

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Ověřování tepelné vodivosti dřevěných materiálů

Diplomová práce

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Autor práce: Bc. Petr Kostka

PRAHA 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma ověřování tepelné vodivosti u dřevěných materiálů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....

Petr Kostka

Poděkování

Dovolte, abych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. Pavlu Neubergerovi Ph.D. za jeho pomoc, obětovaný čas, cenné rady a připomínky při řešení problémů a psaní této diplomové práce.

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá ověřováním tepelné vodivosti a dalších termofyzikálních vlastností různých typů dřev (smrk, dub, jasan a javor). K řešení byl použit speciální přístroj ISOMET 2104, který je založen na dynamické metodě měření. K měření byly použity vždy tři odlišné vzorky k jednotlivým stromům (např.: odlišné stáří stromů). Provedeným výzkumem byly zjištěny hodnoty tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a také měrné tepelné kapacity v závislosti na postupně se snižující vlhkosti. Hlavním výsledkem této práce bylo zjištění, že hodnoty termofyzikálních vlastností u dřevěných materiálů jsou velmi proměnlivé v závislosti na stáří, podmínkách růstu, půdě a dalších faktorech. Některé údaje se s dosud známými daty shodují, jiné se naopak rozcházejí.

Klíčová slova: Dynamická metoda, součinitel tepelné vodivosti, termofyzikální vlastnosti dřevěných materiálů, vlhkost dřeva

Verification of thermal conductivity of wood materials

Summary: This diploma thesis deals with verifying the thermal conductivity and other thermophysical properties of different types of wood (spruce, oak, ash and maple). A special device ISOMET 2104, which is based on dynamic method of measurement, was used. Three different samples for each type of wood were used (for example, different age of trees). Values of the thermal conductivity, the thermal diffusivity and the specific heat capacity, depending on the gradually decreasing moisture of wood, were obtained. The key point of this study was finding that the values of thermophysical properties of wood materials vary significantly depending on the age, growing conditions, properties of the soil and other factors. Some of the data correspond with previously published studies but other data are in contrast to them.

Keywords: Dynamic method, thermal conductivity, thermophysical properties of wood materials, wood moisture

Obsah

1. Úvod	1
2. Termofyzikální vlastnosti a jejich měření	3
2.1 Tepelná vodivost	3
2.2 Teplotní vodivost.....	4
2.3 Měrná tepelná kapacita.....	6
2.4 Rozdělení měřicích metod termofyzikálních veličin.....	7
2.5 Metoda horkého drátu	10
3. Dřevo a jeho vlastnosti	13
3.1 Stavba dřeva	13
3.2 Přenos tepla ve dřevě.....	14
3.3 Vlhkost dřeva	16
3.4 Hustota dřeva	18
3.5 Popis měřených druhů dřeva.....	19
3.5.1 Smrk (Picea)	19
3.5.2 Dub (Quercus)	20
3.5.3 Jasan (Fraxinus)	21
3.5.4 Javor (Acer)	22
4. Cíle práce	24
5. Metodika práce.....	25
6. Materiál a metody	26
6.1 Měřené vzorky	26
6.2 Zařízení na měření termofyzikálních vlastností ISOMET	27
7. Výsledky.....	31
7.1 Termofyzikální závislosti u dřeva smrku.....	31
7.2 Termofyzikální závislosti u dřeva dubu	34
7.3 Termofyzikální závislosti u dřeva jasanu	37
7.4 Termofyzikální závislosti u dřeva javoru.....	40
8. Diskuze k naměřeným hodnotám	43
9. Závěr.....	45
10. Seznam použitých zdrojů.....	46
11. Přílohy	49

Seznam použitých zkratk

a – součinitel teplotní vodivosti ($m^2 s^{-1}$),

c_0 – měrné teplo absolutně suchého dřeva (prakticky měrné teplo dřevní substance) ($kJ kg^{-1} K^{-1}$),

c_p – měrná tepelná kapacita ($J kg^{-1} K^{-1}$),

c_v – měrné teplo vody ($4,182 kJ kg^{-1} K^{-1}$),

c_w – měrné teplo dřeva při vlhkosti w ($kJ kg^{-1} K^{-1}$),

d – délka (m),

H – vlhkost vzduchu (%),

m – hmotnost tělesa (kg),

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu (kg),

$\max(x)$ – maximální hodnota funkce x ,

$\min(x)$ – minimální hodnota funkce x ,

m_w – hmotnost dřeva při vlhkosti w (kg),

Q – množství tepla (J),

q – tepelný výkon (W),

q_0 – výkon tepelného zdroje v objemové jednotce látky ($W \cdot m^{-3}$),

S – plocha (m^2),

t – čas (s),

T – teplota (K),

t_v – teplota vzduchu (C^0),

V – objem (m^3),

w_a – absolutní vlhkost dřeva (%),

w_r – relativní vlhkost dřeva (%),

γ – Eulerova konstanta,

$\delta(x)$ – směrodatná odchylka hodnoty x ,

$\delta^2(x)$ – rozptyl hodnoty x ,

ΔT – rozdíl teplot (K),

λ – koeficient tepelné vodivosti ($W m^{-1} K^{-1}$),

ρ – hustota ($kg \cdot m^{-3}$),

ρ_0 – hustota dřeva ($kg m^{-3}$).

Seznam obrázků

Obr. 1 Závislost součinitele tepelné vodivosti na hustotě dřeva	4
Obr. 2 Závislosti součinitele tepelné a teplotní vodivosti na vlhkosti dřeva	5
Obr. 3 Závislost vlhkosti dřeva na měrné tepelné kapacitě	6
Obr. 4 Vliv druhu a vlhkosti dřeva na měrné teplo	7
Obr. 5 Rozdělení měřících metod termofyzikálních veličin	9
Obr. 6 Řez příčný, podélný poloměrový a tečnový	13
Obr. 7 Prvky kmene v příčném řezu	14
Obr. 8 Příklady tepelně fyzikálních charakteristik vybraných druhů dřev	16
Obr. 9 Závislost relativní na absolutní vlhkosti	17
Obr. 10 Princip odpařování vody	18
Obr. 11 Příčný řez smrku	20
Obr. 12 Příčný řez dubu	21
Obr. 13 Příčný řez jasanu	22
Obr. 14 Příčný řez javoru	23
Obr. 15 ISOMET 2104	28
Obr. 16 ISOMET 2104 – čelní pohled	29
Obr. 17 Plošné sondy	30
Obr. 18 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva smrku	32
Obr. 19 Graf závislosti tepelné vodivosti na času u dřeva smrku	32
Obr. 20 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva smrku	33
Obr. 21 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva smrku	33
Obr. 22 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva dubu	35
Obr. 23 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva dubu	35
Obr. 24 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva dubu	36
Obr. 25 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva dubu	36
Obr. 26 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu	38
Obr. 27 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva jasanu	38
Obr. 28 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu	39

Obr. 29 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu	39
Obr. 30 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva javoru	41
Obr. 31 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva javoru	41
Obr. 32 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva javoru	42
Obr. 33 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva javoru	42

Seznam tabulek

Tab. 1 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva smrku – první část	31
Tab. 2 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva smrku – druhá část	31
Tab. 3 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva dubu – první část	34
Tab. 4 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva dubu – druhá část	34
Tab. 5 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva jasanu – první část	37
Tab. 6 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva jasanu – druhá část	37
Tab. 7 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva javoru – první část	40
Tab. 8 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva javoru – druhá část	40
Tab. 9 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva smrku – první část	49
Tab. 10 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva smrku – druhá část	49
Tab. 11 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva dubu – první část	49
Tab. 12 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva dubu – druhá část	49
Tab. 13 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva jasanu – první část	50
Tab. 14 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva jasanu – druhá část	50
Tab. 15 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva javoru – první část	50
Tab. 16 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva javoru – druhá část	50
Tab. 17 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva smrku – první část	51
Tab. 18 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva smrku – druhá část	51
Tab. 19 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva dubu – první část	51
Tab. 20 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva dubu – druhá část	51
Tab. 21 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva jasanu – první část	52
Tab. 21 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva jasanu – druhá část	52
Tab. 22 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva javoru – první část	52
Tab. 23 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva javoru – druhá část	52

1. Úvod

Tepelná vodivost, jako jedna z částí termofyzikálních vlastností, kterým je tato diplomová práce věnována, je východiskem pro studium tepelných procesů. A to nejen u dřev, ale i u dalších materiálů, kde jsou tyto studia limitující podmínkou pro rozvoj výzkumu látek, zvýšení úrovně izolací budov, ale třeba i pro optimalizaci energetického využití odpadů těchto materiálů. Z těchto důvodů byly vyvinuty různé metody vhodné na měření termofyzikálních vlastností. V minulosti se především využívaly stacionární metody, které však byly neefektivní. Měření bylo zdouhavé a bylo možné měřit pouze jednu termofyzikální vlastnost. Dnes se běžně využívá takzvaná nestacionární metoda pro měření termofyzikálních vlastností. Přístroj ISOMET 2104, využívající se pro nestacionární metodu měření, umožňuje relativně krátká doba měření (10 - 15 min) a zjišťování nejen tepelné vodivosti, ale dále také teplotní vodivosti a měrné tepelné kapacity. Výše zmíněné metody nám poskytují možnost ověřit teoretické hodnoty a také přispět k pochopení základních vlastností materiálů. Pokrok v této oblasti je podmíněn rozvojem v teoretickém i experimentálním zkoumání a následně i pokrokem v technické praxi.

Dřevo, jež je předmětem zkoumání této diplomové práce, patří mezi nejdéle využívané materiály s všestranným využitím. Díky svému přírodnímu charakteru, příznivým fyzikální a chemickým vlastnostem, přirozenému a estetickému vzhledu je dřevo žádanou surovinou. Je to přírodní materiál rostlinného původu, mezi jehož největší výhody, při odborném hospodaření, patří možnost neustálé obnovy. Hlavně ve městech mají stromy velký vliv na zdraví obyvatel. Filtrují totiž vzduch a zachycují různé škodlivé látky (oxidy síry a dusíku, oxid uhelnatý atd.) vypouštěné z automobilů, továren a jiných zdrojů. Další výhodou živých stromů je, že při fotosyntéze přeměňují energii světelného záření na energii chemických vazeb. Při tomto ději využívají jednoduché anorganické látky (oxid uhličitý a vodu) a jako odpad produkují kyslík, který vypouštějí do atmosféry. Tento děj má zásadní význam pro život na zemi.

Nejprve zabývám jednotlivými termofyzikálními vlastnostmi (tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a také měrné tepelné kapacity), které jsou měřeny v experimentální části práce. Poté se zabývám rozdělením měřících metod termofyzikálních vlastností a podrobněji rozebírám metodu horkého drátu, na jejímž principu je založen přístroj ISOMET 2104. Dále se zabývám obecnými vlastnostmi dřeva (stavbou dřeva, tepelným přenosem, vlhkostí dřeva a jeho hustotou

a také obecnými informacemi o smrku, dubu, jasanu a javoru). V kapitole materiál a metody popisují měřené vzorky a podmínky jejich získání. Další oddíl této kapitoly je věnován přístroji ISOMET 2104, který jsem využíval v experimentální části práce. Experimentální část diplomové práce zpracovává výsledky z několikaměsíčního cyklu měření. Výsledky prezentuji pomocí tabulek a grafů. V diskuzi a závěru porovnávám získané výsledky s údaji uváděnými v odborné literatuře a zasazuji je do širšího kontextu současných poznatku o dané problematice.

2. Termofyzikální vlastnosti a jejich měření

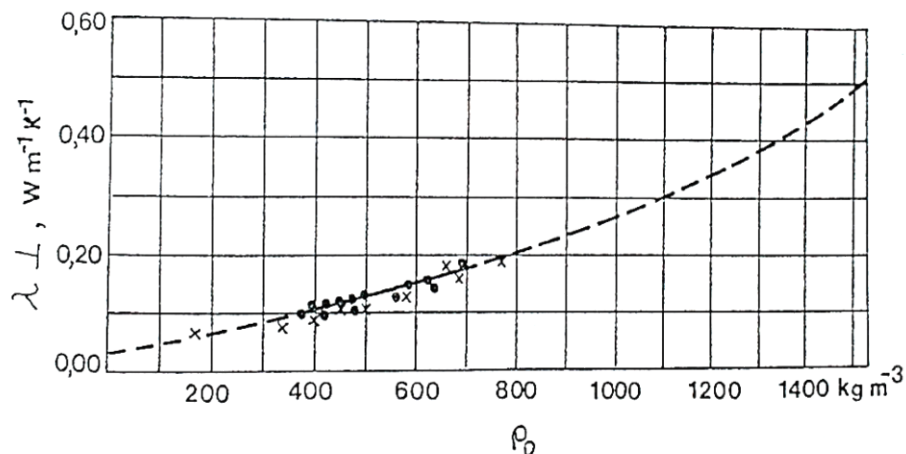
2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost určité látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti (λ). Kromě pojmu tepelná vodivost se také často používá termín měrná tepelná vodivost, což je schopnost dané látky vést teplo, respektive rychlost, s jakou teplo pronikne z jedné části tělesa do dalších, chladnějších částí. Podle Matoviče (Matovič, 1993) je součinitel tepelné vodivosti definován: „*Udává množství tepla, které projde za 1 sekundu krychlí o hraně 1 m mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je rozdíl teplot 1 K. Rozměr této veličiny je $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ “.* (Matovič, 1993)

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{t \cdot S (T_2 - T_1)} \quad (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}) \quad (1)$$

kde λ – koeficient tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$),
Q – množství tepla (J),
S – plocha tyče (m^2),
t – čas (s),
 $T_2 - T_1$ – teplotní rozdíl na koncích tyče (K),
d – délka tyče (m).

Tepelná vodivost je ovlivňována mnoha faktory, mezi nimiž mají největší váhu následující: hustota, teplota, vlhkost a struktura dřeva. Obzvláště důležitá je anatomická struktura u dřeva, protože se předpokládá, že teplo se šíří vzduchem, který je uvnitř buněčných stěn a také paralelně po buněčných stěnách, ve kterých jsou tzv. mikrofibrily orientované hlavně po délce osy buněk. Jejich úhlem v buněčné stěně se zdůvodňuje rozdíl součinitele tepelné vodivosti. Výsledkem toho je, že tento součinitel je ve směru podél vláken 1,5 až 2,5 krát větší než napříč. Vliv hustoty dřeva na součinitel tepelné vodivosti je zřejmý z obr. 1, kde se jasně projevuje, že se zvyšující se hustotou dřeva se zvyšuje i součinitel λ .



