

**CARACTERISTICILE DE ÎNCĂLZIRE ALE
RĂȘINOASELOR ÎN CÂMP ELECTRIC DE
ÎNALTĂ FRECVENȚĂ**

**HEATING CHARACTERISTICS OF
SOFTWOODS IN A HIGH FREQUENCY
FIELD**

Ciprian LĂZĂRESCU

Research Associate - The University of British Columbia – Faculty of Forestry, Department of Wood Science
Adresa/Address: 2424 Main Mall, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada.
E-mail: ciprilaz@mail.ubc.ca

Bogdan BEDELEAN

Assist.dr.eng. – TRANSILVANIA University in Brasov – Faculty of Wood Engineering
Adresa/Address: B-dul Eroilor nr. 29, 50036 Brasov, Romania
E-mail: bedelean@unitbv.ro

Stavros AVRAMIDIS*

Prof. - The University of British Columbia – Faculty of Forestry, Department of Wood Science
Adresa/Address: 2424 Main Mall, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada.
E-mail: stavros.avramidis@ubc.ca

Rezumat:

Scopul cercetării a fost de a stabili dacă încălzirea dielectrică la frecvențe radio poate fi o alternativă fezabilă pentru tratamentul fitosanitar al cherestelei verzi de rășinoase. Rezultatele sunt prezentate pentru două specii de rășinoase din Canada, respectiv pin (*Pinus contorta*) și cedru roșu (*Thuja plicata* Donn.). De asemenea, rezultatele sunt prezentate pe baza unei configurații care a presupus pentru fiecare experiment introducerea unei singure piese în instalație. Această piesă cu secțiunea de 40x90mm a fost izolată la partea superioară, inferioară și o laterală cu ajutorul a trei piese de cherestea uscate și cu secțiunea identică cu cea a piesei analizate. Din punct de vedere al proprietăților dielectrice, lemnul de cedru roșu are însușirea de a absorbi mult mai ușor câmpurile electromagnetice de înaltă frecvență. Vitezele de încălzire nu au fost corelate cu conținutul de umiditate pentru nicio specie studiată. Ceea ce evidențiază caracterul versatil al încălzirii dielectrice la frecvențe radio, respectiv creșterea simultană a temperaturii atât în zonele uscate cât și în cele umede. Pierderile de căldură prin convecție în mediul înconjurător pot reduce viteza medie de încălzire a straturilor exterioare ale piesei cu aproximativ 40%.

Cuvinte cheie: încălzire dielectrică; câmp electric de înaltă frecvență; rășinoase.

INTRODUCERE

Transportul lemnului în stare verde, chiar și între diferite provincii canadiene sau pe plan internațional, necesită certificarea oficială că produsele nu conțin dăunători (CFIA 2005).

Abstract:

The research aimed to establish whether dielectric heating at radio frequencies might be a feasible option for phytosanitation of green softwood boards. Results are presented for two softwood species, namely, lodgepole pine (*Pinus contorta*) and western red cedar (*Thuja plicata* Donn.), and for single-specimen testing configurations with a cross section of 40x90mm surrounded on three sides by similar cross-section kiln dried boards. In terms of dielectric properties, red cedar is nature "designed" to absorb more easily the dielectric fields. Heating rates were not correlated with moisture content for neither species investigated thus underlining the versatility of RF-heating that allows simultaneous rise of temperature within dry and wet areas. Convection losses through air contact may reduce the average heating rate of the shell by about 40%.

Key words: dielectric heating; radio frequency fields; softwoods

INTRODUCTION

The shipment of green lumber, either between different Canadian provinces or internationally, requires official certification that the products are free of pests (CFIA 2005). High concerns were raised

* Autor corespondent / Author to whom all correspondence should be addressed

Actualmente, amenințarea principală o constituie gândacul specific pinului de munte (*Dendroctonus ponderosae*) care a distrus șaizeci la sută din interiorul pădurii de pin în provincia British Columbia. De asemenea, acest dăunător reprezintă o amenințare pentru toate provinciile din Canada. Deoarece focarul de infecție este localizat în British Columbia, una dintre cele mai mari provincii producătoare și exportatoare de lemn (mai mult de 5% (MFLNRO 2009)), efectele unei posibile infestări globale sunt considerate scenarii realiste.

