască densitatea lemnului de bambus și a lemnului de fag întrucât densitatea influențează gradul de compactare a particulelor de lemn la producerea brichetelor, el fiind unul din cei mai importanți parametri ai procesului de brichetare. Conținutul de umiditate al lemnului de bambus (raportat la masa anhidră) a variat între 6.65% și 8.01%, cu o medie de 7.1%. Valoarea medie a umidității fagului a fost de 8%.

Densitatea brichetelor cu diferite participații ale lemnului de bambus este indicată în figura 6.4. Rezultatele densității au arătat că particulele de bambus au avut o capacitate de compactare mai mare decât particulele de fag. Se poate observa că creșterea participației lemnului de bambus a condus la creșterea densității brichetelor. Valorile medii ale densității brichetelor din fag și bambus au fost cuprinse între 780.9 kg/m^3 și 813.1 kg/m^3 . Adăugarea

lemnului de fag în amestec nu a avut o influență importantă asupra creșterii densității brichetelor, dacă se compară cu brichetele din lemn de bambus.

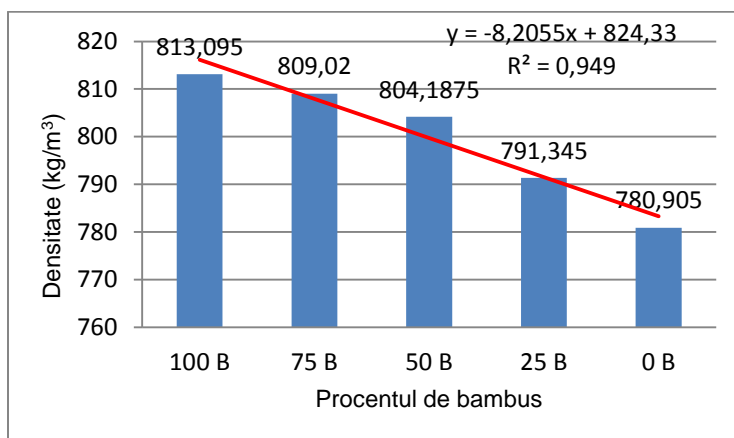
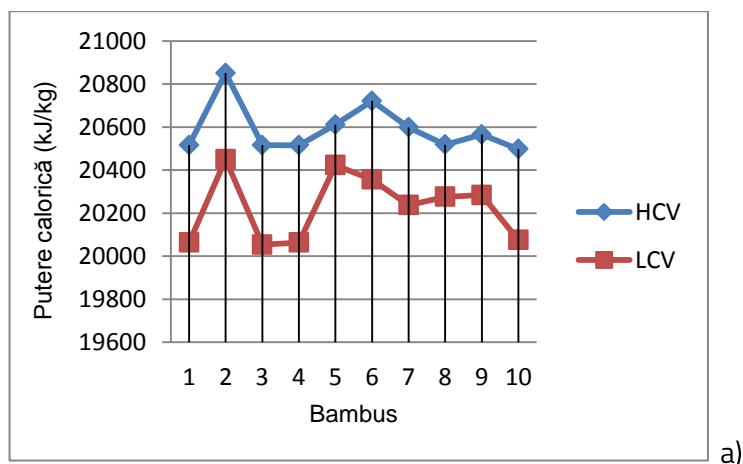


Fig. 6.4. Densitatea brichetelor cu diferite participații ale lemnului de bambus

Deși brichetele au fost produse cu aceeași instalație de brichetare și particulele au avut aceleași dimensiuni, densitățile diferite ale brichetelor de bambus și fag se datorează structurii diferite a celor două specii, în mod particular densității lor.

6.3.2. Puterea calorică a brichetelor

Valorile puterilor calorice superioare și inferioare sunt indicate în figurile 6.5a și 6.5b.



a)

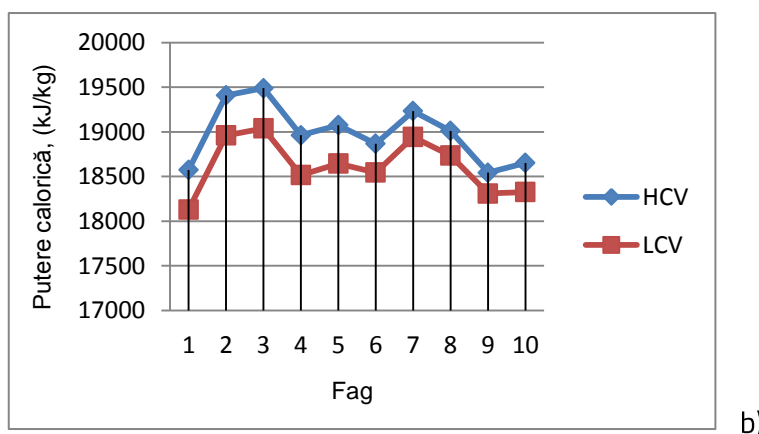


Fig 6.5. Puterea calorică superioară (HCV) și puterea calorică inferioară (LCV) ale brichetelor
a) de bambus, b) de fag

Valorile medii ale puterii calorice superioare și inferioare obținute din experimentele efectuate asupra celor zece probe de brichete de bambus au fost 20.6 MJ/kg, respectiv 20.2 MJ/kg, în timp ce puterile calorice medii ale brichetelor de fag au fost 18.9 MJ/kg, respectiv 18.6 MJ/kg.

Se poate observa că puterea calorică superioară a brichetelor de bambus este cu 8.4% mai mare decât puterea calorică superioară a brichetelor de fag, iar puterea calorică inferioară este cu 8.6% mai mare la brichetele de bambus decât la cele de fag. Aceste rezultate pot fi explicate prin compoziția chimică diferită a celor două specii, adică a cantității mai mari de carbon la lemnul de bambus decât la lemnul de fag. Analiza statistică a puterii calorice a brichetelor a arătat o varianță mult mai mare în cazul brichetelor din fag decât în cazul celor de bambus. Această diferență poate fi explicată datorită prelucrării unor loturi diferite de cherestea de fag în atelierul facultății de unde s-au prelevat apoi așchiile.

Considerând participațiile lemnului de bambus în amestec (100%, 75%, 50%, 25% și 0%), figura 6.6 indică variația puterilor calorice medii ale brichetelor. Valorile puterilor calorice ale brichetelor realizate din amestecuri de biomasă s-au situat între valorile puterilor calorice ale

brichetelor din bambus, respectiv din fag, descrescând o dată cu scăderea participației lemnului de bambus.