Obr. 1 Závislost součinitele tepelné vodivosti na hustotě dřeva (Ugolev, 1975)

Dalším významným vlivem je teplota. I zde platí, že se zvyšující se teplotou vzrůstá tepelná vodivost a to zejména u vlhkého dřeva. (Matovič, 1993) (Gandelová, 2009)

2.2 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost určité látky je charakterizována součinitelem teplotní vodivosti (a). Kromě tohoto pojmu se také často v literatuře objevuje termín měrná teplotní vodivost či tepelná difuzita. Tato vlastnost udává rychlost vyrovnání teplotních rozdílů v látce při nestacionárních dějích. Vyjadřuje se následujícím vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_0} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

Kde a – součinitel teplotní vodivosti ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

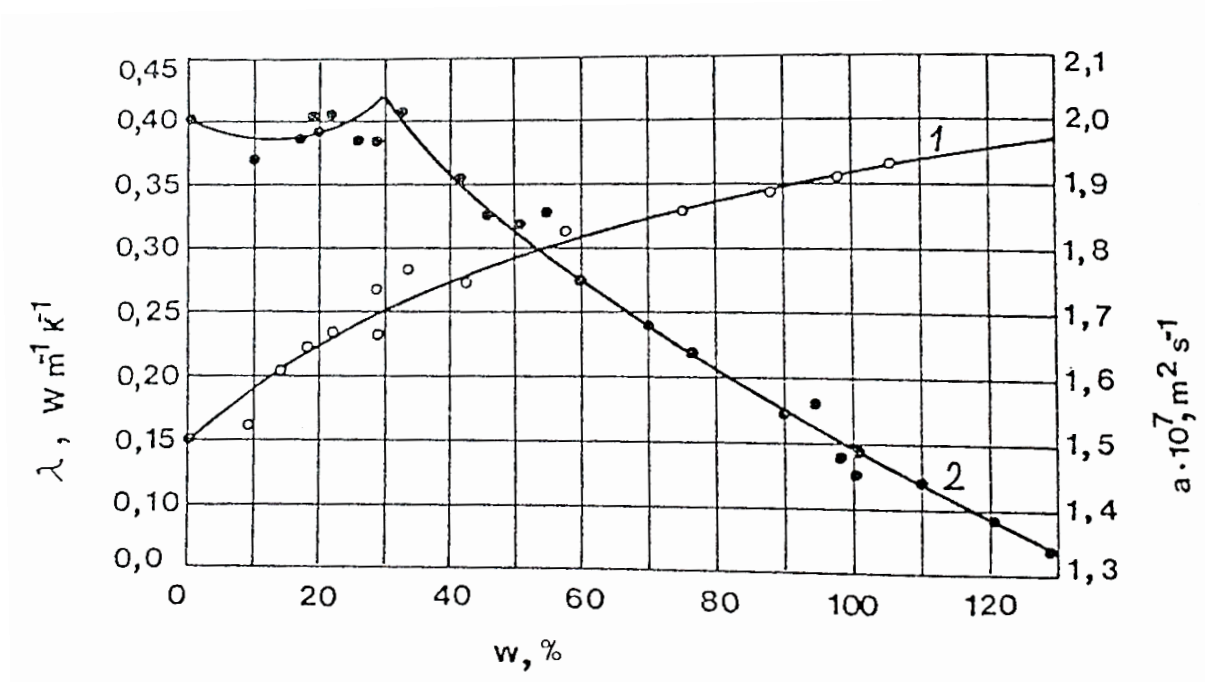
λ – koeficient tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

c – měrné teplo ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

ρ_0 – hustota dřeva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Stejně jako součinitel tepelné vodivosti i součinitel teplotní vodivosti absolutně suchého dřeva je závislý na hustotě dřeva. Součinitel teplotní vodivosti se se snížením hustoty dřeva zvyšuje.

Součinitel teplotní vodivosti je zvláště vysoký u dřev s nízkou hustotou, protože teplotní vodivost vzduchu je až 100 krát větší než dřeva. Vlhkost je dalším důležitým parametrem ovlivňujícím součinitel teplotní vodivosti. Od meze hygroskopicity klesá teplotní vodivost s rostoucí vlhkostí. Do této meze je průběh poněkud složitější (viz. Obr. 2). Tento součinitel je mimo jiné ovlivněn teplotou. (Matovič, 1993) (Horáček, 1998)



Obr. 2 Závislosti součinitele tepelné a teplotní vodivosti na vlhkosti dřeva (Ugolev, 1975)

- 1- součinitel tepelné vodivosti
- 2- součinitel teplotní vodivosti

V praxi se součinitel teplotní vodivosti používá například k zjištění času potřebného k prohřátí dřeva při sušení, páření atd.

2.3 Měrná tepelná kapacita

Dříve také označována jako měrné teplo či specifické teplo. Měrná tepelná kapacita je označována písmenem (c) či (c_p) a uvádí se jako měrná (hmotnostní) tepelná vodivost s jednotkou ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) či jako měrná objemová vodivost s jednotkou ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$). Je to schopnost látky akumulovat teplo, respektive udává množství tepla, které je potřeba pro ohřátí jednotkové hmotnosti či objemu o 1K. Platí vztah:

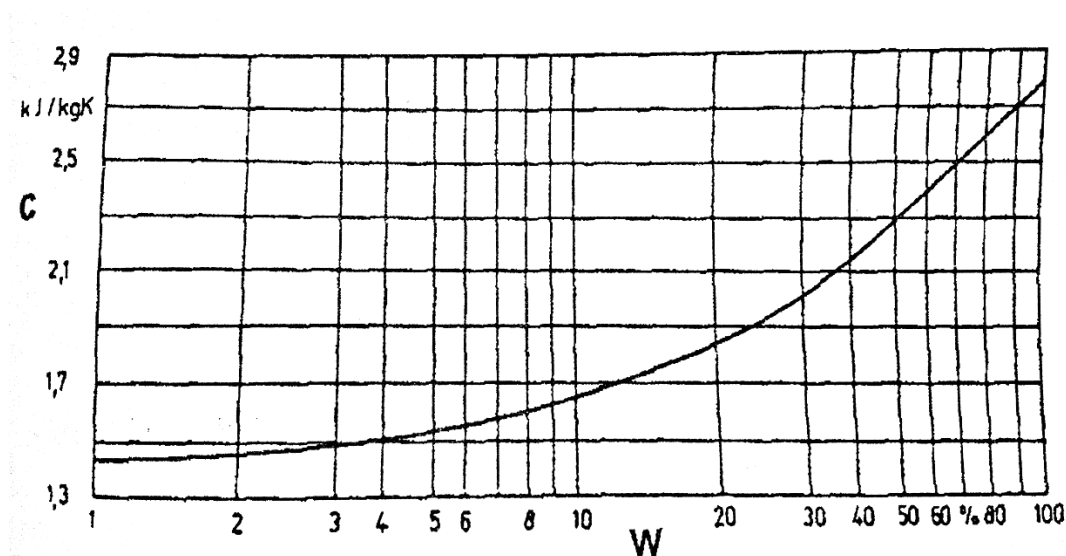
$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) \quad (3)$$

Kde c – měrná tepelná vodivost ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$),

Q – množství tepla (J),

m – hmotnost tělesa (kg),

ΔT – rozdíl teplot (K).



Obr. 3 Závislost vlhkosti dřeva na měrné tepelné kapacitě (Kollmann, 1951)

Měrná tepelná kapacita není oproti součinitelům tepelné a teplotní vodivosti závislá na druhu a hustotě dřeva. To je z velké míry způsobeno tím, že měrné teplo je ovlivňováno hlavně dřevní substancí a vzduchem pouze v nepatrném množství. Při teplotě 0 °C a absolutně suchém dřevě se měrné teplo udává 1,55 kJ kg⁻¹ K⁻¹. Měrné teplo je závislé na teplotě a vlhkosti dřeva. Při zvyšující se teplotě a také vlhkosti se zvyšuje měrná tepelná kapacita. Platí vztah:

$$c_w = \frac{w c_v + c_0}{1+w} \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4)$$

Kde c_w – měrné teplo dřeva při vlhkosti w ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 c_v – měrné teplo vody, $4,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
 w – absolutní vlhkost dřeva (%),
 c_0 – měrné teplo absolutně suchého dřeva (prakticky měrné teplo dřevní substance) ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Měrná tepelná kapacita se v praxi používá například při sušení, ohřevu, impregnaci dřeva a dalších. Také se používá u výpočtů při technologických procesech. Na obr. 4 je možné vidět porovnání vlivu druhu a vlhkosti dřeva na měrném teple. (Matovič, 1993) (Gandelová, 2009)

Druh dřeva	Měrné teplo dřeva c ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) při vlhkosti dřeva w					
	0%	5%	10%	20%	30%	100%
smrk	1,35	1,51	1,63	1,80	2,18	2,80
borovice	1,41	1,54	1,66	1,87	2,33	2,80
dub	1,45	1,59	1,67	1,91	2,37	2,79
buk	1,46	1,60	1,71	1,92	2,41	2,83

Obr. 4 Vliv druhu a vlhkosti dřeva na měrné teplo (Horáček, 1998)

2.4 Rozdělení měřicích metod termofyzikálních veličin

Základem metod stanovení termofyzikálních veličin a měření tepelných veličin je diferenciální rovnice pro vedení tepla

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + q_0 \quad (14)$$

kde q_0 – výkon tepelného zdroje v objemové jednotce látky ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c_p – měrná tepelná kapacita při stálém tlaku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 ρ – hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 T – termodynamická teplota (K),
 t – čas (s),

λ – koeficient tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Za podmínky, že látka je izotropní, je možné napsat $\text{div}(\lambda \text{ grad } T) = \lambda \cdot \Delta T$, to znamená, že rovnici výše lze napsat ve tvaru:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_0 \quad (15)$$

V této rovnici máme základní termofyzikální veličiny a to dvě explicitně vystupující: tepelná vodivost a měrné teplo. Když rovnici vydělíme součinem $c_p \rho$, upravíme tak poté dostaneme novou rovnici obsahující měrné teplo a teplotní vodivost. Když poté najdeme vhodné řešení, v určitých začátečních a hraničních podmínkách, naskytne se nám příležitost tyto veličiny změřit. (Krempaský, 1969) (Kubičár, 1988)

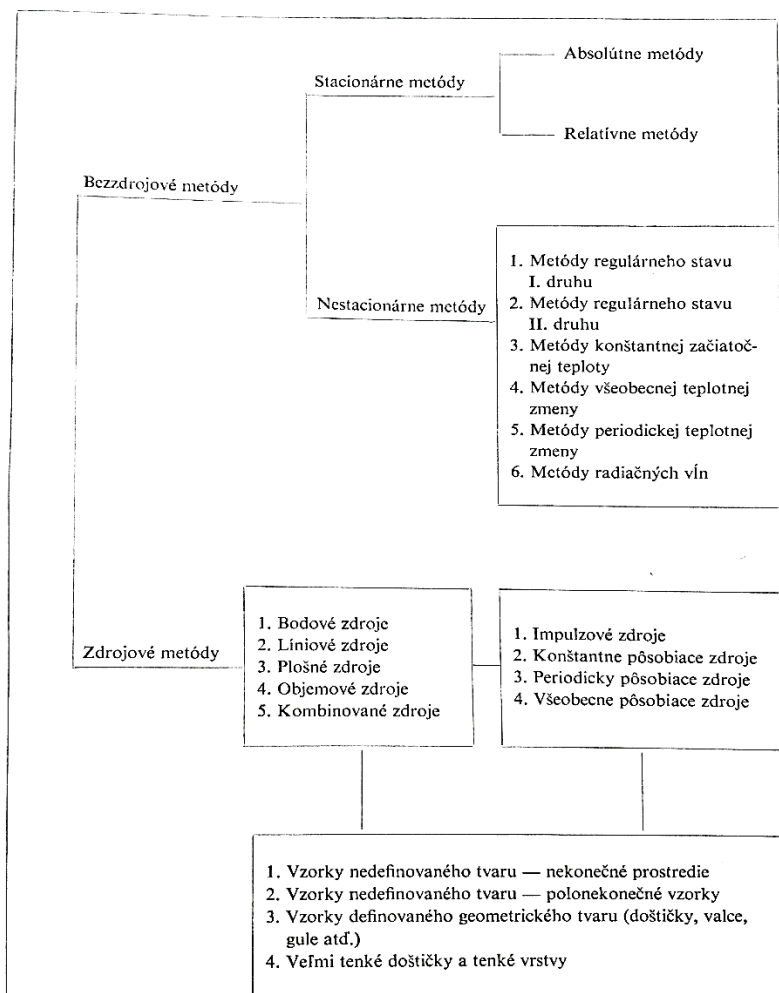
Krempaský (Krempaský, 1969) uvádí, že „základem všech metod měření termofyzikálních veličin je znalost rozložení teploty ve vzorku“. Toto rozložení je možné při zadaných podmínkách dopředu vypočítat, použitím diferenciální rovnice (14) respektive (15). Hlavním parametrem je působení a tvar tepelného zdroje, od kterého se odvíjí podoba tohoto řešení. Je proto zřejmé, že veškeré měřicí metody se rozdělují podle toho, jakým způsobem se tvoří teplotní gradient ve vzorku. Tvar a působení tepelného zdroje je tedy základním kritériem klasifikace metod měření termofyzikálních veličin a dělí se do dvou skupin na:

- 1) bezzdrojové metody – jsou charakteristické tím, že v rovnici (14) se $q_0 = 0$. Zde se teplota vzorku reguluje stykem s jiným prostředím či látkou, jenž má úlohu nekonečného zásobníku. Dále se bezzdrojové metody dělí na stacionární a nestacionární. U stacionárních se časová derivace teploty rovná nule a naopak u nestacionárních metod je tato veličina nerovná nule. U prvního z dvojice se čeká na ustálený stav ve měření, v druhém případě se teplota měří v přechodovém stavu. Teplotní vodivost a se může měřit pouze metodou nestacionární, ovšem tepelnou vodivost λ se dá zjistit oběma způsoby.
- 2) zdrojové metody – jsou charakteristické tím, že v rovnici (14) se $q_0 \neq 0$. Zde se teplo do vzorku či na jeho povrch dostává nezanedbatelným vnějším tepelným zdrojem, jenž má nenulový výkon. Zdrojové metody je možné dále rozdělovat na menší skupiny:

- podle tvaru působícího zdroje,
- podle časového průběhu tepelného příkonu zdroje,
- podle tvaru měřeného vzorku.

Tyto tři uvedené činitele je možno kombinovat, takže nakonec vzniká velký počet různých variací. Problematika se zde ještě rozrůstá, protože u každé z variací platí rozdílné vztahy. (Krempaský, 1969) (Štefková, 2012) (Kubičár, 1988)

Další rozdělení je možné vidět níže (obr. 5).



Obr. 5 Rozdělení měřících metod termofyzikálních veličin (Krempaský, 1969)

2.5 Metoda horkého drátu

Metoda horkého drátu (hot wire method) patří mezi metody měření termofyzikálních veličin, které jsou zdrojové, nestacionární. U této metody je zdrojem tepla konstantně působící liniový zdroj. Dá se použít pro měření pevných, kapalných i plyných látek, zjišťovanou veličinou je zde tepelná vodivost, dále také teplotní vodivost a tepelná kapacita. Mezi její výhody patří, že je rychlá, nevyžaduje složitou aparaturu a je relativně přesná.

Princip metody horkého drátu je založen na měření nárůstu teploty v předem definované vzdálenosti od lineárního tepelného zdroje, který je působící konstantním výkonem na jednotku délky v objemu měřeného materiálu. Výsledný koeficient tepelné vodivosti λ se pak vypočte porovnáním měřené časové vzdálenosti tepelného nárůstu a jeho vypočtenou teoretickou hodnotou. Matematický ideální model předpokládá nekonečně dlouhý liniový zdroj tepla (horký drát), který je obklopen homogenním, nekonečným a izotropním prostředím s počáteční teplotou T_0 . Když pak začne působit tepelný zdroj se stálým výkonem na jednotku délky, v materiálu začne vznikat radiální tepelný tok. Teplota pak bude narůstat v závislosti na času v určité vzdálenosti přesně podle rovnice níže.

$$\frac{dT}{d \ln t} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \exp\left(-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad (16)$$

kde T – teplota (K),

t – čas (s),

q – tepelný výkon,

λ – tepelná vodivost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

r – absolutní hodnota polohového vektoru,

a – kolmá vzdálenost indikátoru od liniového zdroje, velikost příslušné souřadnice.