Printre metodele de sterilizare a lemnului verde, încălzirea dielectrică la frecvențe radio (RF) s-a dovedit a fi mai rapidă și mult mai eficientă decât oricare alt tratament convențional precum aburirea directă care poate cauza diferite probleme cum ar fi cementarea stratului de suprafață, uscarea parțială și probleme generate de condens (Milota ș.a. 1991, Avramidis ș.a.1994, Elustondo ș.a. 2005). Cu toate acestea, încălzirea dielectrică la frecvențe radio nu este lipsită de probleme. Spre exemplu, compoziția chimică și structura anatomică, fac ca fiecare specie de lemn să aibă proprietăți dielectrice unice. Prin urmare, unele specii pot "absorbi" câmpul electric mai ușor iar altele îl vor „reflecta”, dezavantaj care îngreunează transferul de căldură (Norimoto ș.a. 1971, Torgovnikov 1993). De asemenea, uniformitatea câmpului electric în interiorul materialului sterilizat poate fi considerată o altă problemă a încălzirii materialelor în câmp electric de înaltă frecvență (Jiao ș.a. 2010, Lăzărescu și Avramidis 2012).

OBIECTIVE

Această cercetare a avut ca obiectiv stabilirea și compararea caracteristicilor de încălzire în câmp electric de frecvență radio (RF) a două specii principale de rășinoase din provincia British Columbia, și anume, pin (*Pinus contorta*) și cedru roșu (*Thuja plicata Donn*), având un conținut variat de umiditate.

METODĂ, MATERIALE ȘI APARATURĂ

O instalație de uscare în vid-CIF, care operează la o frecvență de 6.8MHz și cu o lungime de undă de 44.2m, a fost utilizată în acest studiu ca instalație de încălzire (Fig. 1). Mai multe detalii referitoare la instalația utilizată sunt prezentate în studiul efectuat de Lăzărescu ș.a. (2009).

Patruzeci de piese de cherestea (scânduri) din pin (*Pinus contorta*) și cedru roșu (*Thuja plicata Donn*), lipsite de defecte și cu lungimea de 2m și secțiunea de 40x90mm, au fost obținute pe plan local. Temperatura a fost monitorizată, în același plan amplasat la o distanță de 100mm față de capătul pieselor de cherestea, prin intermediul a șase senzori cu fibră optică conectați la un instrument universal multicanal (FISO UMI Technologies Inc., Quebec, Canada). Poziția de

lately by the mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) endemic which killed sixty per cent of the interior pine forests in British Columbia and threatens currently all Canadian provinces. Because this infection is mainly localized in British Columbia, one of the world's largest producers and exporters of wood fiber (more than 5%, (MFLNRO 2009), the effects of a possible global infestation are considered realistic scenarios.

Among green lumber pasteurization methods, dielectric heating at radio frequencies (RF) has proven to be faster and more efficient than any other conventional treatment such as live steam that can result in surface casehardening, partial drying and condensate management problems (Milota et al.1991, Avramidis et al. 1994, Elustondo et al. 2005). Regardless, RF heating does not come problem-free. For example, chemical composition and internal structural organisation makes each wood species unique in terms of dielectric properties, where some may "absorb" the electric field easily while others will "deflect" it making heat transfer a difficult process (Norimoto et al. 1971, Torgovnikov 1993). Other problems might be related to electrical field uniformity inside the pasteurised material (Jiao et al.2010, Lazarescu and Avramidis 2012).

OBJECTIVES

This study assessed and compared the RF heating characteristics of two prominent British Columbia softwood species, namely, lodgepole pine (*Pinus contorta*) and western red cedar (*Thuja plicata Donn*) for a wide variety of moisture content distributions.

METHOD, MATERIALS AND EQUIPMENT

A radio frequency vacuum dryer (RFV), operating at 6.8MHz with a corresponding wavelength of 44.2m, was used as a heating laboratory apparatus (Fig. 1). Details about this apparatus may be found in Lazarescu et al. (2009).