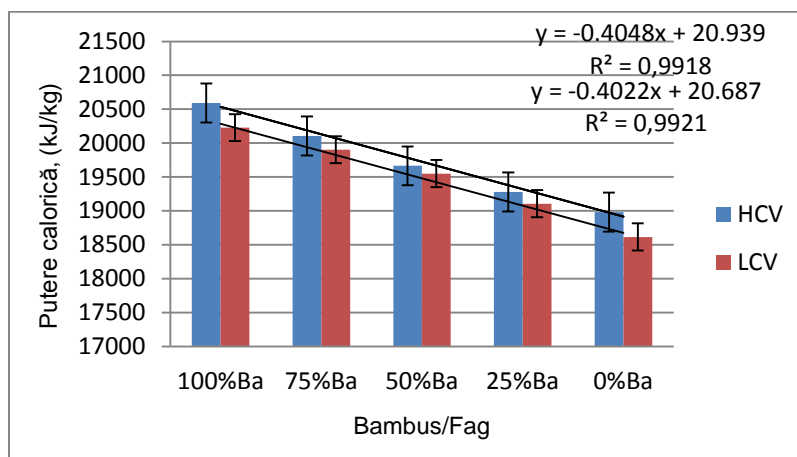


Fig 6.6. Puterea calorică superioară (HCV) și puterea calorică inferioară (LCV) ale brichetelor cu diferite participații ale lemnului de bambus

Valoarea puterii calorice a tuturor brichetelor a fost mai mare de 17.50 MJ/kg, care este impusă de normativul DIN 51731 pentru peleți pentru a fi comercializați. Studii anterioare au raportat valori ale puterii calorice a lemnului de bambus cuprinse între 18.5 și 19.2 MJ/kg, care depind de conținutul de umiditate al lemnului ([P5], [L3]). Sharma et al. au indicat în [S5] că, conținutul de lignină al lemnului de bambus este semnificativ mai mare decât în cazul altor specii, ceea ce explică valoarea ridicată a puterii calorice. Celuloza are o putere calorică mai mică (17.3 MJ/kg) decât lignina (26.7 MJ/kg) datorită unui grad mai ridicat de oxidare al ligninei. Đerčan et al., [D2] au obținut în cercetările lor o putere calorică a lemnului de fag densificat sub formă de brichete egală cu 21.68 MJ/kg, la un conținut de umiditate cuprins în limitele 12–15%.

6.3.3. Conținutul de cenușă al brichetelor

Conținutul de cenușă neagră al biomasei de bambus și de fag este prezentat în figura 6.7.

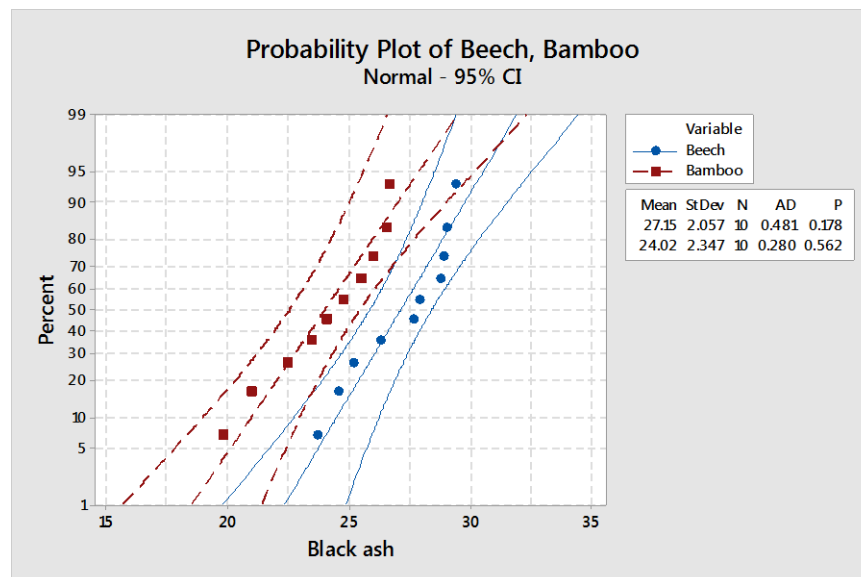


Fig 6.7. Conținutul de cenușă neagră al lemnului de fag și de bambus

Valoarea medie a fost destul de mare, și anume 27.15% la biomasa de fag și 24% la biomasa de bambus. După cum se observă, conținutul de cenușă neagră a fost cu aproape 13% mai mare la lemnul de fag decât la lemnul de bambus. Conținutul mediu de cenușă calcinată al lemnului de bambus a fost de 1.88%, față de 1.34% la lemnul de fag, deci cu aproximativ 4% mai mare, după cum se observă în figura 6.8.

Omogenitatea valorilor conținutului de cenușă calcinată la lemnul de bambus, caracterizată de abaterea standard de 0.28% a fost mai bună decât în cazul fagului, care a avut abaterea standard de 0.5%. Această omogenitate este specifică structurii lemnului de bambus.

Conținutul de cenușă calcinată depinde de maturitatea lemnului, iar valorile obținute în experimentul efectuat corespund cu valorile indicate de alți cercetători (de ex., în [P1]).

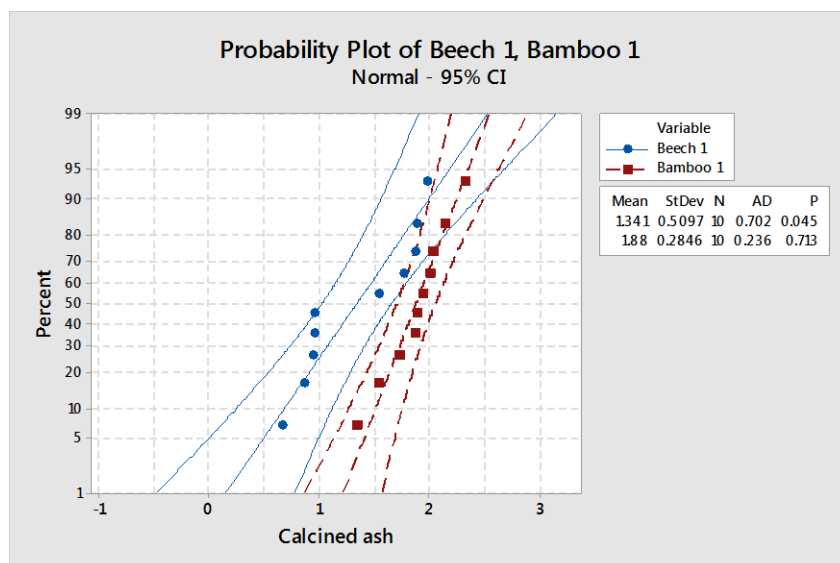


Fig 6.8. Conținutul de cenușă calcinată al lemnului de fag și de bambus

6.3.4. Căldura specifică și conductivitatea termică ale brichetelor

Căldura specifică medie a brichetelor a variat între 1.71 și 2.51 kJ/kgK. În figura 6.9 se poate observa variația căldurii specifice medii în funcție de tipul brichetei.

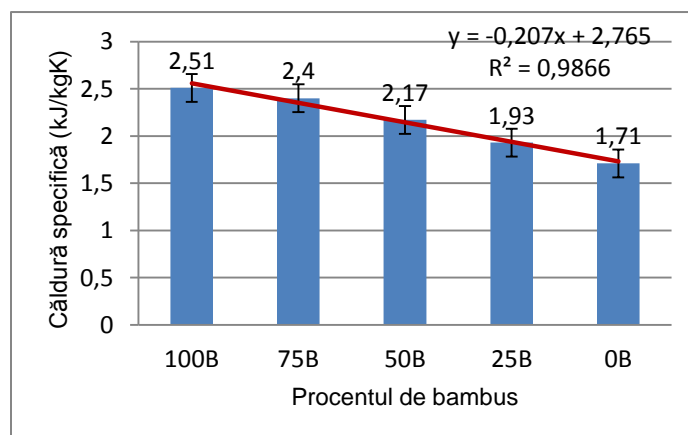


Fig 6.9. Căldura specifică în funcție de tipul brichetei

Relația grafică dintre căldură specifică și densitate este prezentată în figura 6.10. Se observă o descreștere ușoară a căldurii specifice în funcție de densitate. Un studiu anterior menționează valoarea de 2 kJ/kgK pentru căldura specifică a lemnului de fag la 20°C și

umiditatea de echilibru de 12 %, scăzând până la 1.6 kJ/kgK în condiții anhidre [S11].