Integrací rovnice pak dostáváme tvar:

$$T(r, t) = T_0 - \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (17)$$

kde:

$$-Ei\left(-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) = -Ei(-u) \quad (18)$$

je funkcí nazývanou exponenciálním integrálem, ta je definovaná vztahem:

$$-Ei(-u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (19)$$

Tuto funkci exponenciálního integrálu pak můžeme aproximovat, pro hodnoty argumentu $u < 0,1$ výrazem:

$$-Ei(-u) = -\ln u - 0,577 \quad (20)$$

Tuto rovnici dosadíme do rovnice (17) s ohledem na rovnici (18), poté dostaneme tvar:

$$T(r, t)T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left(\ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r^2} - 0,577 \right) \quad (21)$$

nebo také jinak:

$$\Delta T = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{C \cdot r^2} \quad (22)$$

kde ΔT – přírůstek teploty (K),

$C = \exp(\gamma)$,

γ – Eulerova konstanta.

Teplotní a tepelnou závislost pak můžeme vypočítat z lineární závislosti přírůstku teploty od logaritmu času $\ln t$.

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot A} \quad (23)$$

$$a = \frac{C \cdot r^2}{4} \exp\left(\frac{B}{A}\right) \quad (24)$$

kde A, B – koeficienty přímky $\Delta T = A + B \ln t$.

Při odvozování těchto rovnic se předpokládá ideální, liniový, nekonečně dlouhý zdroj horkého drátu působícího v nekonečném prostředí. V reálném experimentu, podle (Labudová, 1999) se

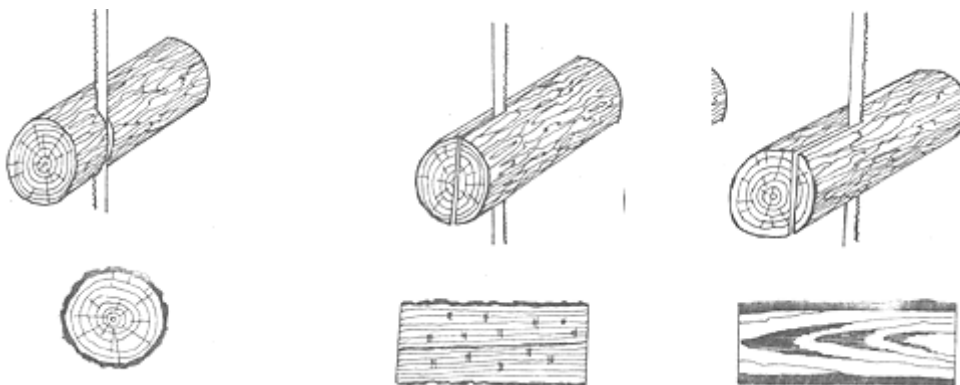
při použití horkého drátu konečných rozměrů a reálného vzorku dochází k rozdílným hodnotám mezi naměřenými veličinami a teoreticky předpokládanými. Tyto rozdíly, jsou v první části, kde dochází k nelinearitě závislosti přírůstku teploty na logaritmu času způsobeny hlavně rozdílnou tepelnou kapacitou horkého drátu a měřeného materiálu. V druhé části jsou deformace od experimentální křivky způsobeny konečným rozměrem měřeného vzorku a dále ve střední části je lineární závislost teoretická rovnoběžná s experimentální křivkou, protože zde platí rovnice (23) pro tepelnou vodivost. (Krempaský, 1969) (BOŽIKOVÁ, 2016) (De Boer, 1980) (Klunavec, 1977) (Kubičár, 1990)

3. Dřevo a jeho vlastnosti

3.1 Stavba dřeva

Dřevo vzniká činností malé vrstvy živých buněk, které působí mezi dřevem a kůrou a nazývá se kambium. Buňky kambia se dělí na vnitřní, které vytvářejí buňky dřeva a na vnější, které zas budují buňky kůry. Vnitřní buňky kambia pracují rychleji než ty vnější a proto se dřevo vytváří mnohem rychleji než kůra. V podnebních podmínkách střední Evropy vždy na jaře začne kambium pracovat a na podzim činnost ustane, proto u dřev vznikají letokruhy. Jarní, světlejší dřevo slouží hlavně k dopravě vody a tmavší, letní má funkci mechanickou. Anatomie dřeva je jednou z částí lesnické botaniky. Anatomii neboli stavbu dřeva hodnotíme podle znaků, které se dělí na makroskopické (ty které jsou vidět pouhým okem, či lupou) a mikroskopické (možné vidět pouze mikroskopem se zvětšením 10-100x). Pro zhodnocení anatomie dřeva makroskopickými znaky se používají tři řezy:

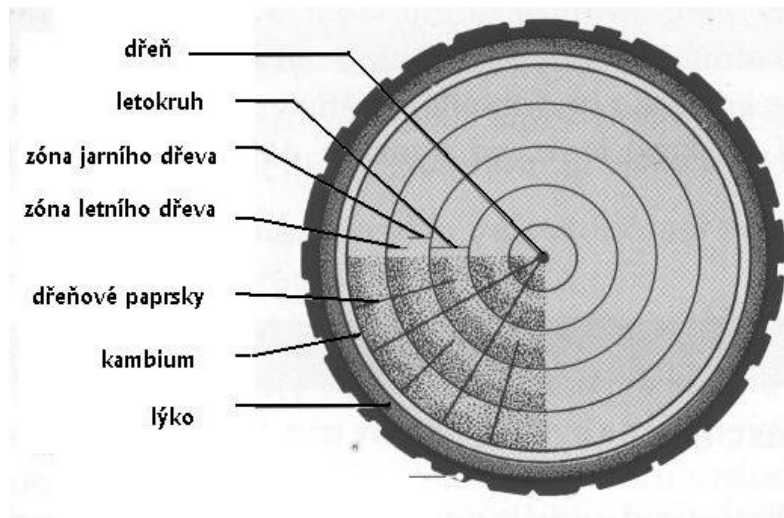
- 1) řez příčný (transverzální)
- 2) řez podélný poloměrový (radiální)
- 3) řez tečnový (tangenciální).



Obr. 6 Řez příčný, podélný poloměrový a tečnový (Brumovský, 1991)

Pro pozorování makroskopických znaků je nejužitečnější řez příčný (transverzální), zde je možno pozorovat, jak vidíme na obr. 11: dřev, dřevo bělové (běl), jádrové a zdravé (jádro), suky, letokruhy, dřevové paprsky, pryskyřičné kanálky, cévy atd. (Požgaj, 1993) (Šlezingerová, 2002)

Z makroskopického pohledu je třeba zdůraznit, že základním prvkem ve dřevě je buňka. Ve dřevě je možno se setkat z několika druhy buněk, lišící se svojí funkcí, i tvarem. Pletiva je skupina buněk, které plní stejnou funkci a rovněž se shodují svojí stavbou těla. Dělíme je na pletiva mechanická, vodivá a zásobní. Pro praxi (například množství vody v čerstvě poraženém stromu) mají zásadní význam poznatky o buněčných stěnách. (Požgaj, 1993) (Šlezingerová, 2002) (Matovič, 1992)



Obr. 7 Prvky kmene v příčném řezu (Hájek, 1997)

3.2 Přenos tepla ve dřevě

Teplo se v jakémkoliv materiálu přenáší pomocí vnitřního pohybu molekul, a to v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti a také kinetické energii. Pohyb molekul je intenzivnější u pevných látek, než u kapalných, protože se teplo přenáší vzájemnými srážkami molekul, které jsou u kapalin mnohem více vzájemně vzdáleny, než u pevných látek, kde je srážek podstatně více. Jestliže známe děje spojené s přenosem tepla ve dřevě, můžeme také předvídat rychlost teplotního spádu a určovat rozložení teplot v tělese. V dřevní hmotě se mohou objevovat všechny tři známé přenosy tepla:

- a) Vedení tepla (kondukce) – u této formy přenosu energie se teplo šíří hmotným prostředím, přičemž jeho elementy zůstávají v klidu.
- b) Proudění tepla (konvekce) – zde se energie také přenáší hmotným prostředím, ovšem elementy konají translační pohyb.
- c) Sálání tepla (radiace) – je to schopnost, při kterém těleso vyzařuje a přijímá energii formou záření, ale u této formy přenosu tepla není potřebné hmotné formy prostředí.

Konvekce a radiace se na celkovém přenosu tepla ve dřevě obvykle podílejí jen minimálně a tudíž se celý proces často popisuje zjednodušeně pouze jako vedení tepla (kondukce). (Gandelová, 2009) (Štefková, 2012)

Ve dřevě se vedení tepla popisuje Fourierovým zákonem, který je obdobný jako Darcyho a I. Fickův zákon popisující pohyb vody ve dřevě. Níže popsaná integrovaná rovnice je nejdůležitějším tvarem Fourierova zákona:

$$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{dT}{dl} \quad (5)$$

kde Q – množství tepla (J),

S – činná plocha tělesa (m²),

t – čas (s),

λ – koeficient tepelné vodivosti (W·m⁻¹·K⁻¹),

dT – teplotní rozdíl na koncích tělesa (K),

dl – délka tělesa (m). (Požgaj, 1993) (Regináč, 1990)

druh dřeva	T (°C)	w (%)	ρ (kg m ⁻³)	c (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	10 ⁷ α _a (m ² s ⁻¹)
smrk - l	20	12	390-467	1,55-2,28	0,229-0,339	3,77-4,95
- r	20	12	390-467	1,55-2,28	0,133-0,157	1,56-1,74
- t	20	12	390-467	1,55-2,28	0,113-0,132	1,49-1,52
javor - l	20	10	608	1,92	0,300	2,43
- r	20	10	608	1,92	0,180	1,40
- t	20	10	608	1,92	0,180	1,38
buk	60		700	2,34	0,248	1,51
jasan - l	20	10	702	1,92	0,360	2,43
- r	20	10	702	1,92	0,180	1,20
- t	20	10	702	1,92	0,170	1,16

Obr. 8 Příklady tepelně fyzikálních charakteristik vybraných druhů dřev (Regináč, 1990)

3.3 Vlhkost dřeva

Vlhkostí dřeva se rozumí takové množství vody, které je uloženo ve dřevě. Množství vody ve dřevě má velký význam na fyzikální a především pak mechanické vlastnosti. Ideální vlastnosti má dřevo v rozmezí 6-25% vlhkosti. Kromě toho, se může při větší vlhkosti častěji vyskytovat problém s plísněmi a houbami. Rozeznáváme dva druhy vlhkosti, vlhkost absolutní a vlhkost relativní. Vyjádřením poměru hmotnosti vody vůči hmotnosti absolutně suchého dřeva mluvíme o absolutní vlhkosti, kdežto u relativní vlhkosti dřeva vyjadřujeme poměr hmotnosti vody vůči hmotnosti vlhkého dřeva. Obě tyto veličiny nejčastěji vyjadřujeme v procentech a dají se spočítat podle následujících vztahů:

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

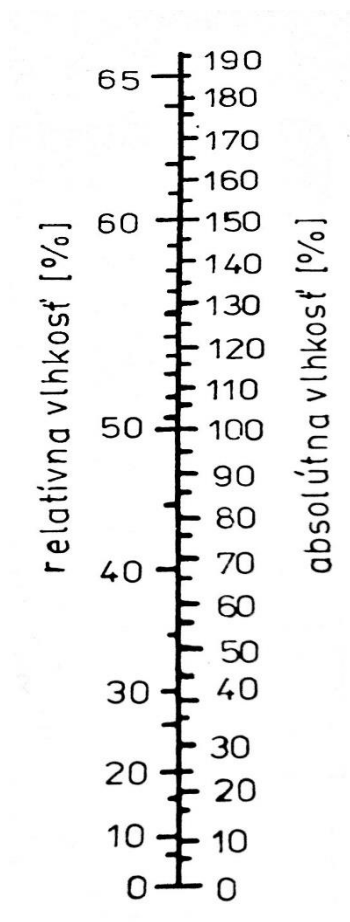
$$w_r = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

kde w_a – absolutní vlhkost (kg),
 w_r – relativní vlhkost (kg),
 m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu (kg),
 m_w – hmotnost dřeva při vlhkosti w (kg).

Přepočet absolutní a relativní vlhkosti dřeva je popsán rovnicemi níže a na obr. 9 je znázorněn vzájemný vztah těchto veličin.

$$w_a = \frac{100 \cdot w_r}{100 - w_r} \quad (8)$$

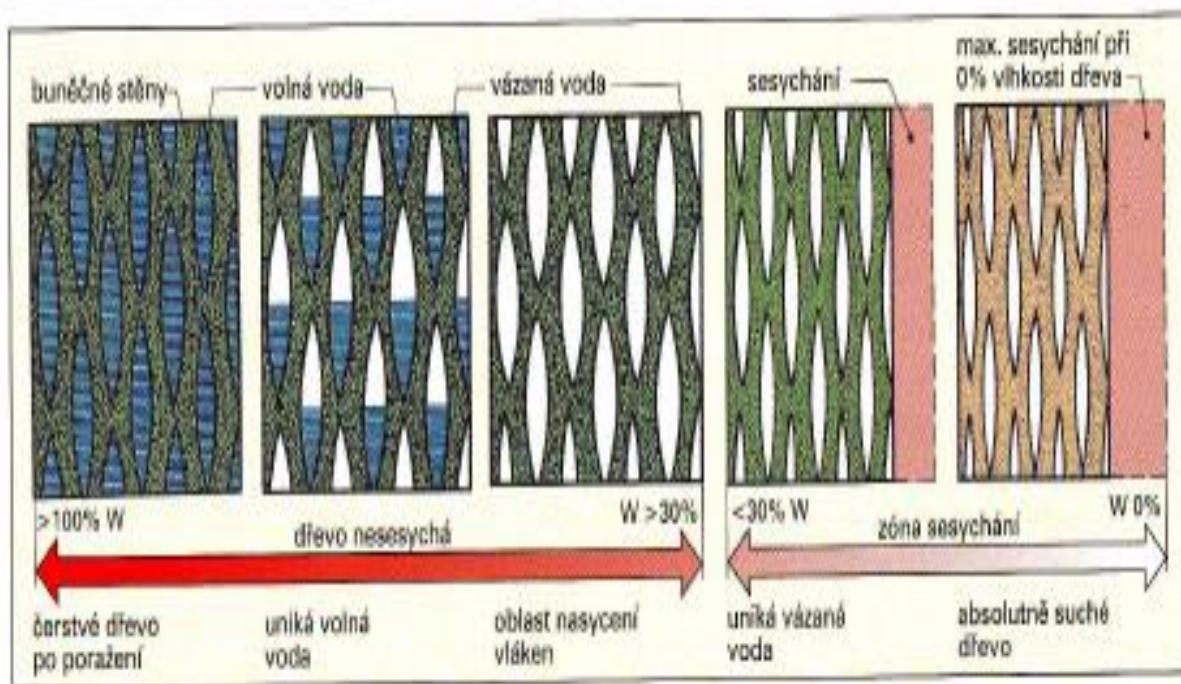
$$w_r = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a} \quad (9)$$



Obr. 9 Závislost relativní na absolutní vlhkosti (Požgaj, 1993)

Z hlediska uložení vody ve dřevě je možno rozdělit na vodu volnou a vodu vázanou. Volná voda, nebo také kapilární vyplňuje ve dřevě hlavně buněčné dutiny, kapiláry cév a mezibuněčné prostory, tato voda je vázaná kapilárními silami. Množství této vody se pohybuje od bodu nasycení vláken až po úplné nasycení dřeva vodou, pak hodnoty vlhkosti mohou být i vyšší než 100%. Dřevo dále obsahuje vodu, která je vázaná v buněčných blánách, a také v mezimicelárních prostorech, nazývá se hygroskopická neboli vázaná. Rozmezí vlhkosti u

vody vázané je od 0% až do bodu nasycení vláken, což bývá průměrně u našich dřevin kolem 30%. Bod nasycení vláken je definován jako stav dřeva, ve kterém už je přítomna pouze voda vázaná. Takže buněčné stěny jsou nasyceny vodou, ale v dutinách buněk se již nenachází žádná voda v kapalném skupenství. Na obr. 10 je vidět postup odpařování vody ze dřeva. Nejprve se odpařuje volná voda, která je obsažena mezi buněčnými stěnami, tento proces trvá až do bodu nasycení vláken, poté začne dřevo sesychat a ztrácet vodu z buněčných stěn. (Požgaj, 1993) (Babiak, 1990) (Skaar, 1988)