Forty, 2-m-long free of visual defects and green lodgepole pine (*Pinus contorta*) and western red cedar (*Thuja plicata Donn.*) boards having a cross-section of 40x90mm were obtained locally. The temperature was monitored, within the same plane located 100mm from the front end, by six (Fig. 2) fiber-optic sensors connected to a universal multichannel signal conditioning instrument (FISO UMI Technologies Inc., Quebec, Canada). Each board was insulated using similar thickness dry kilned

amplasare a senzorilor este prezentată în Fig. 2. Fiecare piesă de cherestea a fost izolată folosind scânduri uscate cu grosime similară și din aceeași specie. În scopul realizării unei comparații între ratele de încălzire ale zonelor izolate și neizolate, o laterală a piesei de cherestea nu a fost izolată (Fig. 2). Experimentele s-au oprit atunci când în toate punctele de măsurare temperatura a fost egală sau mai mare de 60°C.

boards from the same species, one side being left non-insulated for comparison purposes (grey FISO sensors in Fig. 2). The experiments were stopped when the lowest temperature recorded reached 60°C.

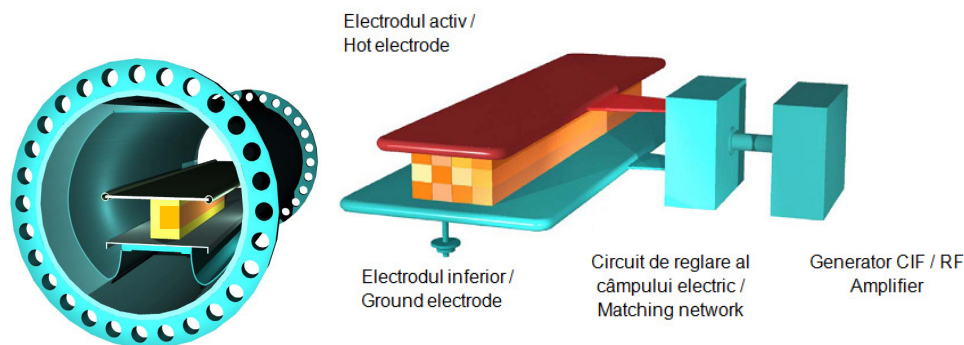


Fig. 1.

Reprezentarea grafică a instalației și a elementelor componente / Computer drawings of the RFV-kiln (left) and a cross section of the wood electrode geometry.

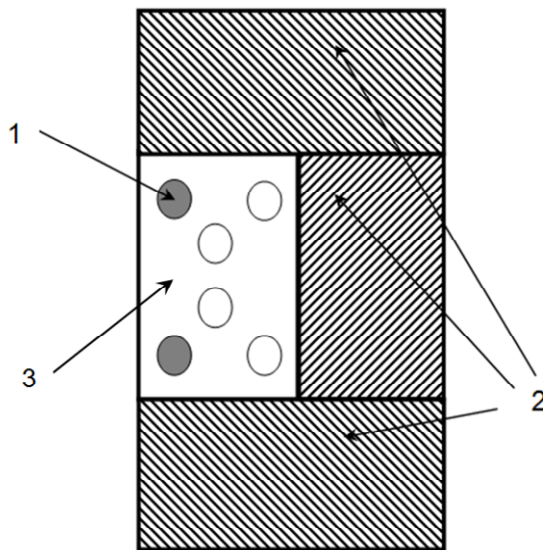


Fig. 2.

Structura pachetului de piese care a fost introdus în instalație / The structure of the heating assembly: 1 – senzori FISO / FISO sensors; 2 – piese izolatoare din cherestea uscată ($M=13\%$) / kiln dry insulating boards ($M=13\%$); 3 – piesa de lemn analizată / analyzed wood board.