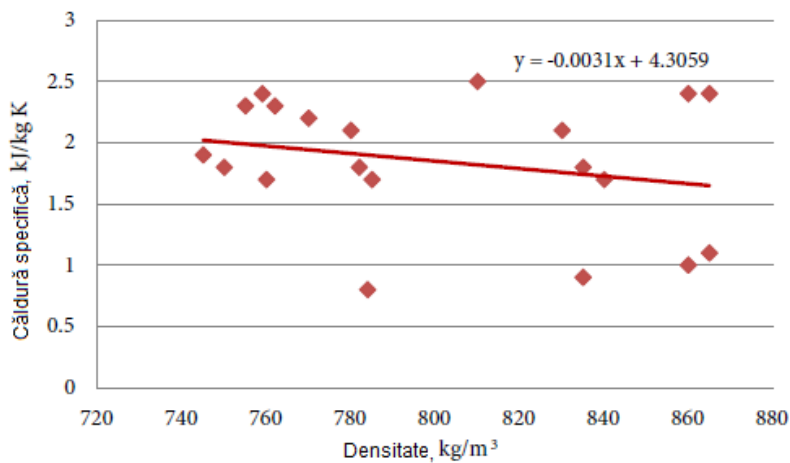


Fig 6.10. Relația dintre căldură specifică și densitatea brichetelor

Relația grafică dintre conductivitatea termică și densitatea brichetelor este indicată în figura 6.11.

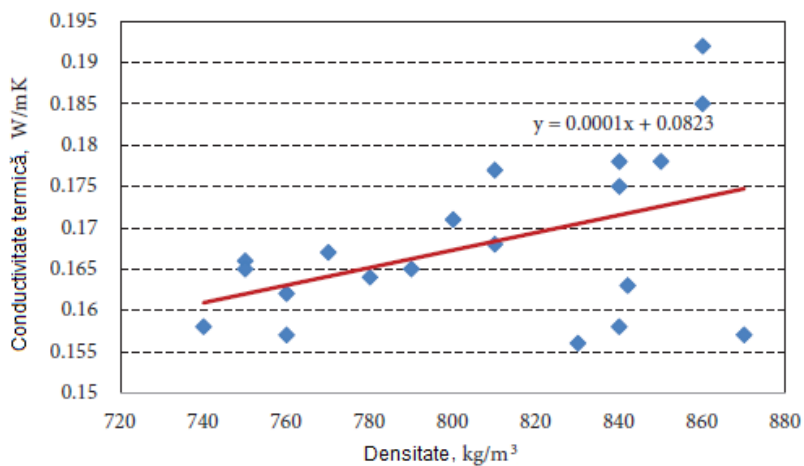


Fig 6.11. Relația dintre conductivitatea termică și densitatea brichetelor

Se observă o creștere a conductivității termice de la 0.16 W/mK până la 0.175 W/mK o dată cu creșterea densității de la 740 kg/m³ până la 870 kg/m³. Incorporarea lemnului de bambus

în brichete a condus la creșterea conductivității termice și deci la un transfer mai bun de căldură, care este util în cazul depozitării brichetelor, când datorită temperaturilor ridicate se pot autoaprinde. Guo et al. [G4] au produs brichete din amestecuri de lemn de fag și molid în proporții variabile. Conductivitatea termică a variat între 0.11 W/mK și 0.195 W/mK la umiditatea de echilibru medie de 5.95%. La lemnul de fag, conductivitatea termică a fost de 0.16 W/mK. S-a raportat o tendință de variație inversă a conductivității termice față de căldura specifică. În acest sens, o conductivitate termică ridicată indică o capacitate ridicată de transfer de căldură și o capacitate redusă de acumulare a căldurii, adică, o căldură specifică redusă a materialului.

6.3.5. Rezistența la rupere a brichetelor

Rezistența la rupere a brichetelor din bambus și fag este prezentată în figura 6.12.

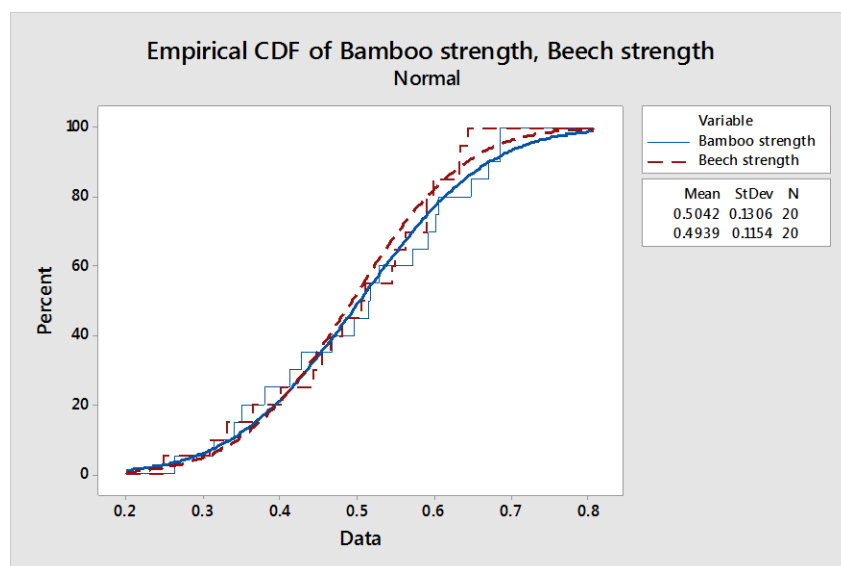


Fig 6.12. Funcția de distribuție empirică cumulativă (CDF) a rezistenței la rupere a brichetelor din bambus și fag

Se observă o ușoară creștere a rezistenței la rupere a brichetelor de bambus în comparație cu

brichetele de fag, care se explică prin densitatea mai mare a brichetelor de bambus. Diferența mică a rezistenței la rupere (2.1%) în comparație cu diferența de densitate (4%) se datorează omogenității lemnului de bambus și densității scăzute, care permit o mai bună compactare a particulelor de lemn.

Deși lemnul de fag este un combustibil uzual în România, cercetările întreprinse au arătat că adăugarea particulelor de lemn de bambus la fabricarea brichetelor a îmbunătățit proprietățile fizice, chimice, termice și mecanice analizate.

Cercetările efectuate în domeniul proprietăților brichetelor de lemn au fost raportate în lucrarea:

Lunguleasa A., Ayrilmiş N., Șova D., Spîrchez C. (2021) Selected properties of briquettes made from blends of bamboo and beech biomass, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, vol. 45, issue 4.