Obr. 10 Princip odpařování vody (Krupalová, 2004)

3.4 Hustota dřeva

Hustota dřeva udává hmotnost objemové jednotky, jejími nejčastějšími jednotkami jsou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tato vlastnost nabývá na důležitosti především při mechanickém a chemickém zpracování dřeva, kde se ve velké míře klade důraz na hmotnostní množství dřevěné hmoty u konkrétní objemové jednotky. Dále uvažujeme tři hlavní druhy hustoty dřeva: hustota dřevní substance, hustota dřeva a redukovaná hustota dřeva. Hustota dřevní substance se vyjadřuje jako poměr hmotnosti dřevěné substance m a jeho příslušného objemu V .

$$\rho_s = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}] \quad (10)$$

Dřevěnou substancí se rozumí hmota buňkových stěn bez pórů. Tato hustota se mění jen minimálně, podle toho nakolik je rozdílné chemické složení dřeva. Rozmezí se pohybuje od 1490 až 1560 kg.m⁻³. Hustota dřeva uvažuje při určité vlhkosti hmotnostní jednotkový objem dřeva. Vypočítává se jako podíl hmotnosti m_w a objemu V_w dřeva při té samé vlhkosti.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^{-3}] \quad (11)$$

Pro porovnávání výsledků při různých teoretických výpočtech se uvažuje s hustotou v absolutně suchém stavu ρ₀. Platí vztah:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} [kg \cdot m^{-3}] \quad (12)$$

Redukovanou hustotu dřeva je možno definovat jako podíl hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu m₀ k objemu při určité vlhkosti V_w. Podíl se vypočte, jako:

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} [kg \cdot m^{-3}] \quad (13)$$

Tato hustota nabývá na významu, když se jedná o čerstvé dřevě tj. při pěstování, těžbě atd. Udává, kolik suché dřevěné hmoty se nachází v maximálně vlhkém (či čerstvém) dřevě. (Požgaj, 1993) (Horáček, 1998) (Regináč, 1990)

3.5 Popis měřených druhů dřeva

3.5.1 Smrk (Picea)

Díky lesnické kultivaci je dnes Smrk ztepilý v České republice nejběžnější jehličnatým stromem a nahradil tak dříve mnohem rozšířenější jedli. Preferuje vlhké půdy v chladnějších oblastech. Dospělí strom dosahuje výšky až do padesáti metrů. Jeho kořeny jsou ale často mělké a proto mu mnohokrát hrozí při silném větru vyvrácení. Velké monokultury bývají mnohdy napadeny kůrovcem, červenou hnilobou a dalšími škodlivými činiteli. Zdravý a živý smrk, který se vyskytuje ve svém přirozeném prostředí (jako třeba na Šumavě) skvěle čistí vzduch,

když denně dokáže uvolnit velké množství kyslíku. Dřevo smrku mívá smetanově bílou až nahnědlou barvu, kde výraznou kresbu tvoří letokruhy. Jádro většinou není barevně odděleno, a pokud ano a vyskytuje se tmavší zahnědnutí, jedná se o prvotní stádia hniloby. Smrkové dřevo je sice měkké, ale zato houževnaté, také poměrně pevné a pružné. V tesařství najde široké použití, například se používá na trámy, krokve i bednění. V truhlářství na takzvaný selský nábytek. Dále nachází uplatnění ve stavebnictví nebo také jako topné dřevo. Smrkové dřevo je také důležitou surovinou pro papírenský průmysl. (Patričný, 2005)



Obr. 11 Příčný řez smrku (Patričný, 2005)

3.5.2 Dub (Quercus)

V České republice je nejvíce rozšířený křemelák neboli dub letní (*Quercus robur*). Vyskytuje se především v nížinách a lužních lesích. Dub zimní (*Quercus petraea*) neboli drnák roste hlavně v nižších horských oblastech. Duby jsou přirozeným evropským stromem s dlouholetou tradicí, jejichž mýtné stáří je často přes sto let. Dub letní je často mohutný strom se silnými větvemi dosahující výšky až 45 metrů. Dřevo dubu bývá jedno z nejžádanějších a už odedávna je vysoce ceněno. Má úzkou světlou bělouš a široké hnědě zbarvené jádro. Na tečném řezu se objevují výrazné přeříznuté dřevné paprsky, kterými je dub charakteristický. Mezi základní vlastnosti dubového dřeva patří pevnost, tvrdost, trvanlivost a houževnatost. Ze stromů rostoucích u nás má dřevo dubu nejlepší odolnost vůči povětrnostním vlivům, včetně střídání vlhka a sucha. Při dlouhodobém výskytu dřeva pod vodou ještě ztvrdne a změní barvu téměř na černou. Dříve se z něj vyráběly hamry, mlýnská kola, sudy, piloty k mostům a lávkám a dodnes je velmi oblíben v nábytkářství. (Patričný, 2005)



Obr. 12 Příčný řez dubu (Patričný, 2005)

3.5.3 Jasan (Fraxinus)

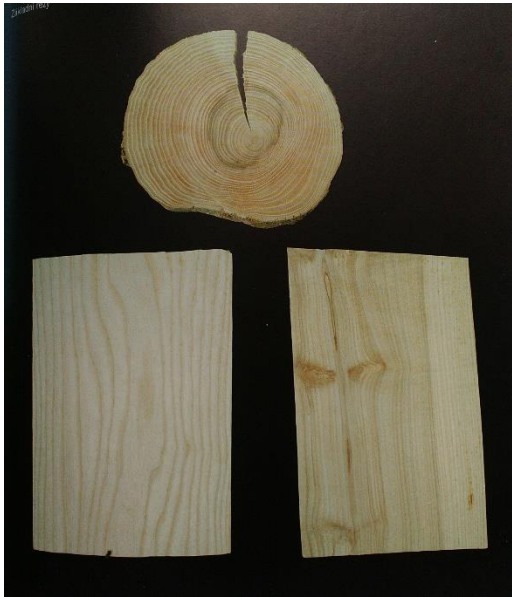
Jasan je štíhlý opadavý strom s dlouhým, většinou rovným kmenem, dosahující výšky až 40 metrů. Náš nejběžnější jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*) je rozšířen téměř po celé Evropě a dále na východě až po Kavkaz. Tento strom dává přednost hlubokým vlhkým půdám, ale může se vyskytovat i na skalách. Dřevo jasanu je pevné, houževnaté, tvrdé a u nás mezi dřevinami nejpružnější. Proto se často používal na výrobu lyží, luků, saní, topůrek a madel. Dodnes se z něho zhotovuje tělocvičné nářadí. Běl u jeho dřeva je sametově bílá, u mladých stromů široká, u starších užší. Jádru je často nepravidelně ohraničené s barvou tmavohnědou. Na starém nábytku jsou často dominantním prvkem výrazné letokruhy, které získávají nazlátlý lesk. Jasan se velmi dobře opracovává a soustruží či leští. Rovněž lepení je u tohoto dřeva bezproblémové. (Patričný, 2005)



Obr. 13 Příčný řez jasanu (Patříčný, 2005)

3.5.4 Javor (Acer)

Rod javorů je velmi početný a také rozšířený. Jen v České republice se vyskytují tři a pravděpodobně i čtyři druhy. V celém světě je pak dohromady asi 110 druhů těchto stromů. U nás nejrozšířenějším je javor mléč (*Acer platanoides*), po něm v horských oblastech javor klen (*Acer pseudoplatanus*) a dále nížinný javor polní (*Acer campestre*) neboli babyka. Mléč byl pojmenován podle bílé tekutiny, která po odtržení vytéká z konce listů a květů. Bývá se svou výškou 15-25m z našich javorů nejvyšší. Jeho kůra je nejprve hladká, v pozdějším věku popraská a získá tmavě šedohnědou barvu. Hlavním poznávacím znakem javorů jsou tvary listů. Dřevo javorů patří mezi naše vůbec nejsvětlejší, je smetanově bílé, do krémové. V okolí dřene nebo suků se mohou někdy objevovat černohnědé pruhy a skvrny. Dřevo je tvrdé, jednotvárné a lesklé, snadno se opracovává, moří či přijímá lepidlo. Někdy se ještě více vyběluje peroxidem a čpavkem. Jeho použití je hlavně v nábytkářství či například na zadní desky a luby houslí, kytar nebo viol. (Patříčný, 2005)



Obr. 14 Příčný řez javoru (Patričný, 2005)

4. Cíle práce

V první části této diplomové práce je cílem v literární rešerši zpracovat možnosti způsobů měření termofyzikálních veličin. Dalším cílem je sledovat změny tepelné vodivosti dřevěných materiálů v průběhu snižování jejich vlhkosti a doplnit rešeršní část práce potřebnými informacemi k pochopení experimentální části.

5. Metodika práce

Po opracování a povrchové úpravě surových dřev následovalo první měření, kde byla vždy nejprve změřena pětkrát za sebou hmotnost vzorku. Ihned poté byla na povrch příčného řezu vzorku umístěna příslušná plošná sonda a začalo se měřit. Zároveň při měření byla zjišťována pomocí přístroje Ahlborn Almeno 2890-9 vzdušná teplota a vlhkost. Po šesti měřeních konaných s odstupem týdne až měsíce, v době kdy se již hmotnost vzorků přestala snižovat (a někdy se dokonce začala mírně zvyšovat), byla u všech vzorků změřena vlhkost pomocí měřicího přístroje testo 606-2 a zpětně poté dopočítána, pomocí vzorce (6), resp. (7) vlhkost pro všechny měření v různých dnech. Dále byly nechány vzorky upravit na požadovaný tvar, aby se z ní mohly odečíst rozměry a následně po zvážení také spočítat hustotu.

6. Materiál a metody

6.1 Měření vzorky

V této diplomové práci vycházím ze stanovování termofyzikálních vlastností u čtyř druhů dřev: smrku ztepilého, dubu letního, jasanu ztepilého a javoru mléče. Všechny tyto stromy jsou u nás běžné a často jsou těženy pro různé využití. Pro každý druh stromu byla vybrána sada tří vzorků k následnému měření. Každý z nich pochází z jiného stromu s rozdílnými vlastnostmi. Byly vybrány tři rozdílné vzorky: jeden je například ze severního svahu, druhý z jižního, jeden z prostředku porostu, druhý z kraje lesa, jeden mladý strom, druhý starý atd. Cílem bylo vybrat stromy pro vzorky s co možná největšími rozdíly fyzikálních i termofyzikálních vlastností.

- Smrk, vzorek 1 – tento strom byl pokácen dne 28. 6. 2015, vzorek byl zhotoven z mladého stromu, který stál samostatně mimo les,
- smrk, vzorek 2 – tento strom byl pokácen dne 16. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z mladého stromu, stojícího na okraji smrkového lesa,
- smrk, vzorek 3 – tento strom byl pokácen dne 10. 7. 2015, vzorek byl zhotoven ze staršího stromu, který stál uprostřed hustého smrkového lesa,
- dub, vzorek 1 – tento strom byl pokácen dne 1. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve statného stromu, který stál na kraji lesa,
- dub, vzorek 2 – tento strom byl pokácen dne 15. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve středně velkého stromu, který stál ve smíšeném lese,
- dub, vzorek 3 – tento strom byl pokácen dne 16. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z kmene malého stromku, který stál na kraji lesa,
- jasan, vzorek 1 – tento strom byl pokácen dne 3. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve vzrostlého stromu, který stál ve smíšeném lese
- jasan, vzorek 2 – tento strom byl pokácen dne 15. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve vzrostlého stromu, který stál na okraji lesa
- jasan, vzorek 3 – tento strom byl pokácen dne 15. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z kmene mladého stromku, v nově vznikajícím lese
- javor, vzorek 1 – tento strom byl pokácen dne 3. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve vzrostlého stromu, stojícího uprostřed smíšeného lesa,
- javor, vzorek 2 – tento strom byl pokácen dne 15. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z větve statného stromu, který stál na kraji lesa,

- javor, vzorek 3 – tento strom byl pokácen dne 15. 7. 2015, vzorek byl zhotoven z kmene mladšího stromu, který stál uprostřed lesa.

6.2 Zařízení na měření termofyzikálních vlastností ISOMET

ISOMET 2104 je měřicí přístroj na určování termofyzikálních vlastností, jeho výhodou je kompaktnost a malé rozměry. Mezi měřené veličiny patří:

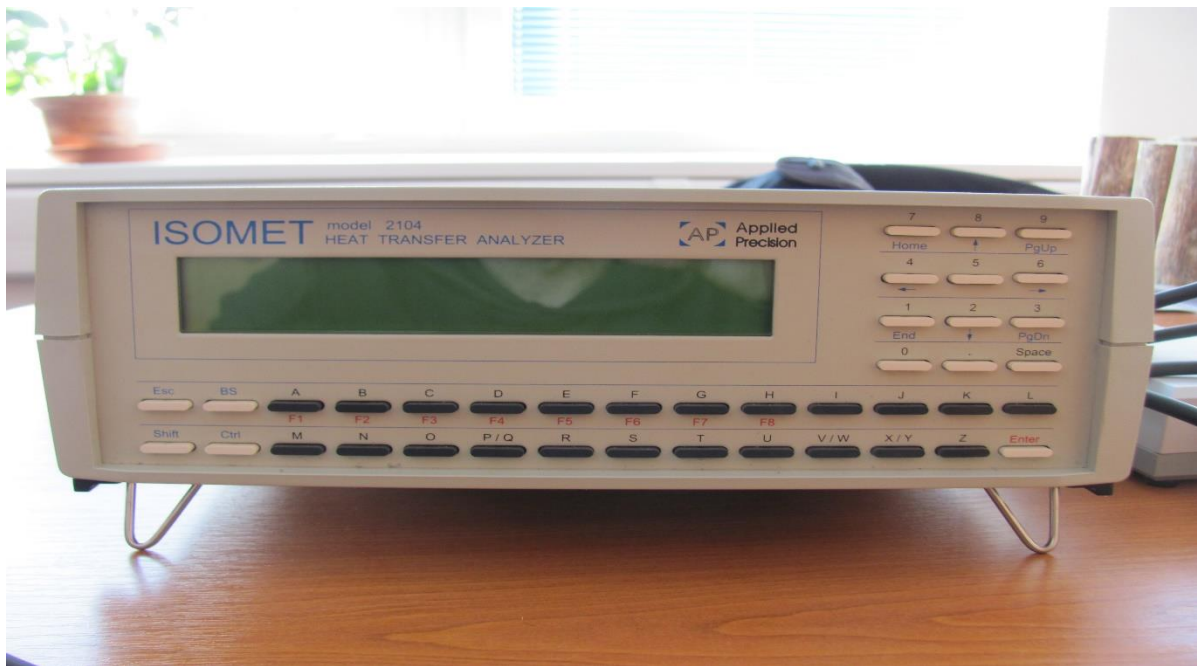
- součinitel tepelné vodivosti λ (W/m.K),
- součinitel teplotní vodivosti a (m²/s),
- měrná objemová tepelná kapacita c_p (J/m³.K).