Metodologia experimentală, care este detaliată în studiul efectuat de Lăzărescu și Avramidis (2012), a presupus încălzirea de cinci ori a fiecărei piese de cherestea. Diferența dintre ciclurile de încălzire a constat în reducerea lungimii pieselor analizate cu 100mm rezultând în modificarea puterii câmpului electric. Lungimea finală a pieselor de cherestea a fost de 1000mm. Această lungime a reprezentat limita impusă de precizia circuitului de

The experimental procedure, described in more details in Lazarescu and Avramidis (2012), consisted in performing a number of groups of five heating runs for each board, the difference between each run being the length that was reduced by 100mm each time, and power density that was increased based on volume reduction. The final length was 1000mm and represented the limit of the matching system accuracy. After each run the sensor tip areas were cut

reglare a câmpului electric. După fiecare ciclu de încălzire, epruvete din zonele în care au fost amplasați senzorii au fost debitate în scopul determinării conținutului de umiditate (M). Conținutul de umiditate s-a determinat prin metoda cântăririi și uscării (ASTM D 1576).

Proprietățile dielectrice ale fiecărei piese de cherestea au fost măsurate prin amplasarea unei epruvete (40x90x35mm) în secțiunea capacitivă a unui circuit rezonant paralel (Lăzărescu și Avramidis 2011). Un număr de 200 de valori ale coeficienților dielectrice, respectiv partea imaginară (ϵ'') și reală (ϵ') a constantei dielectrice complexe, au fost obținute pentru un conținut de umiditate cuprins între 180% - 0% pentru fiecare specie. Distribuția câmpului electric a fost calculată folosind aplicația informatică Poisson Superfish. Această aplicație a fost realizată de către un grup de cercetători din cadrul acceleratorului de particule de la Los Alamos pentru a calcula câmpurile electromagnetice și este disponibilă gratuit publicului (Halbach și Holsinger 1976, LAACG 2003). Valoarea câmpului electric (E, în V/m), și proprietatea dielectrică imaginară (ϵ'' , adimensională), la un anumit conținut de umiditate au fost utilizate pentru a determina puterea de depozitată în material (Torgovnikov 1993):

$$P_L = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' \int_{V_L} |E|^2 dV_L \quad [W] \quad (1)$$

în care: P_L este puterea depozitată în material, în W;
f – este frecvența, în MHz;
 ϵ_0 – permitivitatea absolută a aerului, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$, în F/m;

Densitatea de putere (PD, în kW/m³) a fost calculată prin împărțirea puterii depozitate în material la volum.

REZULTATE EXPERIMENTALE

Proprietățile dielectrice au fost analizate statistic folosind o funcție polinomială de gradul al treilea. Coeficienții de regresie și o comparație între cele două specii sunt prezentate în Fig. 3 și Tab 1. Pentru fiecare model coeficientul de determinare (R^2) a avut valoare relativ mare (0.89 – 0.92).

Diferențele dintre coeficienții reali (ϵ') sunt foarte mici pentru un interval al conținutului de umiditate cuprins între 30 și 120%. Oricum, speciile de rășinoase analizate sunt foarte diferite din punct de vedere a abilității lemnului de a absorbi căldură (ϵ''). Cedru roșu este superior pinului din punct de vedere a încălzirii dielectrice.

into small pieces and moisture content (M) was measured based on oven-dry volume (ASTM D 1576, North American Standards).

The dielectric properties of each board were measured by placing a rectangular wood sample (40x90x35mm) in the capacitive section of a parallel resonant circuit (Lăzărescu and Avramidis 2011). A number of 200 values of imaginary (ϵ'') and real (ϵ') dielectric coefficients at M's ranging from 180 to 0 % were collected for each species. Electric field configuration was computed using Poisson Superfish, a set of programs free for public download (Halbach and Holsinger 1976, LAACG 2003), designed by Los Alamos particle accelerator group to calculate electromagnetic fields. The electric field value (E, in V/m), and the imaginary dielectric property (ϵ'' , dimensionless) at specific moisture contents were used to measure the power deposited in the material (Torgovnikov 1993):

$$P_L = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' \int_{V_L} |E|^2 dV_L \quad [W] \quad (1)$$

where: P_L is the power loss, in W;
f - is the frequency, in MHz;
 ϵ_0 - is the absolute permittivity of air, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$, in F/m;

Power density (PD, in kW/m³) was computed by dividing power loss to the volume.

EXPERIMENTAL RESULTS

All dielectric property values were fit into M data using a third degree polynomial function, the regression coefficients and a comparison between the models calculated for each wood species are shown in Fig. 3 and Table 1; fairly high R-square values (0.89 to 0.92) could be assigned to each model.