(B-iv) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

Capitolul 7. Evoluția academică

7.1. Educație

În perioada 1978-1982 am urmat cursurile Liceului "Dr. Ioan Meșotă" din Brașov, profilul Matematică-fizică. După încheierea studiilor liceale am susținut în anul 1982 examenul de admitere la Universitatea din Brașov, Facultatea de Industrializarea Lemnului, cursuri de zi, unde am fost admisă. Precizez că era singura facultate de acest profil din țară, iar concurența la admitere a fost foarte mare. Am absolvit facultatea în anul 1987 ca șefă de promoție, cu diplomă de merit, *cu media generală de promovare a anilor de studii: 9.92 și media examenului de diplomă:10*. După absolvirea facultății am primit o dublă repartizare, în industrie și în cercetare. Între anii 1987 și 1990 am lucrat ca inginer stagiar la Întreprinderea de Prelucrare a Lemnului din Târgu-Mureș, iar în perioada 1990-1991, ca inginer la Fabrica de mobilă din Codlea, Brașov. În aceeași perioadă 1990-1991 am fost cadru didactic asociat la Catedra de Termotehnică și Mecanica Fluidelor, susținând ore de laborator și seminar la disciplina Termotehnică. În anul 1990 am susținut examenul de concurs pentru postul de asistent universitar la Catedra de Termotehnică și Mecanica Fluidelor, pe care l-am promovat. Tot în anul 1990 am susținut examenul de admitere la doctorat și am fost admisă. Studiile doctorale le-am efectuat sub îndrumarea științifică a domnului prof. dr. ing. Nicolae Veștemeanu. Am susținut public teza de doctorat în anul 1999, devenind doctor în Tehnică, specializarea Mașini și Echipamente Termice. În tabelul 7.1. sunt centralizate informațiile cu privire la studiile efectuate.

Tabelul 7.1. Studii efectuate de autoarea tezei de abilitare

Perioada	Instituția	Diplomă/grad
1978-1982	Studii liceale (4 ani) – Liceul "Dr. Ioan Meșotă"	Diplomă de Bacalaureat
1982-1987	Studii de învățământ superior (5 ani) – Universitatea din Brașov, Facultatea de Industrializarea Lemnului	Diplomă de inginer în specializarea Industrializarea Lemnului
1990-1999	Studii doctorale – Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Mecanică	Diplomă de doctor în Tehnică, specializarea Mașini și Echipamente Termice

7.2. Activitate didactică

7.2.1. Evoluția academică

Autoarea tezei de abilitare a devenit membră a Catedrei de Termotehnică și Mecanica Fluidelor a Facultății de Mecanică din semestrul al doilea al anului universitar 1990-1991, parcurgând până în prezent treptele carierei universitare de la asistent până la conferențiar (tabelul 7.2).

Tabelul 7.2. Evoluția carierei universitare a autoarei

Perioada	Locul de muncă	Funcția
martie 1991 – februarie 1998	Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Mecanică	Asistent universitar
martie 1998 – septembrie 2001	Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Mecanică	Șef lucrări
octombrie 2001 – prezent	Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică	Conferențiar

7.2.2. Discipline predate

În cadrul Universității Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, Catedra de Termotehnică și Mecanica Fluidelor, respectiv Departamentul de Inginerie Mecanică,

autoarea tezei de abilitare a desfășurat activitățile didactice de curs, seminar, laborator și proiect aferente disciplinelor prezentate în tabelul 7.3, fiind titulară a 10 cursuri din Planurile de învățământ ale diferitelor programe de studii de licență, studii aprofundate și master din cadrul facultăților cu profil tehnic.

Tabelul 7.3. Discipline predate de autoarea tezei

Perioada	Activități didactice coordonate/discipline/program de studii
1991-1998	Laborator și seminar de Termotehnică, licență, zi și seară, anul II și anul III, Facultatea de Ingineria Lemnului, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor, Facultatea de Inginerie Mecanică
1998-2013	Curs și laborator de Termotehnică, licență, IF și IFR, anul II, Facultatea de Ingineria Lemnului
2000-2003	Curs și laborator de Termotehnică, anul II, Colegiul Tehnic
2003-2004	Curs de Procese cu transfer de căldură și masă, licență, anul IV, Facultatea de Alimentație și Turism
2004-2006	Curs și laborator de Termotehnică, licență, anul II, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor
2004-2006	Cursuri de Arderea combustibililor și Uscarea materialelor, anul II, Energie și protecția mediului (Studii aprofundate), Facultatea de Inginerie Mecanică
2003-2007	Curs și laborator de Heat Engineering, licență, anul II, Facultatea de Ingineria Lemnului (IPL limba engleză)
2005-2020	Curs și laborator la Sisteme termoizolante, master, anul II, Facultatea de Ingineria Lemnului (Structuri avansate din lemn și tehnologii inovative)
2015-2022	Curs, laborator și proiect la Termodinamică aplicată (limba română și engleză), licență și IFR, anul III, Facultatea de Inginerie Mecanică
2019-2020	Curs și seminar de Aparate termice, licență, anul IV, Facultatea de Inginerie Mecanică
2010-în prezent	Curs și laborator de Termotehnică și echipamente termice, licență, anul II, Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial
2020-în prezent	Curs și laborator de Termotehnică și mașini termice (limba engleză), licență, anul III, Facultatea de Inginerie Mecanică (AR engleză)

7.2.3. Calitatea actului didactic

Calitatea actului didactic s-a concretizat în implicarea activă în adaptarea activităților didactice desfășurate la disciplinele predate la cerințele actuale și la modelele naționale și internaționale. În procesul de predare, autoarea folosește metodele clasice și tehnicile moderne pentru a facilita înțelegerea noțiunilor predate studenților.

Publicațiile didactice care susțin activitățile de predare sunt cursurile publicate în calitate de prim autor, "*Termotehnică*", volumul I (2000), "*Heat engineering*" (2006), "*Termodinamică aplicată*" (2015), la Editura Universității Transilvania din Brașov, respectiv "*Panouri termoizolante pe bază de lemn. Caracteristici de transfer termic, testare și certificare*" (2014) la Editura Lux Libris, iar în calitate de coautor, "*Termotehnică*", volumul II (2001) și "*Sisteme mecanice de conversie a energiei*" la Editura Universității Transilvania din Brașov (2017). De asemenea, este autor al suportului de curs în format electronic disponibil pe platforma universității "*Termotehnică-suport de curs pentru ID-IFR*" (2012). Este coautor la culegerea de probleme "*Termotehnică, mașini și instalații termice. Baze teoretice, probleme*" (1998), Editura Universității Transilvania din Brașov și la îndrumările de laborator "*Lucrări practice de termotehnică, mașini și instalații termice*" (2004), "*Engineering thermodynamics: practical applications*" (2009), "*Termodinamică: aplicații practice*" (2010) apărute la Editura Universității Transilvania din Brașov.

De asemenea, a proiectat și realizat următoarele standuri de laborator, contribuind la dezvoltarea bazei materiale a departamentului:

- tunel de uscare echipat cu instrumente de măsurare a temperaturii, a umidității relative și a vitezei aerului
- dispozitiv suport pentru cântărirea și deplasarea în plan vertical a unei probe de lemn

în tunelul de uscare

De asemenea, în perioada 2004-2013, a susținut cursuri postuniversitare în domeniile gestiunii energiei, respectiv întocmirii și analizei bilanțurilor termoenergetice la Universitatea Transilvania din Brașov, acreditate de către Agenția Română de Conservare a Energiei (ARCE), și anume: Noțiuni fundamentale de termodinamică, Arderea combustibililor și instalații de ardere, Instalații de vaporizare și de uscare, Autoproducerea energiei într-un contur industrial (analize de caz), Utilizarea resurselor energetice secundare industriale (analize de caz).