Všechny uvedené veličiny se dají měřit buďto jehlovými nebo plošnými sondami. Tento přístroj na měření využívá dynamickou metodu, kde dobu měření je možné zkrátit na 10-16 minut. Zabudovaný čtyřřádkový displej umožňuje uživatelsky přívětivé ovládání a odečítání výsledků, menu je jednoduché a intuitivní. Pro kontrolu a re kalibraci měřících sond se mohou použít pomocné referenční vzorky. ISOMET (obr. 14 a obr. 15) je řízen procesorem, který umožňuje uložení výsledků, ale i jejich přenos do PC a další dodatečné spravování. Uplatnění tohoto zařízení je především měření termofyzikálních vlastností materiálů v oblastech stavebnictví, dřevařského, chemického a gumárenského průmyslu či geologii, dále také u vývoje a výroby tepelně izolačních materiálů, gumárenských výrobků nebo plastů. Také se používá pro vyhodnocování vlhkosti materiálů a to především u izolačních materiálů, dřeva atd.



Obr. 15 ISOMET 2104

Měření přístroje ISOMET 2104 je založeno na analýze teplotní odezvy zkoumaného vzorku od impulzů tepelného toku. Tento tepelný tok je vyvolán elektrickým odporovým ohříváčem, který je v sondě, v přímém styku se zkoumaným materiálem. Vyhodnocení hodnot termofyzikálních veličin je založeno na periodickém vyhodnocení záznamů teploty jako funkce času.



Obr. 16 ISOMET 2104 – čelní pohled

Díky širokému rozsahu měření přístroje, umožňuje ISOMET měření různorodých materiálů s velmi odlišnými vlastnostmi. Jako měřený materiál je možné zvolit vzorek pevného skupenství a to od měkké pěny až po tvrdé materiály, jako jsou oceli, či kameny. Krom toho je také možné tímto přístrojem měřit tekutiny, či suspenze a další. Proto, aby bylo dosaženo co možná nejpřesnějších výsledků, pro různé specifické materiály, vyvinuli se dva druhy měřících sond:

- jehlové sondy
- plošné sondy (obr. 16)

Plošné sondy se používají především na měření tvrdých a pevných materiálů. Plocha měřeného vzorku má mít minimálně průměr 60 mm a hloubka tohoto materiálu nejméně 10 až 15 mm v závislosti na hodnotách tepelné vodivosti. Je důležité brát v úvahu, že rovinnost materiálu má přímý vliv na konečné výsledky experimentu, čím je tepelná vodivost větší, tím větší vliv rovinnost má.



Obr. 17 Plošné sondy

Jehlové sondy jsou především použitelné na měření méně pevných materiálů, kde se v ideálním případě jehla přímo zapíchne do měřeného materiálu. Další možností je vyvrtání přesné díry a vložení jehly dovnitř. Nepřesnost vrtání děr však může mít zásadní vliv na přesnost výsledku. Je doporučováno, aby minimální hloubka materiálu obklopující jehlovou sondu byla 10 až 15 mm opět v závislosti na tepelné vodivosti. Jehla by při měření měla být celá zasunutá do měřeného materiálu a to až po rukojeť sondy, jen tak je možno dosáhnout nejlepší přesnosti měření. Oblast snímání začíná 15 mm od špičky a je dlouhá 50 mm. (Měření součinitele tepelné vodivosti pomocí měřicího zařízení HFM 436/3/1E Lambda, 2008) (BOŽIKOVÁ, 2016) (ISOMET 2104 Příručka používatele, 2007) (Yamasuea, 2002)

7. Výsledky

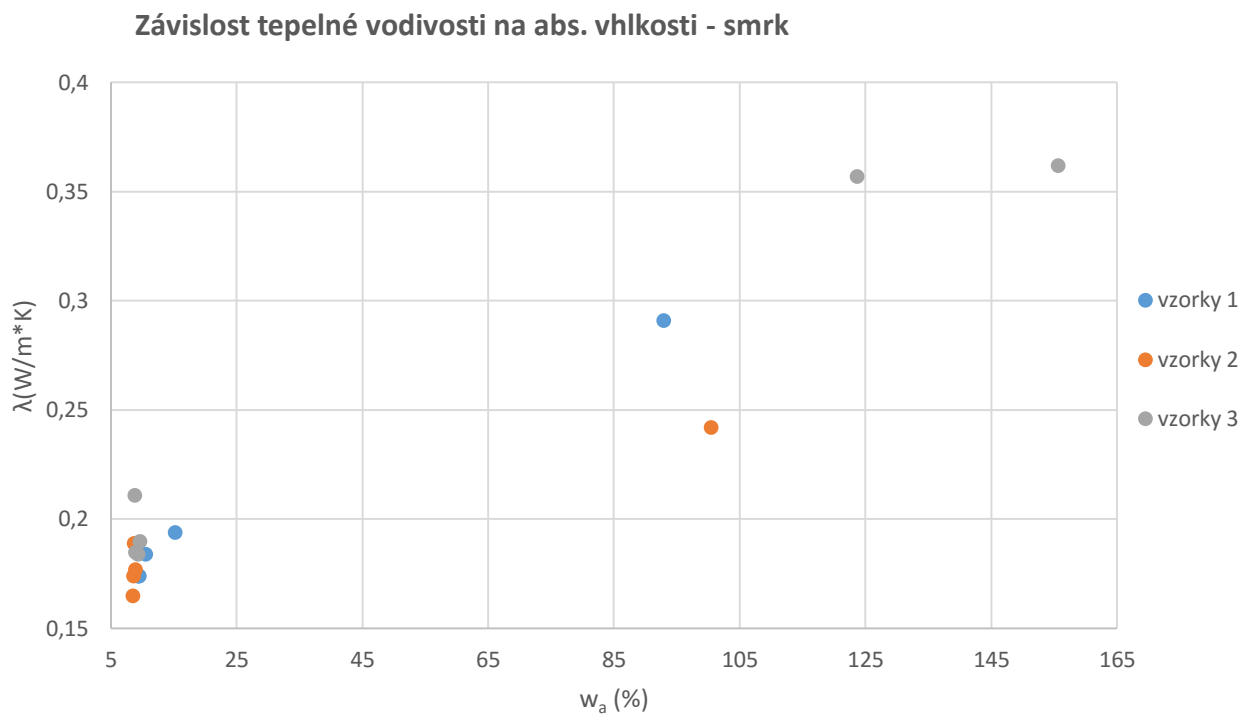
7.1 Termofyzikální závislosti u dřeva smrku

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w_r (%)	w_a (%)
Měření 9.7. 2015	896,08	0,0148	0,1216	896,27	895,93	48,16	92,88
Měření 20.7. 2015	535,32	0,0001	0,0102	535,34	535,31	13,22	15,23
Měření 30.7. 2015	513,44	0,0001	0,0089	513,45	513,43	9,52	10,52
Měření 24.8. 2015	507,65	0,0000	0,0040	507,65	507,64	8,49	9,27
Měření 1.10. 2015	508,11	0,0001	0,0075	508,12	508,10	8,57	9,37
Měření 5.11. 2015	508,73	0,0001	0,0117	508,74	508,71	8,68	9,51

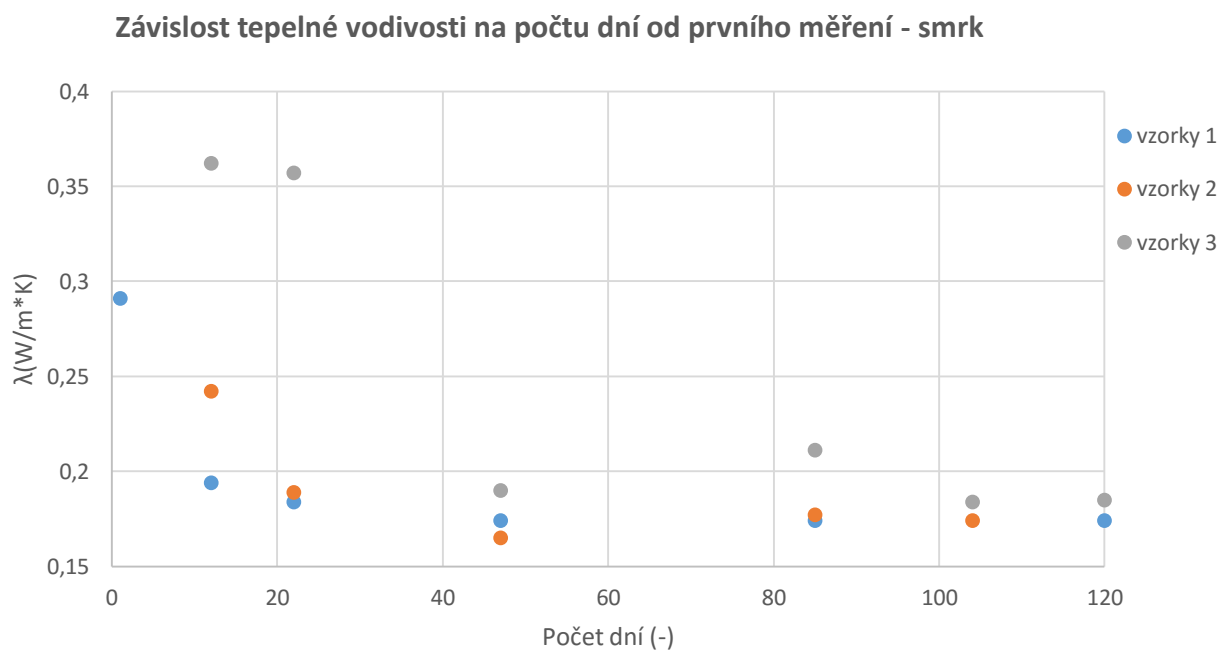
Tab. 1 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva smrku – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c_p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t_v (C°)	H (%)
Měření 9.7. 2015	26,6	0,291	1,430	0,203	32,0	34,5
Měření 20.7. 2015	30,7	0,194	0,990	0,196	30,7	32,8
Měření 30.7. 2015	28,1	0,184	0,942	0,169	27,9	28,0
Měření 24.8. 2015	28,6	0,185	0,952	0,194	27,7	41,7
Měření 1.10. 2015	26,0	0,174	0,934	0,186	24,7	33,8
Měření 5.11. 2015	24,7	0,174	0,799	0,218	24,0	37,9

Tab.2 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva smrku – druhá část

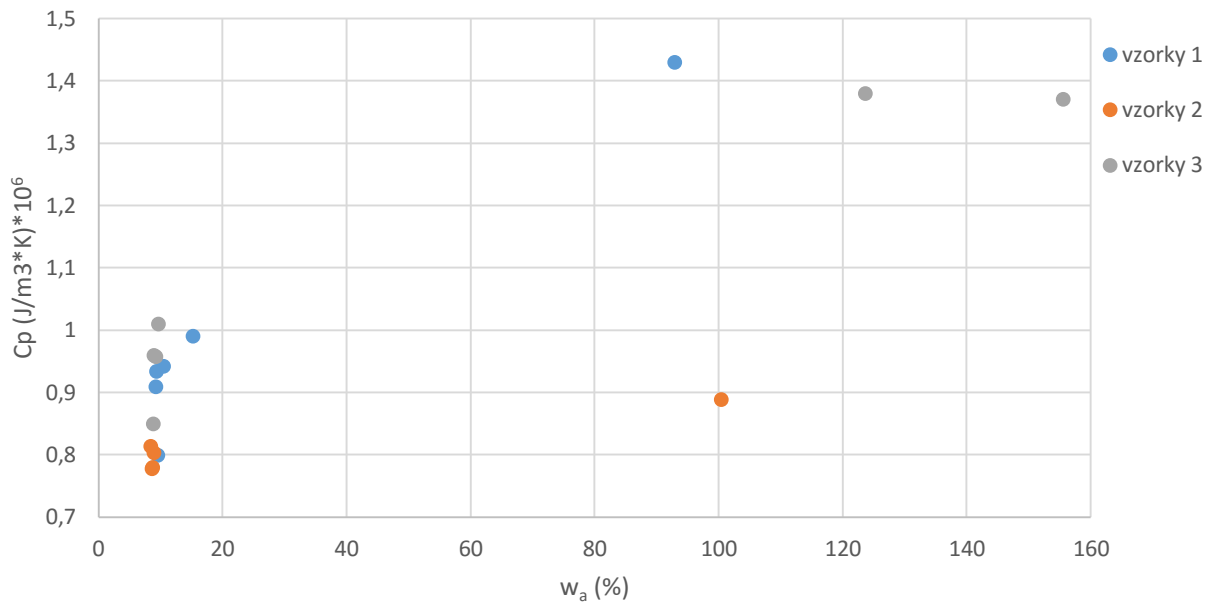


Obr. 18 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva smrku



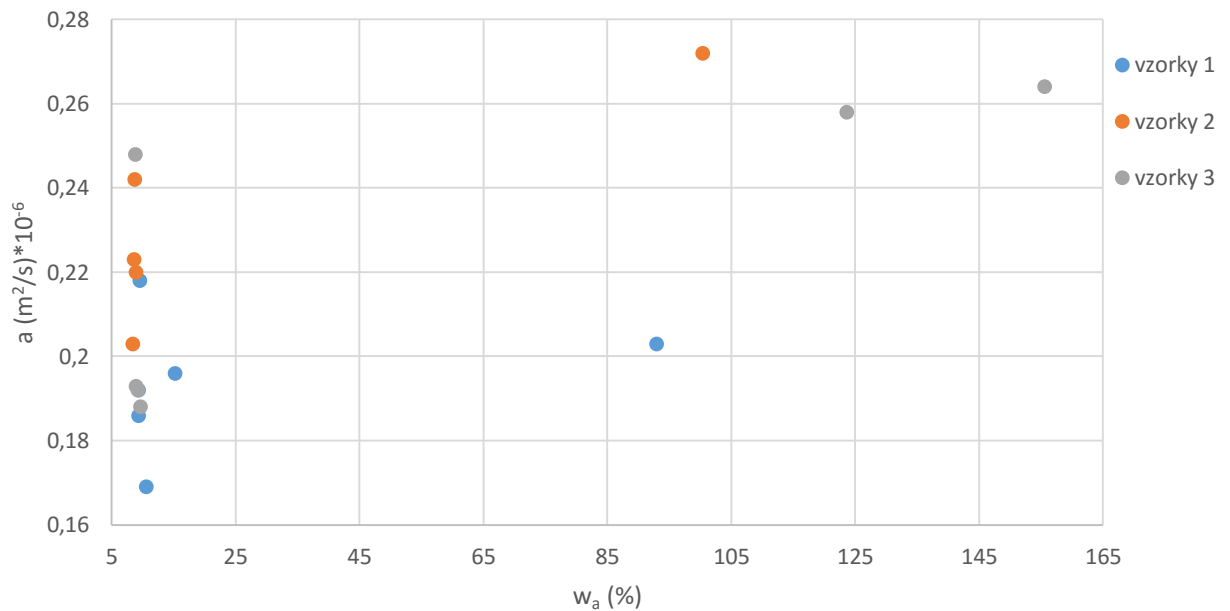
Obr. 19 Graf závislosti tepelné vodivosti na času u dřeva smrku