The differences between the real coefficients (ϵ') are very small for moisture contents ranging between 30 and 120% but the analysed softwood species are very different in terms of the ability of wood to absorb heat (ϵ''). Red cedar has superior qualities in terms of dielectric heating over pine and therefore was expected to heat up faster.

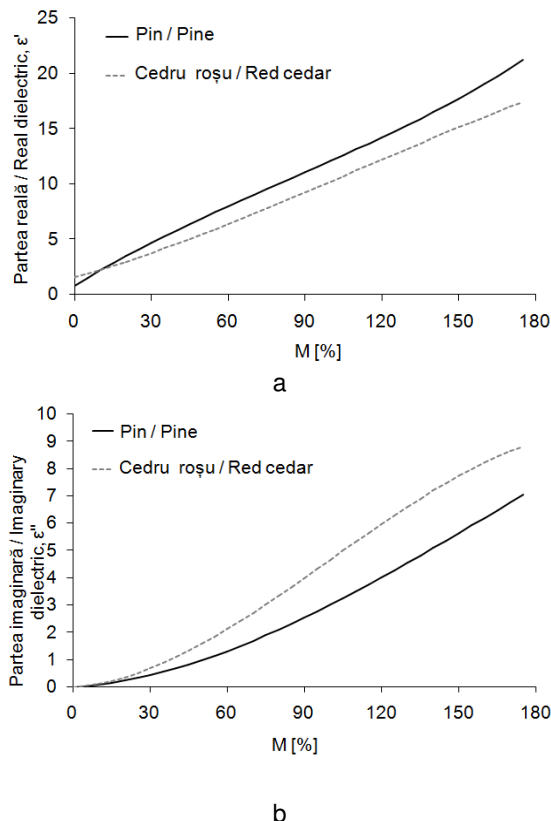


Fig. 3.

Partea reală și imaginară a constantei dielectrice complexe în funcție de conținutul de umiditate / Real and imaginary dielectric properties as a function of moisture content:
a - Partea reală / real; b- partea imaginară / imaginary.

Tabelul 1 / Table 1

Coeficienții de regresie / The dielectric regression coefficients

Proprietatea dielectrică / Dielectric property	Specia lemnoasă / Wood species	Eq. $\epsilon', \epsilon'' = a_0 + a_1M + a_2M^2 + a_3M^3$ (2)				
		a_3	a_2	a_1	a_0	R^2
Partea reală / Real	Pin / Pine	2E-6	-5E-4	0.1428	0.8060	0.91
	Cedru roșu / Red cedar	-9E-7	3E-4	0.0657	1.5546	0.92
Partea imaginară / Imaginary	Pin / Pine	-6E-7	3E-4	0.0061	-	0.90
	Cedru roșu / Red cedar	-2E-6	6E-4	0.0066	-	0.89

Un număr de 600 de viteze de încălzire (dT/dt) au fost obținute pentru fiecare specie lemnoasă. Analizarea datelor a arătat că nu este posibil să se stabilească o corelație între viteza de încălzire și conținutul de umiditate pentru niciuna din speciile analizate (Fig. 4). În general se poate observa că vitezele de încălzire mai mari sunt asociate cu conținuturi de umiditate scăzute. Valorile reduse ale căldurii specifice în aceste zone au contrabalansat scăderea în densitatea de putere. Per ansamblu densitatea de putere a crescut exponențial cu umiditatea, similar cu rezultatele obținute din calculele teoretice ale căldurii specifice în raport cu același parametru (Fig. 5).

A number of 600 heating rates (dT/dt) were collected for each wood species. Data analysis showed that no correlation could be established between heating rate and moisture content for either species (Fig. 4). One could visually notice a slight trend, that is, the highest heating rates were associated with lower moisture contents. The lower energy demands (smaller specific heat values) counter balanced the lower power density deposited in those areas. Overall power density increased exponentially the trend matching theoretical calculations of heat capacity increase with moisture content (Fig. 5).