A aplicat și a beneficiat de numeroase mobilități Erasmus de predare și formare, atât la universități din Uniunea Europeană, cât și din țările partenere, dintre care amintesc mobilitățile de predare la: Katholieke Universiteit Leuven, Belgia (2003), Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Germania (2013), Mytischki Branch of "Bauman Moscow State Technical University", Rusia (2017), Western University of Ontario, Canada (2019).

7.2.4. Îndrumarea științifică a studenților

Autoarea tezei de abilitare s-a implicat în îndrumarea a 5 studenți la proiecte de diplomă și 4 studenți la proiecte de disertație. De asemenea, a coordonat lucrări științifice pe care studenții le-au prezentat la sesiunile de comunicări științifice studențești organizate de Departamentul de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania (AFCO) și la nivel național (CADET INOVA, Sibiu).

A fost implicată în trei comisii de îndrumare a doctoranzilor, două în domeniul ingineriei mecanice și una în domeniul ingineriei forestiere. De asemenea, a făcut parte dintr-o comisie de susținere a doctoratului în domeniul ingineriei mecanice.

7.2.5. Managementul didactic

Autoarea tezei de abilitare a avut o serie de responsabilități în managementul didactic al departamentului în care activează, fiind implicată în diferite activități (tabelul 7.4).

Tabelul 7.4. Responsabilități privind managementul didactic

Perioadă	Activități
2001-2004	Secretar științific al Catedrei de Termotehnică și Mecanica Fluidelor
2010-2021	Coordonator al programului Erasmus al Facultății de Inginerie Mecanică (au beneficiat în această perioadă 22 de studenți de mobilități de studiu și 15 studenți de mobilități de practică)
2012-2018	Coordonator al programului de master Simulare și testare în inginerie mecanică și tutore
2015-2020	Membru în comisia de licență
2018	Membru în comisia de doctorat
2020-2023	Membru în comisia de disertație

7.3. Activitatea științifică

7.3.1. Proiecte de cercetare

În perioada postdoctorală, autoarea tezei de abilitare a fost implicată în 10 proiecte de cercetare, dintre care în unul în calitate de director (tabelul 7.5). Experiența și deprinderile practice de organizare a producției și de implementare a unor tehnologii noi, dobândite în perioada de activitate în industrie ca inginer tehnolog, au fost utile în cariera ulterioară și m-au pregătit pentru activitatea de cercetare pe care am desfășurat-o.

Tabelul 7.5. Implicarea autoarei tezei în cercetare științifică după obținerea titlului de doctor

Director de proiect după susținerea tezei de doctorat	
1.	Proiect de cercetare CNCSIS tip PN II –ID –PCE –2008, nr. contract: 851/2009, <i>Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la optimizarea procesului de uscare a materialelor capilar-poroase</i> Perioada: 2009-2010, Valoarea: 215978.36 lei
Membru în echipa proiectelor după susținerea tezei de doctorat	
2.	Nr. contract terți: 1/2002, <i>Analiza pierderilor de căldură la cuptoarele de topit aluminiu existente în secția Turnătorie a S.C. ELECTROPRECIZIA S.A. Săcele în vederea eficientizării energetice.</i> Electroprecizia Săcele. Valoarea: 15.000.000 lei.
3.	Nr. contract: 27/2001 Convenție de colaborare <i>Determinarea conductivității termice a unor epruvete din materiale compozite</i> , parte din programul RELANSIN etapa 2001. Valoarea: 6.000.000 lei.
4.	Nr. contract: 27/2001 Convenție de colaborare <i>Determinarea conductivității termice a unor epruvete din materiale compozite</i> , parte din subprogramul MatNanTech etapa 2003. Valoarea 9.000.000 lei.
5.	Convenție de colaborare <i>Determinarea conductivității termice a unor epruvete din materiale compozite</i> , parte din programul RELANSIN etapa 2003. Valoarea 3.000.000 lei.
6.	Nr. contract terți (Romradiatoare S.A.): 1/2005 <i>Studiu privind obținerea raportului tehnico-economic în echiparea încăperilor cu aparate încălzitoare cu randament maxim rezultat din diagrama căldură / costuri, asigurându-se și documentația aferentă unor instalații.</i> Valoarea: 5.000.000 lei.
7.	Nr. contract: A-CNCSIS-nr.397/A1/GR106/19.05.2006 <i>Fenomene nanotehnologice la compozitele anizotrope realizate din lamele din lemn de diferite specii, destinate utilizărilor industriale (transporturi, construcții, industria lemnului etc.)</i> Perioada: 2006-2008, Finanțator: CNCSIS. Valoarea: 1.040.000 lei
8.	Nr. contract: RO/2005/95177/EX <i>Perfecționarea conform cererii companiilor în managementul energiei în domeniile termic, hidraulic și transport</i> Perioada: 2005-2006, Finanțator: Comisia Europeană Valoarea atribuită: 4416.25 Euro
9.	Nr. contract terți: 7517/2010 (SC GEOASSET SRL București) <i>Monitorizarea variației puterii calorice a gazului metan.</i> Valoarea atribuită: 8200 lei
10.	Nr. contract terți: 3052/2019 (Kronospan Trading SRL) <i>Analiza comparativă a două tipuri de adezivi cu metode optice moderne.</i> Valoarea atribuită: 5897.64 lei.

7.3.2. Domenii de expertiză

Activitățile de cercetare desfășurate de autoarea tezei de abilitare se înscriu în următoarele domenii principale de expertiză, care sunt corelate cu proiectele de cercetare (tab. 7.5):

- Analiza termodinamică a uscării materialelor capilar-poroase (poziția 1)
- Optimizarea uscării materialelor capilar-poroase (poziția 1)
- Analiza termică a echipamentelor termice (pozițiile 2 și 6)
- Evaluarea proprietăților termice ale materialelor compozite (pozițiile 3, 4, 5, 7 și 10)
- Management energetic (pozițiile 8 și 9)

Ca urmare a proiectului de cercetare în care autoarea tezei de abilitare a fost director de proiect s-a dezvoltat tunelul experimental de uscare din laboratorul de transfer de căldură al departamentului și s-au achiziționat echipamente de măsurare a vitezei și temperaturii aerului în strat limită. De asemenea, autoarea a conceput o lucrare de laborator bazată pe determinarea fluxurilor de căldură și de masă în procesul de uscare al materialelor capilar-poroase, care a fost inclusă în unul din îndrumările de laborator.

În afara domeniilor principale de expertiză, s-au conturat o serie de domenii secundare de expertiză, care au generat contribuții importante și lucrări de cercetare publicate, și care pot fi punctul de plecare al unor viitoare teze de doctorat:

- studiul materialelor termoizolante, cu publicațiile

Șova D., Sandu V. *The use of wood and paper wastes for heat-insulating construction panels*, Conferința Internațională "Wood Science and Engineering in the Third Millenium", Brașov, 20-22 .06. 2007, ISSN 1843 -2689, pp.363-370

Șova D., Sandu V. *The study of the thermal conductivity of phonoabsorbent automotive materials*, International Conference on Materials Science and Engineering, BRAMAT, Brașov,

24-26.02 2005, ISBN 973-635-454-7(CD)

- studiul arderii și al combustibililor, cu publicațiile

Sandu V., Șova D., Ivănoiu M., Manea L. *Chemical analysis of retail automotive gasolines on Romanian market*, Revista de Chimie, București, vol. 67, nr.12, 2016

Sandu V., Șova D. *Renewable fuels concern - Distillation curve characteristics of diesel fuel – rapeseed dimethyl ester mixtures*, The International Conference „Advanced Composite Materials Engineering, COMAT 2006”, 19 – 22.10.2006, Brașov, ISBN 973- 635-821-8.