Závislost měrné tepelné kapacity na abs. vlhkosti - smrk



Obr. 20 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva smrku

Závislost teplotní vodivosti na abs. vlhkosti - smrk



Obr. 21 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva smrku

7.2 Termofyzikální závislosti u dřeva dubu

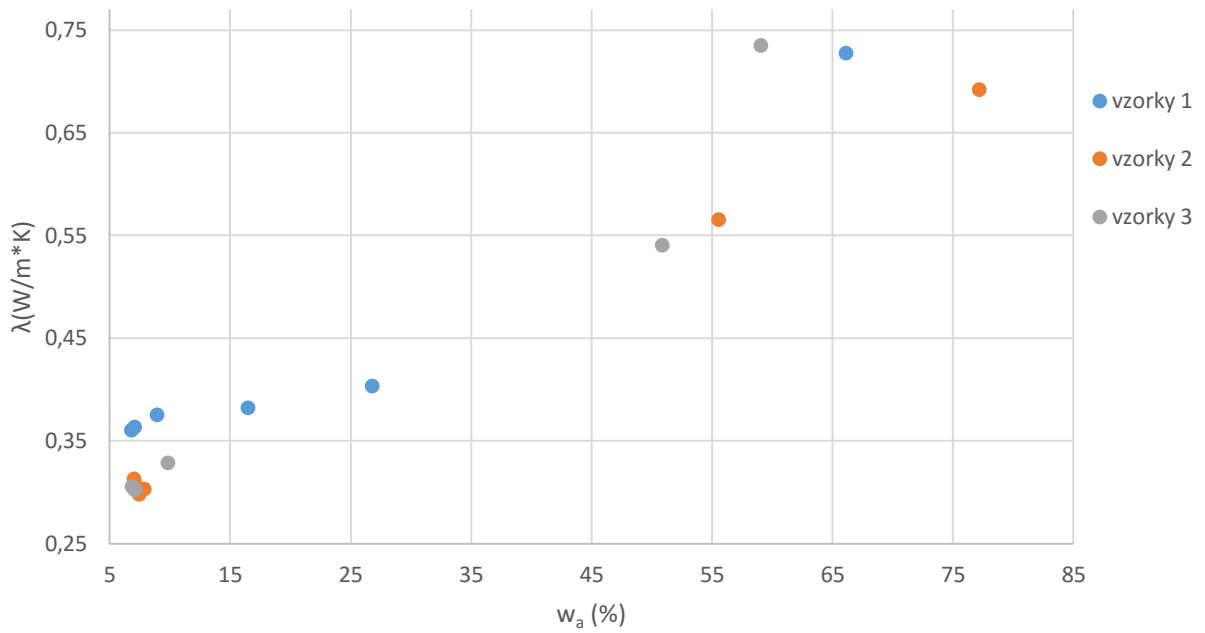
	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w_r (%)	w_a (%)
Měření 9.7. 2015	1062,44	0,0145	0,1202	1062,63	1062,28	39,79	66,09
Měření 20.7. 2015	810,83	0,0008	0,0280	810,88	810,80	21,11	26,75
Měření 30.7. 2015	745,03	0,0001	0,0117	745,05	745,02	14,14	16,47
Měření 24.8. 2015	696,77	0,0001	0,0080	696,78	696,76	8,19	8,92
Měření 1.10. 2015	684,99	0,0001	0,0075	685,00	684,98	6,61	7,08
Měření 5.11. 2015	683,28	0,0001	0,0089	683,29	683,27	6,38	6,81

Tab. 3 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva dubu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c_p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t_v (C°)	H (%)
Měření 9.7. 2015	26,6	0,727	1,630	0,445	31,7	30,8
Měření 20.7. 2015	29,9	0,403	1,490	0,270	30,5	32,7
Měření 30.7. 2015	27,4	0,382	1,470	0,259	27,4	25,5
Měření 24.8. 2015	27,6	0,375	1,480	0,253	27,5	42,3
Měření 1.10. 2015	25,8	0,363	1,460	0,249	26,2	31,5
Měření 5.11. 2015	24,4	0,360	1,470	0,244	24,4	38,7

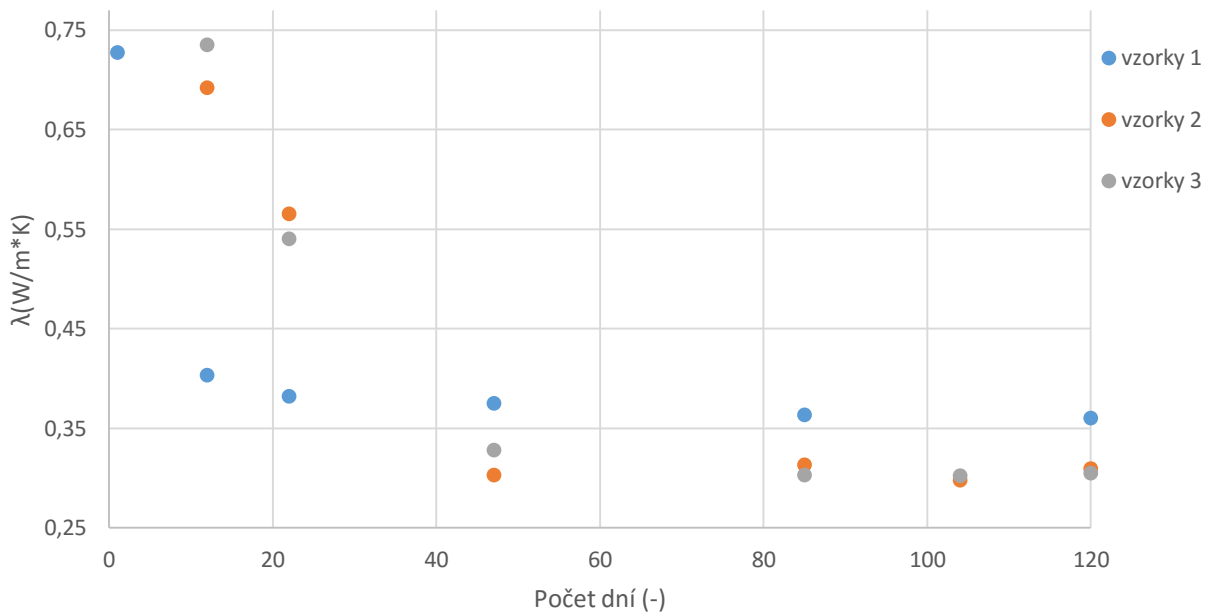
Tab. 4 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva dubu – druhá část

Závislost tepelné vodivosti na abs. vlhkosti - dub



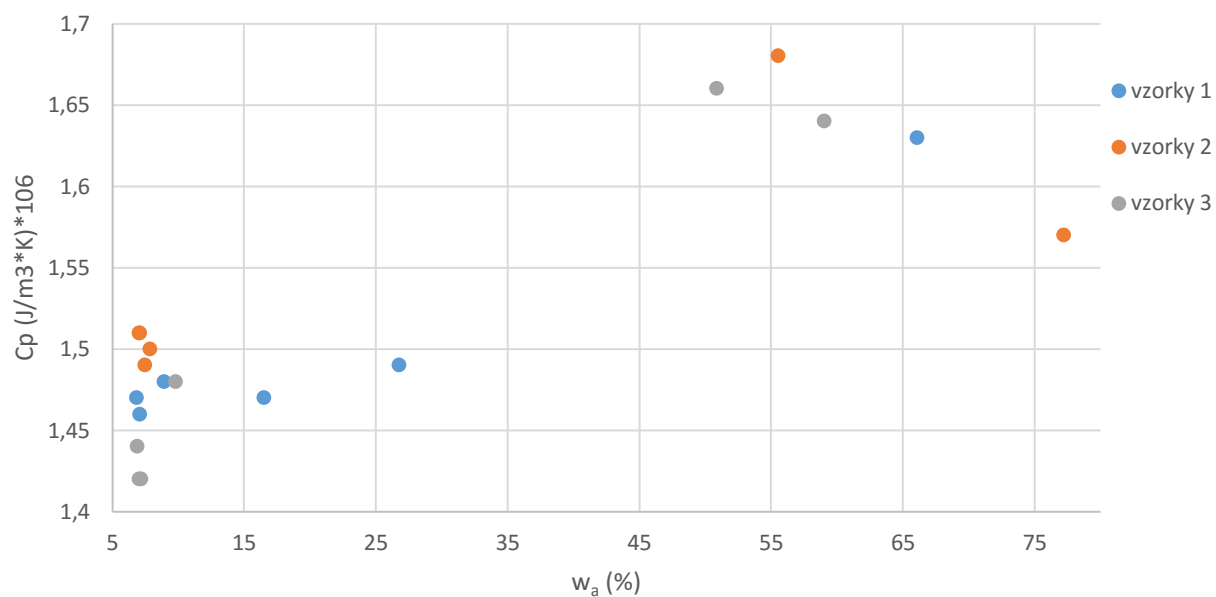
Obr. 22 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva dubu

Závislost tepelné vodivosti na počtu dní od prvního měření - dub



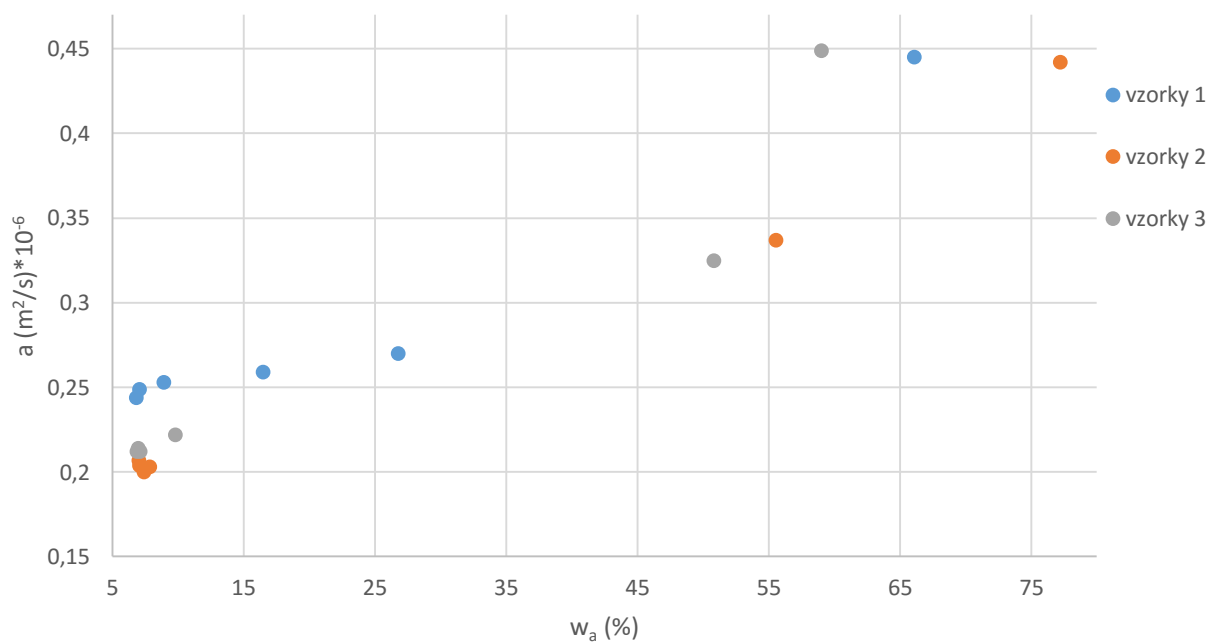
Obr. 23 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva dubu

Závislost měrné tepelné kapacity na abs.vlhkosti - dub



Obr. 24 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva dubu

Závislost teplotní vodivosti na abs. vlhkosti - dub



Obr. 25 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva dubu

7.3 Termofyzikální závislosti u dřeva jasanu

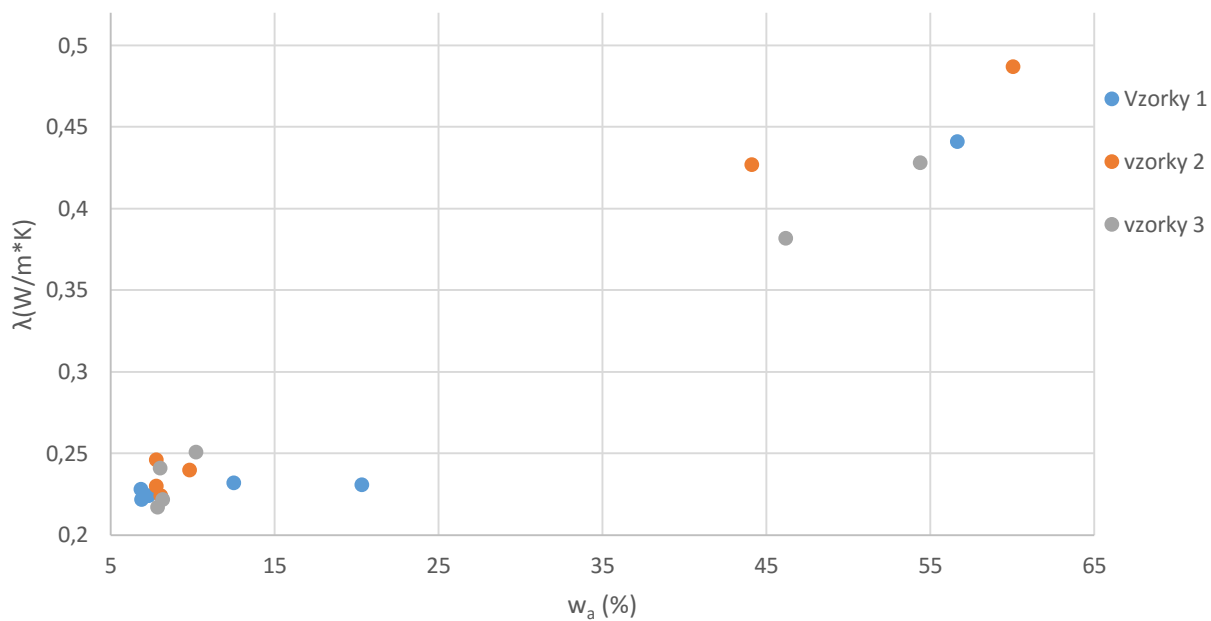
	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w_r (%)	w_a (%)
Měření 9.7. 2015	1048,55	0,0210	0,1448	1048,77	1048,35	36,17	56,65
Měření 20.7. 2015	805,33	0,0002	0,0126	805,35	805,32	16,89	20,32
Měření 30.7. 2015	752,87	0,0001	0,0089	752,88	752,86	11,10	12,48
Měření 24.8. 2015	718,17	0,0001	0,0075	718,18	718,16	6,80	7,30
Měření 1.10. 2015	715,00	0,0001	0,0089	715,01	714,99	6,39	6,82
Měření 5.11. 2015	715,41	0,0000	0,0063	715,42	715,40	6,44	6,88

Tab. 5 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva jasanu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c_p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t_v (C°)	H (%)
Měření 9.7. 2015	26,8	0,441	1,500	0,295	32,1	30,6
Měření 20.7. 2015	30,9	0,231	1,060	0,218	31,1	31,3
Měření 30.7. 2015	28,3	0,232	1,210	0,192	27,8	26,3
Měření 24.8. 2015	28,8	0,224	1,060	0,213	28,9	39,0
Měření 1.10. 2015	25,7	0,228	1,190	0,191	25,1	33,1
Měření 5.11. 2015	24,9	0,222	0,972	0,229	24,3	38,5

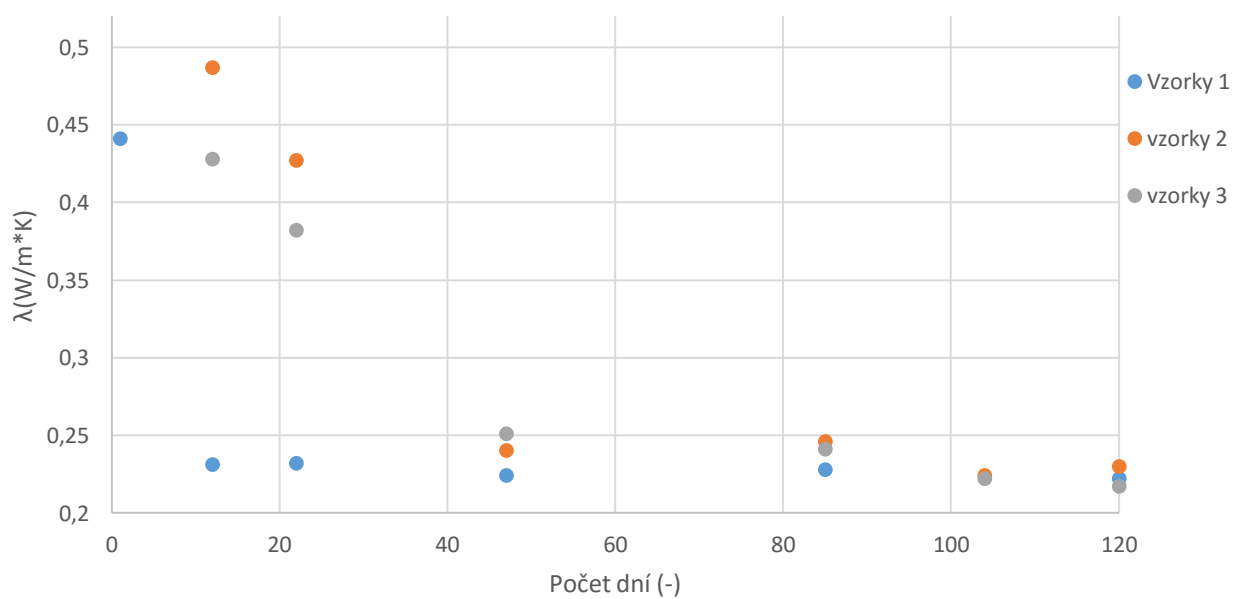
Tab. 6 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva jasanu – druhá část