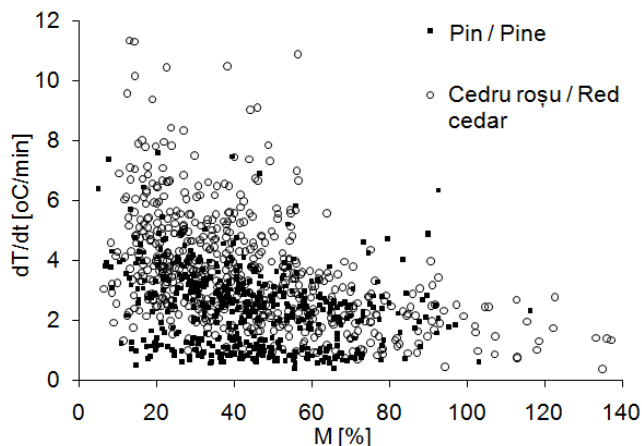


Fig. 4.

Reprezentarea grafică a vitezei de încălzire (dT/dt) în funcție de conținutul de umiditate pentru ambele specii / Plot of dT/dt versus moisture content for both species.

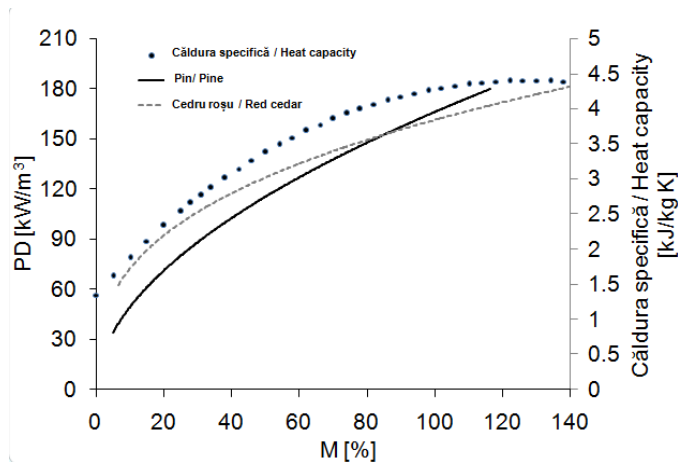


Fig. 5.

Cantitatea de căldură generată în funcție de conținutul de umiditate / Power density versus moisture content.

Corelația dintre densitatea de căldură (PD) și conținutul de umiditate (M) a fost reprezentată grafic în Fig. 5 folosind următoarea relație :

Pin:

$$PD = 14.8 \cdot M^{0.525}, R^2=0.55 \quad (3)$$

Cedru roșu:

$$PD = 32.19 \cdot M^{0.352}, R_2=0.33 \quad (4)$$

În Tab. 2 sunt prezentate principalele variabile măsurate pe parcursul experimentelor. Valorile minime au fost înregistrate în zonele neizolate 2 și 5. Analiza post-hoc (metoda de comparație multiplă Bonferroni) a indicat o diferență semnificativă între viteza medie de încălzire a zonelor din interior (zonele 1,6,7 și 8) și a celor din exterior (2 și 5):

The correlation between power density (PD) and moisture content (M) was derived and plotted in Fig. 5 using the following relationship:

Pine:

$$PD = 14.8 \cdot M^{0.525}, R^2=0.55 \quad (3)$$

Red cedar:

$$PD = 32.19 \cdot M^{0.352}, R_2=0.33 \quad (4)$$

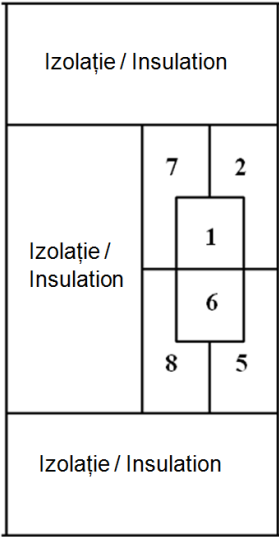
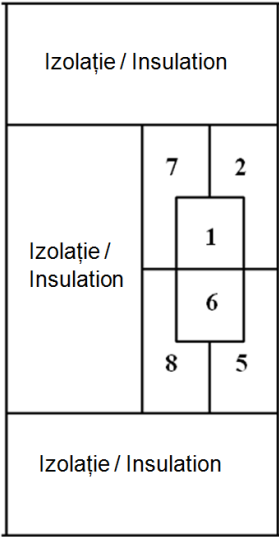
Tab. 2 illustrates the main variables measured during the experiments. Minimum values were recorded in non-insulated areas 2 and 5. A post-hoc statistical test (Bonferroni multiple comparisons) indicated a significant difference between the average heating rate of interior (areas 1,6,7 and 8) and exterior (2 and 5):