7.4. Recunoaștere și vizibilitate

Autoarea tezei de abilitare este membră titulară a Societății Române a Termotehnicienilor (SRT) din anul 1992 și a Societății Române de Mecanică Teoretică și Aplicată (SRMTA) din anul 2015.

De asemenea, a fost membră în comitetul științific al Conferinței Naționale de Termotehnică, Conferințelor Internaționale COMAT (International Conference on Advanced Composite Materials Engineering), COMEC (International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering) și ICWSE (International Conference of Wood Science and Engineering).

Este peer-reviewer la revistele ProLigno, Biomass and Bioenergy, Materials, Energies, Applied Sciences, Forests etc.

Capitolul 8. Planul de dezvoltare a carierei didactice

Tradiția și experiența colectivului de specialiști în domeniul Termotehnicii din care fac parte mi-au oferit șansa dezvoltării profesionale și a depășirii provocărilor rezultate din continua evoluție a mediului academic. Îmbinarea teoriei cu practica desfășurată în laboratoarele de Termotehnică a permis înțelegerea aprofundată a noțiunilor predate. Activitățile efectuate în proiecte de cercetare au dus la lărgirea sferei de preocupări și la dezvoltarea bazei materiale existente cu noi echipamente, precum și la formarea de echipe de cercetare interdisciplinare, cu beneficii de toate părțile.

8.1. Direcții de dezvoltare a carierei didactice

În ceea ce privește activitatea instituțională, mă voi implica în continuare în viața academică și administrativă a departamentului, a facultății și a universității din care fac parte. Îmi voi aduce contribuția la elaborarea și implementarea politicilor și strategiilor de dezvoltare, precum și la promovarea imaginii instituției de învățământ superior din care fac parte.

Intenționez să îmi dezvolt cariera profesională prin participarea în continuare la competițiile de mobilități Erasmus+, în special mobilități de predare și să pun bazele unor noi colaborări de tip Erasmus+ cu alte universități din țările partenere. Astfel voi crește vizibilitatea internațională personală, dar și a universității pe care o reprezint.

Îmi propun să implic studenți de la toate ciclurile de studii în colectivele de cercetare din care fac parte prin îndrumarea lor în cadrul proiectelor de diplomă și disertație, dar și prin prezentarea rezultatelor cercetării lor la sesiuni științifice sau conferințe.

Un alt aspect al dezvoltării carierei mele didactice îl constituie actualizarea continuă și modernizarea suporturilor de curs și ale lucrărilor de laborator sau proiectelor în concordanță

cu bibliografia recentă, tehnologia actuală și cu dezvoltarea platformei de predare-învățare. Astfel, autoarea tezei de abilitare are în vedere actualizarea cursurilor pe care le predă în prezent și publicarea unui curs nou de termotehnică, cu aplicații și exemple practice.

8.2. Direcții de dezvoltare științifică

Doresc în continuare să dezvolt direcțiile de cercetare în care m-am implicat în ultimii ani, și anume, analiza proprietăților termice ale diferitelor combinații de biomasă sub formă de brichete, respectiv aplicarea metodei de evaluare a porozității lemnului prin măsurarea rugozității suprafeței lui. În prezent sunt într-un colectiv de cercetare care investighează o serie de proprietăți ale brichetelor realizate din diferite amestecuri de particule de fag și cânepă. De asemenea, ca urmare a rezultatelor obținute din aplicarea metodei de determinare a porozității brichetelor prin parametri de rugozitate, aș dori să extind această metodă la diferite specii de lemn și pentru diferite direcții ale lemnului (radială, tangențială și longitudinală). O altă observație din cercetări anterioare asupra brichetelor la diferite conținuturi de umiditate a fost creșterea însemnată a conductivității termice pe direcție perpendiculară față de axa brichetelor, ceea ce a condus la ideea de a măsura căldura de umflare pe care o transferă lemnul o dată cu creșterea umidității. Acest lucru conduce la un transfer mai mare de căldură sesizat de aparatul de măsurare a conductivității termice și la rezultate reale mai mari decât cele așteptate.

Aș dori pe viitor să colaborez cu noi echipe de cercetare interdisciplinară și să valorific competențele pe care le-am dobândit de-a lungul anilor în domeniul termic și al transferului de căldură. Astfel, mă voi putea implica în atragerea de fonduri prin participarea la proiecte de cercetare, în calitate de membru sau chiar de director de proiect, ale Facultății de Inginerie

Mecanică din cadrul Universității Transilvania din Brașov. Atragerea unor fonduri din surse de finanțare a cercetării ar permite dezvoltarea bazei materiale de cercetare cu echipamente performante și participarea colectivelor de cercetare la conferințe internaționale de profil.

De asemenea, doresc să îmi dezvolt competențele informatice pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale complexe de transfer de căldură și masă care descriu diferite procese sau fenomene, putând astfel să ofer o bază teoretică rezultatelor experimentale prin metode numerice.

Pe termen scurt și mediu, prioritatea mea ar fi de a realiza lucrări științifice valoroase care să fie publicate în reviste ISI cu factor de impact mai mare de 2 și scor relativ de influență mai mare de 1.

În secțiunea *(B-iv) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei* am prezentat evoluția mea profesională și științifică, realizările didactice și științifice, care au condus la definirea și consolidarea profilului meu profesional și ale vizibilității mele la nivel național și internațional. Realizările științifice și planurile de dezvoltare ale carierei profesionale sunt susținute de maturitatea profilului didactic și științific al autoarei tezei de abilitare în domeniul Ingineriei Mecanice.

Cadrul de desfășurare a activităților didactice și științifice, dotările existente în Departamentul de Inginerie Mecanică și în cadrul Universității Transilvania din Brașov, în general, colaborarea cu cadre didactice din departament și din universitate, permit dezvoltarea continuă a carierei didactice și științifice a autoarei tezei de abilitare, contribuind la obținerea unor performanțe deosebite pe cele două planuri profesionale.

Bibliografie

A

[1] Anderson J.-O. (2012) Improving energy use in sawmills: from drying kilns to national impact, Licentiate thesis, Luleå University of Technology, Sweden.

[2] Anderson M.J., Whitcomb P.J. (2005) RSM Simplified. Optimizing processes using response surface methods for designing of experiments, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.

[3] Anjalidevi S.P., Kandasamy. P. (1999) Effects of chemical reaction, heat and mass transfer on laminar flow along a semi infinite horizontal plate. Heat and Mass Transfer, vol. 35, issue 6, pp. 465-467.

[4] ASTM E1755 - 01 (2020) Standard test method for ash in biomass.

B

[1] Bedeleian B., Şova D. (2013) Revealing the relation between independent variables and drying time implemented in Torksim by means of artificial neural networks: a preliminary study, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.721-728.

[2] Bergman R. (2010) Drying and control of moisture content and dimensional changes. In: R.J. Ross (editor) Wood handbook - Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, pp. 13.1-13.20.