Závislost tepelné vodivosti na abs. vlhkosti - jasan



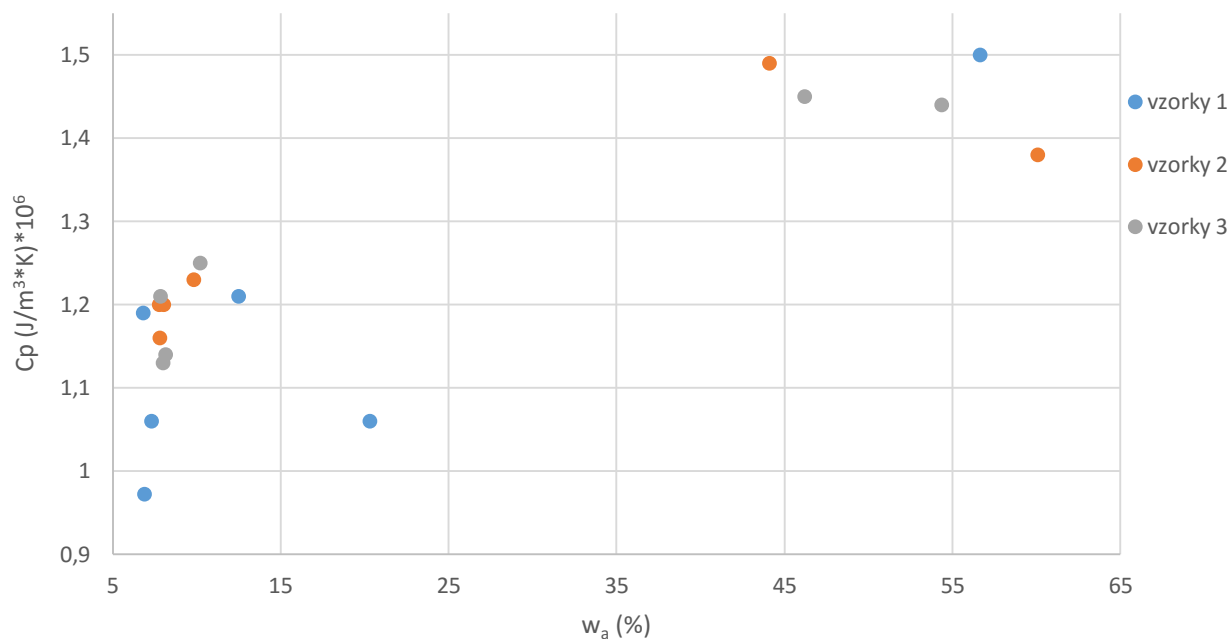
Obr. 26 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu

Závislost tepelné vodivosti na počtu dní od prvního měření - jasan



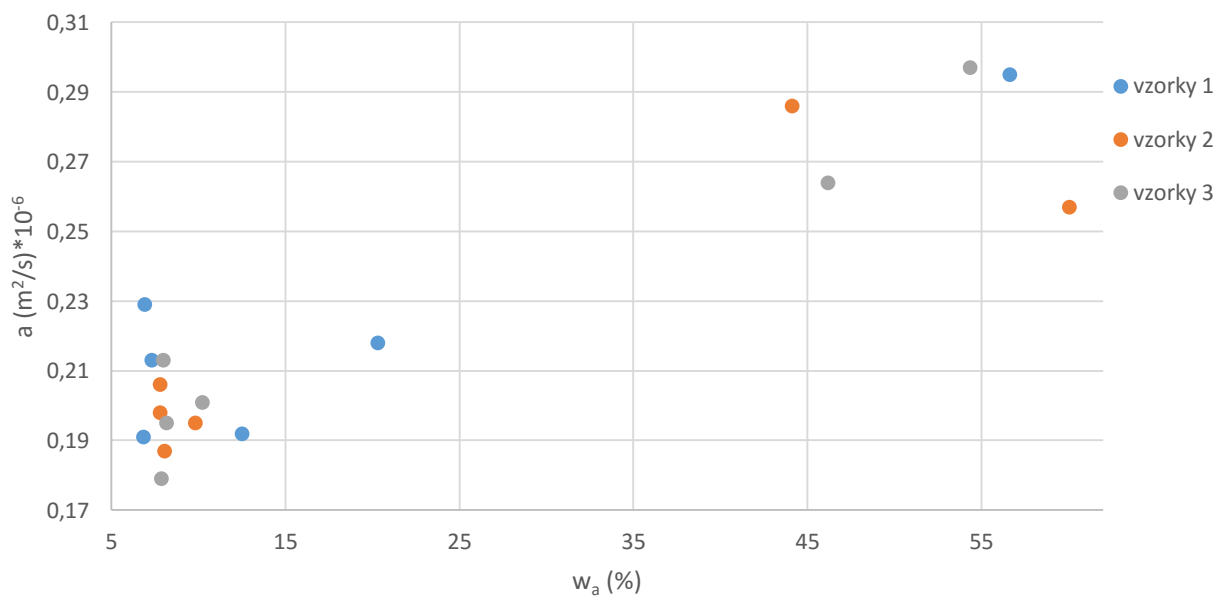
Obr. 27 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva jasanu

Závislost měrné tepelné kapacity na abs. vlhkosti - jasan



Obr. 28 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu

Závislost teplotní vodivosti na abs. vlhkosti - jasan



Obr. 29 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva jasanu

7.4 Termofyzikální závislosti u dřeva javoru

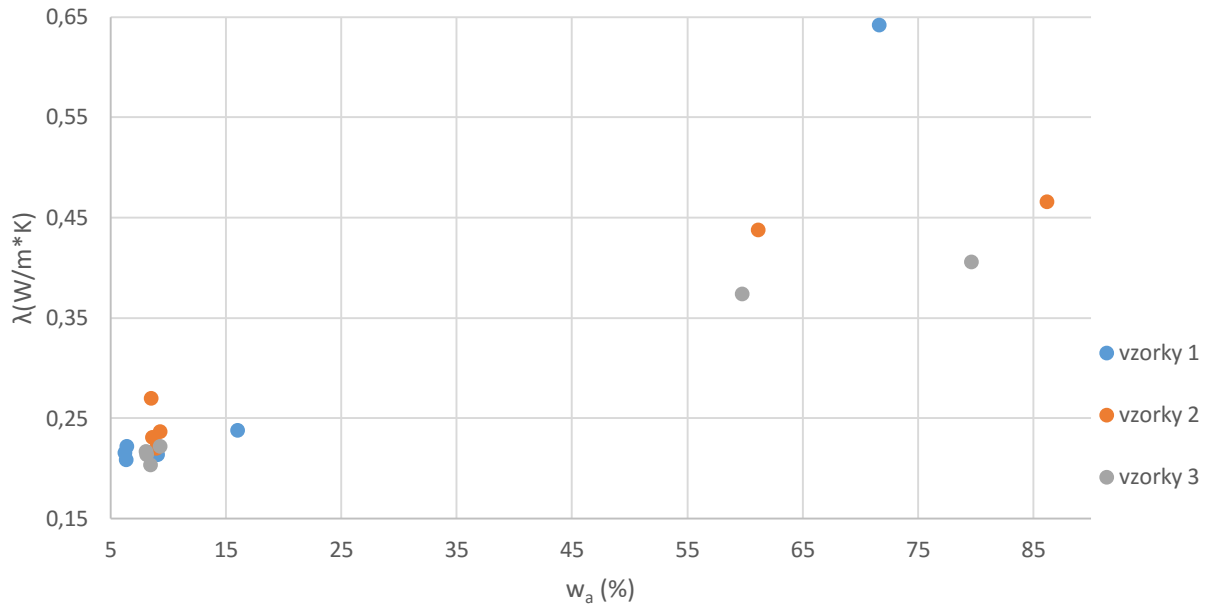
	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w_r (%)	w_a (%)
Měření 9.7. 2015	932,34	0,0241	0,1551	932,53	932,11	41,74	71,65
Měření 20.7. 2015	630,17	0,0001	0,0117	630,19	630,16	13,81	16,02
Měření 30.7. 2015	592,47	0,0001	0,0089	592,48	592,46	8,32	9,08
Měření 24.8. 2015	577,74	0,0001	0,0080	577,76	577,74	5,98	6,37
Měření 1.10. 2015	577,06	0,0000	0,0049	577,06	577,05	5,87	6,24
Měření 5.11. 2015	577,69	0,0000	0,0049	577,69	577,68	5,98	6,35

Tab. 7 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva javoru – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c_p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t_v (C°)	H (%)
Měření 9.7. 2015	25,3	0,642	1,470	0,436	31,3	28,5
Měření 20.7. 2015	31,5	0,238	0,937	0,254	30,9	32,0
Měření 30.7. 2015	28,4	0,214	0,972	0,220	27,6	25,8
Měření 24.8. 2015	28,9	0,222	0,929	0,239	29,1	39,0
Měření 1.10. 2015	25,9	0,216	0,973	0,222	25,4	32,7
Měření 5.11. 2015	25,2	0,209	0,924	0,226	24,4	38,4

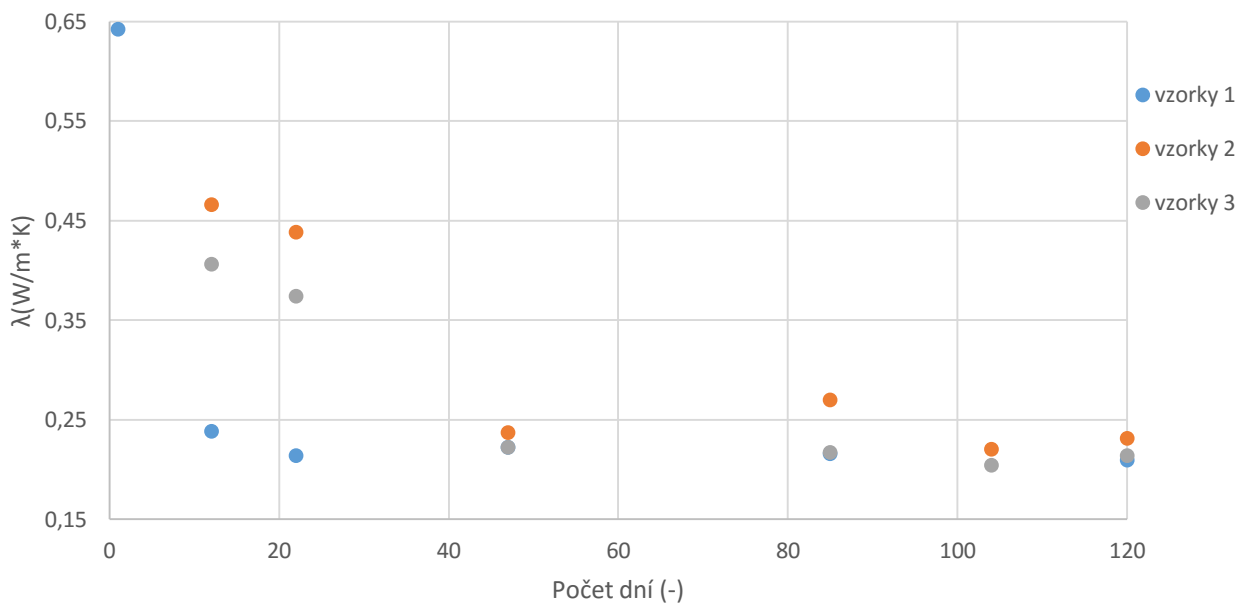
Tab. 8 Výsledky měření u vzorku 1 dřeva javoru – druhá část

Závislost tepelné vodivosti na abs. vlhkosti - javor



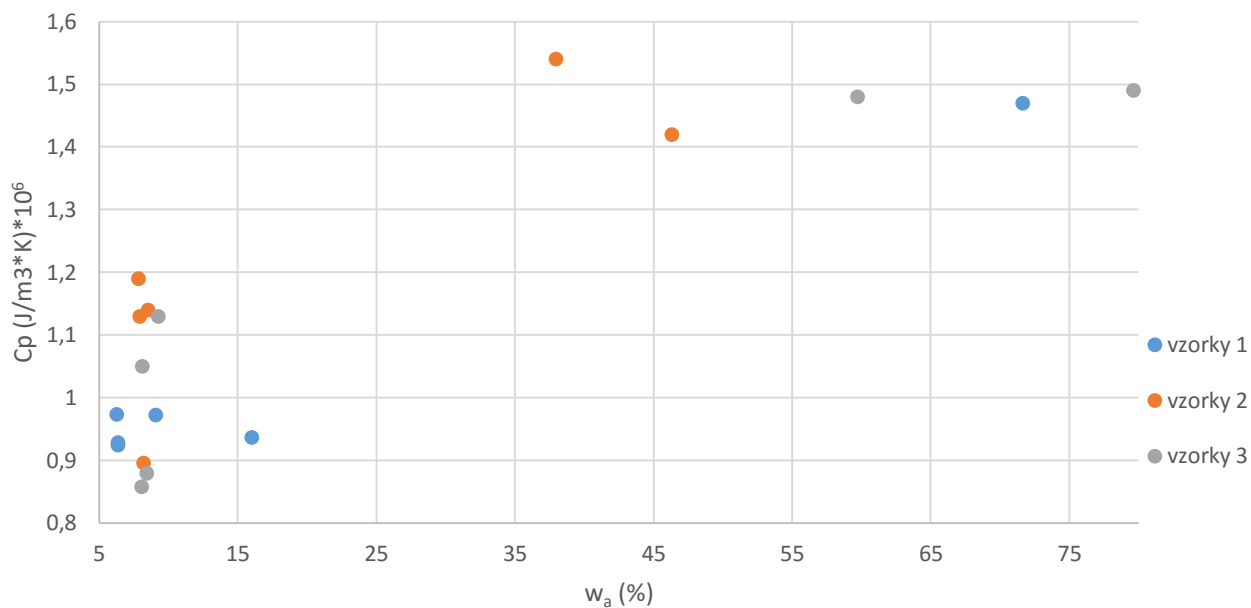
Obr. 30 Graf závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva javoru