Pin: la interior (2.72°C/min) și exterior (1.62°C/min);
Cedru roșu: la interior (4.13°C/min) și exterior (2.49°C/min).

Pine: interior (2.72°C/min) and exterior (1.62°C/min);
Red cedar: interior (4.13°C/min) and exterior (2.49°C/min).

Tabelul 2 / Table 2

Distribuția de umiditate (M), densitate a puterii (PD) și vitezei de încălzire (dT/dt) în interiorul scândurilor / M, PD and dT/dt distribution inside the boards.

Specia / Species	Configurația ansamblului / Specimen assembly	Zona / Area #	M, in %	PD, in kW/m ³	dT/dt, in °C/min		
Pin / Pine		1	5-97	34-182	1.85-7.59		
		2	8-95	30-187	0.4-5.84		
		5	15-103	57-355	0.39-2.37		
		6	6-116	34-238	0.52-7.48		
		7	7-92	42-183	0.62-6.92		
		8	13-89	61-264	0.81-6.46		
		Cedru roșu / Red cedar		1	6-144	55-217	0.55-5.92
				2	8-155	40-223	0.81-11.36
5	11-142			79-320	0.37-6.48		
6	9-152			32-239	0.65-10.87		
7	8-113			60-200	1.62-7.47		
8	10-195			67-396	1-8.32		

Reprezentarea vitezei de încălzire pe intervale în funcție de numărul de observații înregistrate pentru fiecare specie lemnoasă (Fig. 6) au evidențiat pentru:

- Pin – o distribuție apropiată de cea normală, excepție fiind intervalul 0.65 - 1.15 care a conținut un număr ridicat de observații (115); majoritatea observațiilor au fost cuprinse între 2.15 și 3.15°C/min.
- Cedru roșu – o distribuție aproximativ normală cu majoritatea observațiilor cuprinse între 2.15 și 3.65°C/min.

The plot of heating rate classes versus the number of observations recorded for each wood species (Fig. 6) demonstrates for:

- Pine – a close to normal distribution, the exception being the interval 0.65 to 1.15 which contained a higher number of observations (115); most of the observations were between 2.15 and 3.15°C/min.
- Red cedar – almost a normal distribution with most of the observations between 2.15 and 3.65°C/min.

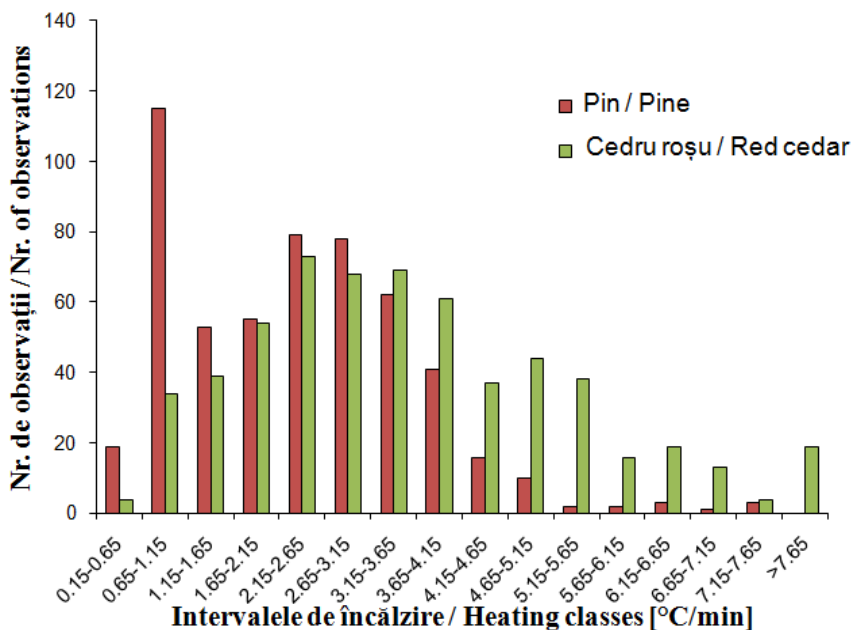


Fig. 6.