C

[1] Cengel Y.A. (2007) Heat and mass transfer: A practical approach, Mc Graw-Hill.

[2] Chaney J. (2010) Combustion characteristics of biomass briquettes, University of

Nottingham, PhD thesis.

D

[1] De Groot S.R., Mazur P. (1984) Non-equilibrium thermodynamics, Dover Publications, New York.

[2] Đerčan B.,*Lukić T., Bubalo-Živković M., Đurđev B., Stojsavljević R., Pantelić M. (2012) Possibility of efficient utilization of wood waste as a renewable energy resource in Serbia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 1516-1527.

[3] Diamante L.M., Yamaguchi Y. (2012) Response surface methodology for optimisation of hot air drying of blackcurrant concentrate infused apple cubes, International Food Research Journal, vol. 19, issue 1, pp. 353-362.

[4] Dodić S.N.,*Zelenović Vasiljević T., Marić R.M., Radukin Kosanović A.J., Dodić J.M., Popov S. D. (2012) Possibilities of application of waste wood biomass as an energy source in Vojvodina, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 2355-2360.

[5] Dunlap F. (1914) Density of wood substance and porosity of wood, Journal of Agricultural Research, vol. 2, issue 6, pp. 423-428.

E

[1] EN ISO 17225-1 (2014) Solid biofuels – fuel specifications and classes - Part 1: General requirements.

F

[1] Fasina O.O., Sokhansanj S. (1995) Bulk thermal properties of alfalfa pellets, Canadian

Agricultural Engineering, vol. 37, issue 2, pp. 91-95.

G

[1] Gu H., Zink-Sharp A. (2005) Geometric model for softwood transverse thermal conductivity. Part I, Wood Fiber Science, vol. 37, issue 4, pp. 699-711.

[2] Gu H., Hunt G. (2006) Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part II. Macrostructural effects, Wood Fiber Science, vol. 38, issue 4, pp. 599-608.

[3] Gu H., Hunt G. (2007) Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part III. Effect of moisture content on thermal conductivity, Wood Fiber Science, vol. 39, issue 1, pp. 159-166.

[4] Guo W., Lim C.J., Bi X., Sokhansanj S., Melin S. (2012) Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets, Fuel, vol. 103, pp. 347–355.

[5] Guo W. (2013) Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

[6] Gurau L. (2004) The roughness of sanded wood surfaces, Doctoral thesis, Forest Products Research Centre, Buckinghamshire Chilterns University College, Brunel University.

H

[1] Huang P., Chang W.S., Ansell M.P., John C.Y.M., Shea A. (2017) Porosity estimation of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) by computed tomography and backscattered electron imaging, Wood Science and Technology, vol. 51, pp. 11-27.

[2] Hunt G., Gu H. (2006) Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part I. Effective thermal conductivity, Wood Fiber Science, vol. 38, issue 4, pp. 592-598.

[3] Hunt G., Gu H., Lebow P.K. (2008) Theoretical thermal conductivity equation for uniform density wood cells, *Wood and Fiber Science*, vol. 40, issue 2, pp. 167-180.

I

[1] Ikelle I.I., Ivoms O.S.P. (2014) Determination of the heating ability of coal and corn cob briquettes, *IOSR Journal of Applied Chemistry*, vol. 7, issue 2, pp. 77-82.

[2] Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. (2007) *Fundamentals of heat and mass transfer*, (sixth ed.), John Wiley & Sons, New York.

[3] ISO/TS 16610-31 (2010), Geometrical product specification (GPS) – Filtration. Part 31: Robust profile filters. Gaussian regression filters.

[4] ISO 4287 (1997) + Amd1 (2009) Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms. Definitions and surface texture parameters.

[5] ISO 13565-2 (1996) + Cor 1 (1998) Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture. Profile method. Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve.

K

[1] Karunanithy C., Wang Y., Muthukumarappan K., Pugalendhi S. (2012) Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks, *Biotechnology Research International*, pp. 1-12.

[2] Krischer O. (1963) *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trockentechnik*. Springer Verlag, Berlin.

[3] Kumar D., Prasad S., Murthy G.S. (2014) Optimization of micro-wave-assisted hot air

drying conditions of okra using response surface methodology, *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, issue 2, pp. 221-232.

L

[1] Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark (2001), *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, pp. 351–360.

[2] Liu Z., Fei B., Jiang Z., Cai Z., Liu X. (2014) Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China, *Wood Science and Technology*, vol. 48, pp. 903-917.

[3] Liu Z., Hu W., Jiang Z., Mi B., Fei B. (2016) Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis, *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 346-352.

[4] Luikov A. V., Mikhailov Y.A. (1965) *Theory of energy and mass transfer*, Pergamon Press, London.

[5] Luikov A.V. (1966) *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Pergamon, Oxford.

[6] Luikov A. V. (1966) Application of irreversible thermodynamics methods to investigation of heat and mass transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 9, issue 2, pp. 139-152.

[7] Luikov A.V. (1975) Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review), *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1-14.

[8] Lunguleasa A., Ciobanu V., Costiuc L. (2008) *Ecological combustion of wooden biomass*, Editura Universităţii Transilvania din Braşov.

[9] Lunguleasa A., Ayrılmış N., Şova D., Spîrchez C. (2021) Selected properties of briquettes made from blends of bamboo and beech biomass, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 45, issue 4, pp. 389-401.

M

[1] Miletić T., Ibrić S., Đurić, Z. (2014) Combined application of experimental design and artificial neural networks in modeling and characterization of spray drying drug: cyclodextrin complexes, *Drying Technology*, vol. 32, issue 2, pp. 167-179.

[2] Moura M.J., Ferreira P.J., Figueiredo M.M. (2002) The use of mercury intrusion porosimetry to the characterization of eucalyptus wood, pulp and paper, *Iberoamerican congress on pulp and paper research*.

N

[1] Nekkanti V., Muniyappan T., Karatgi P., Hari M.S., Marella S., Pillai R. (2009) Spray-drying process optimization for manufacture of drug-cyclodextrin complex powder using design of experiments, *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 35, issue 10, pp. 1219-1229.

[2] Nesterenko A.V. (1954) Transferul de căldură și de masă în timpul evaporării lichidului de pe o suprafață liberă (în limba rusă), *Journal of Technical Physics*, vol. 24, issue 4.

[3] NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. (Last updated: 10/30/2013).

O

[1] Obernberger I., Thek G. (2004) Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior, *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, issue 6, pp. 653-669.

[2] Oliveira L.S., Haghghi K. (1998) Conjugate heat and mass transfer in convective drying

of multiparticle systems. Part I: Theoretical considerations, *Drying technology*, vol. 16, issue 3, pp. 433-461.

[3] Onsager L. (1931) Reciprocal relations in irreversible processes I, *Phys. Rev.*, vol. 37, pp. 405-426.

[4] Orlande H.R.B., Dantas L.B., Saker L.F. (2005) Estimation in coupled heat and mass transfer problems, In: *Ecole d'hiver du METTI: Thermal measurements and inverse techniques*. Aussois (France), lectures C4B, vol.1, 36 p.

P

[1] Passialis C., Voulgaridis E., Adamopoulos S., Matsouka M. (2008) Extractives, acidity, buffering capacity, ash and inorganic elements of black locust wood and bark of different clones and origin, *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 66, pp. 395-400.

[2] Perré P., Keey R. (2006) Drying of wood: principles and practice. In: Mujumdar A.J. (editor): *Handbook of Industrial Drying*, Dekker, New York, pp. 821 – 877.

[3] Perré P., Olek W. (2007) From fundamentals to practice: the interaction chain. In: P. P. Perré (editor): *Fundamentals of Wood Drying*, A.R.BO.LOR., Nancy, pp. 1-20.

[4] Plötze M., Niemz P. (2011) Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry, *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, issue 4, pp. 649-657.

[5] Posom J., Sirisomboon P. (2017) Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy, *Energy*, vol. 121, pp.147-158.

[6] Postelnicu A., Şova D. (2010) Assessment of the particularities of heat and mass transfer processes at the surface of capillary-porous materials, 11th International IUFRO

Wood Drying Conference "Recent Advances in Wood Drying", 18-22 January 2010, Skellefteå.

[7] Prigogine I. (1947) Etude thermodynamique des phenomenes irreversibles, Desoer, Paris.

R

[1] Rabier F., Temmerman M., Böhm T., Hartmann H., Jensen P.D., Rathbauer J. et al. (2006) Particle density determination of pellets and briquettes, Biomass and Bioenergy, vol. 30, pp. 954-963.

[2] Ragland K.W., Aerts D.J., Baker A.J. (1991) Properties of wood for combustion analysis, Bioresource Technology, vol. 37, pp. 161-168.

[3] Ražnjević K. (1978) Tabele și diagrame termodinamice. Editura Tehnică, București.

S

[1] Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. (2011) A review on biomass as a fuel for boilers, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 2262-2289.

[2] Salin J.G. (1999) Simulation models: from a scientific challenge to a kiln operator tool, 6th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosch, South Africa, pp.177-185.

[3] Salin J.G. (2010) Problems and solutions in wood drying modeling: history and future, Wood Material Science and Engineering, vol. 5, issue 2, pp. 123-134.

[4] Saptoadi H. (2008) The best biobriquette dimension and its particle size, Asian Journal on Energy & Environment, vol. 9, issues 3, 4, pp. 161-175.

- [5] Sharma B., Shah D.U., Beaugrand J., Janecek E.R., Scherman O.A., Ramage M.H. (2018) Chemical composition of processed bamboo for structural applications, *Cellulose*, vol. 25, pp. 3255-3266.
- [6] Siau J.F. (1995) Wood: influence of moisture on physical properties, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [7] Sjöström J., Blomqvist P. (2014) Direct measurements of thermal properties of wood pellets: elevated temperatures, fine fractions and moisture content, *Fuel*, vol. 134, pp. 460-466.
- [8] Smullyan R.M., Fitting M. (2010) Set theory and the continuum problem, Dover Publications, New York.
- [9] Spîrchez C., Lunguleasa A. (2016) Shear and crushing strengths of wood pellets, *Drewno*, vol. 59, issue 198, pp. 87-97.
- [10] Stanish M.A. (2008) Application of Wood Drying Simulation Models in Commercial Lumber Manufacturing, *Drying Technology*, vol. 26, issue 9, pp. 1089-1096.
- [11] Stelte W., Shang L., Holm J.K., Ahrenfeldt J. (2012) Recent developments in biomass pelletization—a review, *BioResources*, vol. 7, issue 3, pp. 4451-4490.
- [12] SR EN 13183-1-2003/AC-2004 Wood: moisture content of timber. Drying method.

Ş

- [1] Şova D., Bedeleian B. (2009) The characteristics of heat and mass transfer during evaporation from free surfaces, International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millenium” (proceedings), sub egida International Union of Forest Research Organizations, Braşov, pp. 125-132.

- [2] Șova D., Postelnicu A. (2009) Aplicarea metodei termodinamicii proceselor ireversibile la studiul transferului de căldură și de masă la suprafața corpurilor în procesul de uscare, PRO LIGNO, vol. 5, issue. 4.
- [3] Șova D., Bedeleian B. (2013) Statistical analysis of simulated wood drying schedules as regards drying time reduction in an experimental kiln, PRO LIGNO, vol. 9, issue 4, pp.715-720.
- [4] Șova D., Bedeleian B. (2014) Effects of air parameters on drying time and energy consumption, Revista Termotehnica, vol. 1, pp. 48-52.
- [5] Șova D., Bedeleian B., Sandu V. (2016) Application of Response Surface Methodology to optimization of wood drying conditions in a pilot-scale kiln, Baltic Forestry, vol. 22, issue 2, pp. 348-356.
- [6] Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) Criterial assessment of the drying quality, The final conference of COST Action E53 "The future of quality control for wood & wood products", 4-7th May 2010, Edinburgh.
- [7] Șova D., Postelnicu A., Bedeleian B. (2010) Assessment of drying quality by use of Kirpichev number, International Wood Products Journal, vol. 1, issue 2, pp. 70-74.
- [8] Șova D., Ungureanu, V.B., Postelnicu A. (2012) Tunelul experimental de uscare – de la teorie la practică, PRO LIGNO, vol. 8, issue. 1, pp. 15-27.
- [9] Șova D., Porojan M., Bedeleian I.B., Humenic G. (2018) Effective thermal conductivity models applied to wood briquettes, International Journal of Thermal Sciences, vol. 124, issue 2, pp. 1-12.
- [10] Șova D., Gurău L., Porojan M., Sandu V. (2015) Assessment of wood briquettes porosity by use of roughness parameters, International Conference „Wood Science and

Engineering in the Third Millenium" (proceedings), Brașov, pp. 811-819.

[11] Șova D., Gurău L., Porojan M., Florea O., Sandu V., Purcaru M. (2022) Indirect evaluation of the porosity of waste wood briquettes by assessing their surface quality, Waste and Biomass Valorization, vol. 13, issue 1, pp. 739–753.

[12] Șova V. (1970) Contribuții la studiul teoretic și experimental al schimbului de căldura și de masă în prezența evaporării de pe suprafețe libere plane în convecție forțată. Teză de doctorat, Institutul Politehnic Cluj.

T

[1] Tamme V., Muiste P., Mitt R., Tamme H. (2011) Determination of effective diffusion coefficient stress of pine wood during convective drying, Baltic Forestry, vol. 17, issue1, pp. 110-117.

[2] Thunman H., Leckner B. (2002) Thermal conductivity of wood – models for different stages of combustion, Biomass and Bioenergy, vol. 23, pp. 47-54.

[3] TORKSIM v.5.0. (2008) User manual and instructions for evaluation of calculated results, SP Technical Research Institute of Sweden, pp. 32.

[4] Truebswetter T. (2006) Holztrocknung. Fachbuchverlag Leipzig.

U

[1] Ushakov D.E., Karelin D.V., Bychkov A.L., Korobeinichev O.P., Shmakov A.G. (2017) Preparation of fuel briquettes from plant biomass, Solid Fuel Chemistry, vol. 51, pp. 238–242.

[2] Usta I. (2003) Comparative study of wood density by specific amount of void volume

(porosity). Turkish Journal of Agriculture & Forestry, vol. 27, pp. 1-6.

W

[1] Whitaker S. (1977) Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying, Advances in heat transfer, vol. 13, pp.119-203.

[2] Whitcomb P.J., Anderson M.J. (2005) RSM Simplified. Optimizing processes using response surface methods for designing of experiments. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.