Reprezentarea grafică pe intervale a vitezelor de încălzire / The plot of heating rate classes versus the number of observations.

CONCLUZII

Pe baza rezultatelor acestei cercetări se pot concluziona următoarele :

1. lemnul de cedru roșu are proprietăți dielectrice superioare ceea ce îl face un candidat perfect pentru procedeele de încălzire dielectrică;
2. vitezele de încălzire nu au fost corelate cu conținutul de umiditate pentru niciuna dintre speciile de rășinoase analizate. Acest lucru evidențiază caracterul versatil al încălzirii în câmp electric de înaltă frecvență care permite creșterea simultană a temperaturii atât în zonele uscate cât și în cele umede;
3. pierderile prin convecție în zona neizolată pot reduce viteza medie de încălzire cu aproximativ 40%.

MULȚUMIRI

Autorii doresc să mulțumească pentru sprijinul financiar oferit printr-un grant de cercetare din partea Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada.

CONCLUSIONS

In the light of this investigation, the following conclusions are drawn:

1. red cedar has superior dielectric properties which makes it a perfect candidate for dielectric heating technologies;
2. the heating rates were not correlated with moisture content for any of the softwood species investigated thus underlining the versatility of RF-heating that allows simultaneous rise of temperature within dry and wet areas;
3. and, convection losses through air contact may reduce the average heating rate of the shell by about 40%.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was financially supported by a Strategic Grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

Avramidis S, Liu F, Neilson BJ (1994) Radio-frequency/vacuum drying of softwoods: drying of thick western redcedar with constant electrode voltage. Forest Prod. J. 44(1):41-47.

CFIA (2005) Guidelines for the Phytosanitary Certification of Lumber for Export. Canadian Food Inspection Agency. Online at: <http://www.inspection.gc.ca/plants/forestry/exports/lumber-for-export/eng/1319344061800/1319344217966>

Elustondo D, Avramidis S, Zwick R (2005) The demonstration of increased lumber value using optimized lumber sorting and radio frequency vacuum drying. Forest Prod. J. 55(1):76-83.

Halbach K, Holsinger R (1976) Superfish - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry. Particle Accelerators 7: 213-222.

Jiao, S., Tang, J., Johnson, J.A., Tiwari, G., Wang, S. 2011. Determining radio frequency heating uniformity of mixed beans for disinfestation treatments. Transactions of the ASABE. 54(5):1847-1855

LAACG (2011) Download Area for Poisson Superfish V7.19. Los Alamos Accelerator Code Group. Online at: http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml

Lazarescu C, Avramidis S (2011) Radio – frequency heating kinetics of softwood logs. Drying Technology 29(6):673-681.

Lazarescu C, Avramidis S (2012) Heating characteristics of western hemlock (*Tsuga Heterophylla*) in a high frequency field. Eur. J. Wood Prod. 70:489–496.

Lazarescu C, Plattner A, Hart F, Breuil C, Avramidis S (2009) Pasteurization of Hemlock by Radio Frequency Heating: a preliminary study. Forest Prod. J. 59(4):79-83.

Milota MR, Danielson JD, Boone RS, Huber DW (1991). Quality drying of softwood lumber: guidebook – checklist. General technical report FPL; IMP-GTR-1. Online at: http://msucares.com/forestproducts/topics/documents/softwood_drying.pdf

MFLNRO (2009) Investing in our forests. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations in Canada. Online at: <http://www.for.gov.bc.ca/mof/fcbc/FCBC-Opportunities.pdf>

Norimoto M, Hayashi S, Yamada T (1971) Anisotropy of dielectric constant in coniferous wood. Holzforschung 51:12–32.

Torgovnikov GI (1993) Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials. Springer-Verlag, New York.