Závislost tepelné vodivosti na počtu dní od prvního měření - javor



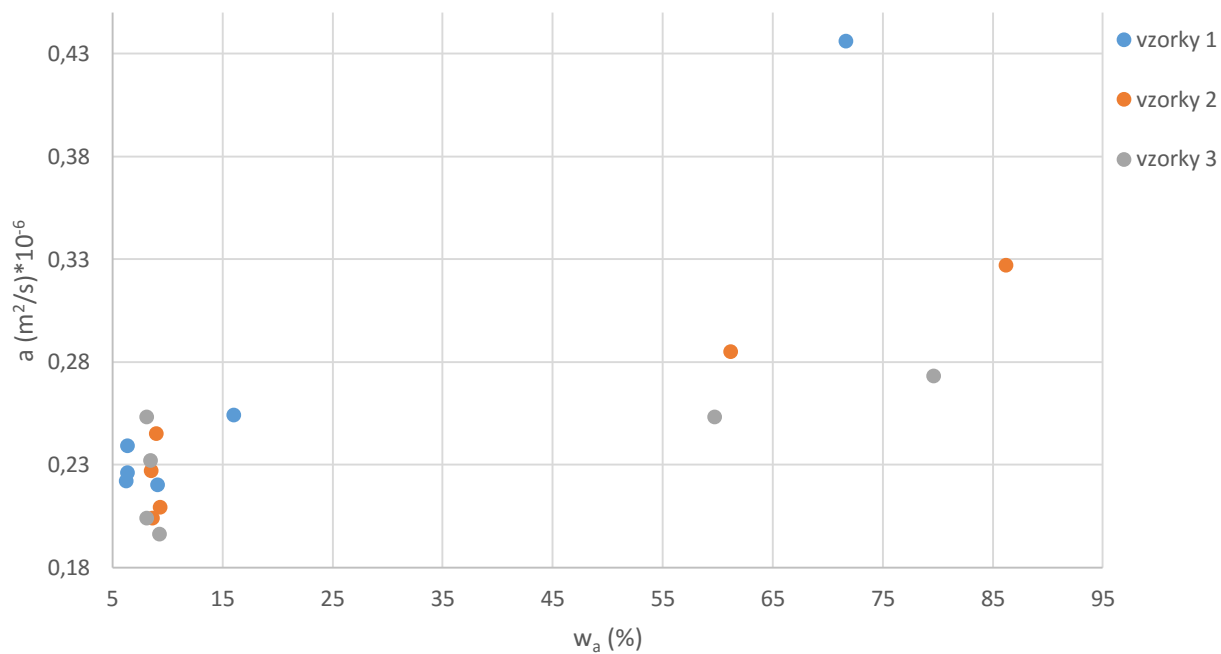
Obr. 31 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u dřeva javoru

Závislost měrné tepelné kapacity na abs. vlhkosti - javor



Obr. 32 Graf závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti u dřeva javoru

Závislost teplotní vodivosti na abs. vlhkosti - javor



Obr. 33 Graf závislosti teplotní vodivosti na absolutní vlhkosti u dřeva javoru

8. Diskuze k naměřeným hodnotám

Při pohledu na grafy obr. 18, 22, 26 a 30 závislosti tepelné vodivosti na absolutní vlhkosti dřev je patrné, že při snižující vlhkosti se snižuje i tepelná vodivost, stejně tak jako je uvedeno podle Ugoleva (Ugolev, 1975) na obr. 2. Z obr. 8 je patrná rozdílná hodnota tepelné vodivosti pro smrk v příčném řezu, kdy při 12% absolutní vlhkosti je uváděno $\lambda = 0,229 - 0,339$ W/m·K oproti naměřeným hodnotám v grafu na obr. 18, kde se dá při stejné vlhkosti zhruba odečíst hodnoty mezi $\lambda = 0,17 - 0,22$ W/m·K. Dále se z tab. 1 pro vzorek 1 dá vyčíst, že jsme naměřili pro absolutní vlhkost 13,22% hodnotu $\lambda = 0,194$ W/m·K.

Z obr. 19, 23, 27 a 31, kde je uváděna závislost tepelné vodivosti na čase, je zřejmá snižující se závislost tepelné vodivosti na zvyšujícím se počtu dní od prvního měření. Tato závislost se dá také předpokládat již od doby porážení stromů a začátku vysychání. Velmi záleží na podmínkách, kde vzorky vysychají. Nejdříve se odpařuje volná voda a poté voda vázaná. Od oblasti nasycení vláken (mez hygroskopicity), kdy se vypařila veškerá volná voda, dřevo začíná sesychat a tím pádem ztrácet na objemu. Při vysoké vlhkosti vnějšího okolí, pak může dřevo dokonce znovu přijímat vlhkost. To se stalo i při mém experimentu, kdy jsou patrné nejnižší hodnoty tepelné vodivosti v 47 den (24. 8. 2015) poté, při dalších měřeních, jak je vidět na obr. 19, 23, 27 a 31 se u některých vzorků hodnoty tepelné vodivosti zvýšily. Vzorky byly vysušeny v místnosti kanceláře, kde byla vysoká průměrná teplota a občas na vzorky dokonce svítilo slunce. To je důvod, proč se dřeva relativně rychle vysušila. Na konci září se pak v kanceláři ochladilo, začalo se větrat, což je i patrné z tab. 2, 4, 6 a 8, dále přibyly květiny a zvýšila se vlhkost vzduchu, což by mohl být důvod, proč se u některých vzorků začala tepelná vodivost mírně zvyšovat.

Z grafů závislosti měrné tepelné kapacity na absolutní vlhkosti na obr. 20, 24, 28 a 32 je opět patrná přímá úměra mezi vlhkostí a měrnou tepelnou kapacitou. Stejná závislost je patrná i na obr. 3 a obr. 4, zde ovšem nesmíme srovnávat hodnoty přímo, protože v obr. 3 a obr. 4 se jedná o měrnou tepelnou kapacitu uváděnou v jednotkách ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a u obr. 20, 24, 28 a 32 v jednotkách ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) $\cdot 10^6$. Trend závislosti je zde možný porovnat. U vzorků různých dřev se závislost měrné tepelné kapacity na vlhkosti nejprve zvyšuje a až poté se začne snižovat. Je to patrné například na obr. 28, vzorku 2, kde má jasan při 60% absolutní vlhkosti $C_p = 1,38$ ($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$) $\cdot 10^6$ a poté po seschnutí na 44% hodnotu $C_p = 1,49$ ($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$) $\cdot 10^6$. Dále je tato závislost

dobře patrná na obr. 24, vzorku 2, nebo méně na vzorku 3. Tyto údaje se rozcházejí s uvedenou odbornou literaturou (obr. 3,4).

Podle obr. 2 uvádí Ugolev (Ugolev, 1975) graf snižující se závislosti vlhkosti na zvyšující se teplotní vodivosti až do vlhkosti okolo 30% (tedy meze hygroskopicity), poté teprve mírný pokles a od cca 12% absolutní vlhkosti opět zvýšení teplotní vodivosti. To se neshoduje s hodnotami naměřenými v této diplomové práci. Je to patrné z obr. 21, 25, 29 a 33, kde se hodnoty teplotní vodivosti mírně snižují se snižující se vlhkostí dřeva. Například u smrku a vzorku 1 se hodnoty velmi rychle snižují (30. 7. 2015) na hodnotu $a = 0,169 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$ a poté při zachování téměř stejné vlhkosti dochází ke zvyšování teplotní vodivosti až na hodnotu $a = 0,218 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$, což je hodnota dokonce vyšší než původní první hodnota tohoto měření ($a = 0,203 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$). Dále například u vzorku 1 jasanu je hodnota teplotní vodivosti při měření 30. 7. 2015 (tab. 6) $a = 0,192 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$, poté se zvýší na $a = 0,213 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$, pak opět sníží a na závěr měření je 5. 11. 2015 $a = 0,219 \text{ (m}^2/\text{s)} \cdot 10^{-6}$.

9. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá ověřováním tepelné vodivosti a dalších termofyzikálních vlastností u dřevěných materiálů. Tyto vlastnosti jsou esenciální pro studium tepelných procesů, které se využívají v rozvoji materiálů, zvýšení úrovně izolací budov, ale třeba i pro optimalizaci energetického využití odpadů těchto materiálů. Toto ověřování bylo prováděno přístrojem ISOMET 2104, který k měření používá dynamickou metodu založenou na principu horkého drátu. V úvodní části této práce byla zpracována literární rešerše zabývající se tématem termofyzikálních veličin, metod jejich měření, hustoty dřeva, vlhkosti a vedení tepla dřevem. Druhá část diplomové práce se zabývá ověřováním závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti u čtyř druhů dřev. Experimentálními měřeními byly tyto hodnoty zjištěny celkem u dvanácti vzorků. Od každého druhu stromu (smrk, dub, jasan a javor) byly pořízeny tři vzorky. Výsledky měření byly vyneseny do grafů a porovnány s odbornou literaturou. Kromě tepelné vodivosti byly navíc zjištěny a porovnány hodnoty teplotní vodivosti a měrné tepelné kapacity. Pro další výzkum mohou být užitečné i grafy tepelné vodivosti v závislosti na čase. Z výsledků vyplývá, že dřevo je velmi heterogenní materiál, jehož termofyzikální vlastnosti mohou být i v rámci jednoho rostlinného druhu různé. Některé údaje se s literaturou shodují, jiné se naopak rozcházejí. U teplotní vodivosti dokonce vyšel mírně se snižující trend v závislosti na vlhkosti, což je v nesouladu s údaji uvedenými v odborné literatuře, kde trend až do meze hygroskopicity vychází vzrůstající. Ovšem v této práci byly záměrně vybrány různorodé vzorky, aby rozptyl hodnot byl co nejvyšší. Pro další podobný výzkum bych rozhodně doporučil, zpracování a měření vzorků v co nejkratším čase po pokácení stromů a měření s maximálně týdenním rozstupem. Tento rozstup je samozřejmě potřeba přizpůsobit podmínkám, ve kterých vzorky vysychají.

10. Seznam použitých zdrojů

- BABIAK, M. 1990. *Wood-water system*. Vedecké a pedagogické aktuality. Zvolen.
- BOŽIKOVÁ, Monika a Peter HLAVÁČ. 2016. Thermal properties of selected cheeses samples. *Journal of Central European Agriculture* [online]. **17**(1), 63-74 [cit. 2016-03-31]. DOI: 10.5513/JCEA01/17.1.1672. ISSN 13329049.
- BRUMOVSKÝ, Miroslav a Otakar RADA. 1991. *Dřevo v rekreačním objektu*. 1. vyd. Praha: Brázda. ISBN 80-209-0187-6.
- DE BOER, J., J. BUTTER, B. GROSSKOPF a P. JESCHKE 1980. Hot Wire Technique for Determining High Thermal Conductivities. *Refractories journal*. , 1.
- GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. 2009. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 9788073753122.
- HÁJEK, Václav. 1997. *Truhlářské práce*. 1. vyd. Praha: Grada. Profi. ISBN 80-716-9418-5.
- HORÁČEK, Petr. 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 8071573477.
- ISOMET 2104 Příručka používatele*. 2007. Applied Precision, Ltd.
- KLUNAVEC, D. 1977. Impulzná metóda merania termofyzikálnych parametrov disperzných látok so zameraním na elektrotechnickú keramiku. *Zborník Pedagogickej fakulty v Nitre - matematika a fyzika*. Bratislava, 1977(27), 233-247.
- KOLLMANN, F. 1951. *Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe*. Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- KREMPASKÝ, Július. 1969. *Meranie termofyzikálnych veličín*. 1. vyd. Bratislava: Slov. akad. vied.

- KRUPALOVÁ, A. 2004. *Sušení dřeva*. 1. Karlovy Vary: Střední odborné učeliště stavební, odborné učeliště a učeliště.
- KUBIČÁR, Ľudovít. 1990. *Pulse method of measuring basic thermophysical parameters*. New York: Elsevier. Comprehensive analytical chemistry, v. 12, pt. E. ISBN 80-224-0085-8.
- KUBIČÁR, Ľudovít. 1988. *Rýchla metóda merania základných termofyzikálnych parametrov*. 1. vyd. Bratislava: Veda. Matematika - Fyzika.
- LABUDOVÁ, Gabriela. 1999. *Termofyzikálne vlastnosti disperzných látok*. Nitra.
- MATOVÍČ, Anton. 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská. ISBN 80-715-7086-9.
- MATOVÍČ, Anton. 1992. *Stavba dřeva: (cvičení)*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská. *Měření součinitele tepelné vodivosti pomocí měřicího zařízení HFM 436/3/1E Lambda* [online]. 2008. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/mereni-soucinitele-tepelne-vodivosti-pomoci-merici/>
- PATŘIČNÝ, Martin. 2005. *Dřevo krásných stromů*. 3., přeprac. vyd., V nakl. Grada 1. vyd. Praha: Grada. ISBN 80-247-1193-1.
- POŽGAJ, Alexandr, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK. 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vydání. Bratislava: PRÍRODA a. s. ISBN 80-07-00600-1.
- REGINÁČ, L. 1990. *Náuka o dreve II*. Zvolen: VŠLD.
- SKAAR, C. 1988. *Wood - water relations*. Berlin - Heidelberg - New York: Springer Verlag.
- ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. 2002. *Stavba dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 8071576360.
- ŠTEFKOVÁ, Pavla. 2012. *Studium tepelných vlastností materiálů* [online]. [cit. 2016-01-04]. ISSN 8F7379AF.
- UGOLEV, V.N. 1975. *Drevesinovedenje s osnovami lesnovo tovarovedenie*. Moskva.

YAMASUEA, E., M. SUSAB, H. FUKUYAMAB a K. NAGATAB 2002. Thermal conductivities of silicon and germanium in solid and liquid states measured by non-stationary hot wire method with silica coated probe. *Journal of Crystal Growth*. 2002(234), 121-131.

11. Přílohy

Naměřené údaje – vzorky 2, smrk

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 30.7. 2015	558,85	0,0013	0,0361	558,91	558,81	50,10	100,40
Měření 24.8. 2015	303,10	0,0001	0,0075	303,11	303,09	8,00	8,69
Měření 1.10. 2015	302,40	0,0000	0,0040	302,41	302,40	7,79	8,44
Měření 29.10. 2015	303,68	0,0000	0,0049	303,69	303,68	8,17	8,90
Měření 5.11. 2015	302,78	0,0000	0,0040	302,78	302,77	7,90	8,58

Tab. 9 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva smrku – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) ·10 ⁶	a (m ² /s) ·10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 30.7. 2015	23,9	0,242	0,889	0,272	27,2	25,0
Měření 24.8. 2015	28,5	0,189	0,780	0,242	28,4	40,3
Měření 1.10. 2015	26,8	0,165	0,814	0,203	27,0	30,4
Měření 29.10. 2015	23,6	0,177	0,803	0,220	22,7	42,0
Měření 5.11. 2015	25,3	0,174	0,778	0,223	24,2	36,6

Tab. 10 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva smrku – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 2, dub

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	529,46	0,0032	0,0568	529,54	529,38	43,56	77,18
Měření 30.7. 2015	464,80	0,0021	0,0463	464,86	464,74	35,71	55,54
Měření 24.8. 2015	322,24	0,0001	0,0080	322,25	322,23	7,27	7,84
Měření 1.10. 2015	319,72	0,0000	0,0040	319,73	319,72	6,54	6,99
Měření 29.10. 2015	321,02	0,0001	0,0110	321,04	321,01	6,91	7,43
Měření 5.11. 2015	319,94	0,0000	0,0000	319,94	319,94	6,60	7,07

Tab. 11 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva dubu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) ·10 ⁶	a (m ² /s) ·10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	24,7	0,692	1,570	0,442	30,3	32,9
Měření 30.7. 2015	22,2	0,565	1,680	0,337	27,2	25,8
Měření 24.8. 2015	27,9	0,303	1,500	0,203	27,4	42,5
Měření 1.10. 2015	25,3	0,313	1,510	0,207	25,9	32,8
Měření 29.10. 2015	23,4	0,298	1,490	0,200	23,1	42,0
Měření 5.11. 2015	24,6	0,309	1,510	0,204	24,5	38,2

Tab. 12 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva dubu – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 2, jasan

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	678,98	0,0026	0,0511	679,05	678,90	37,52	60,06
Měření 30.7. 2015	611,30	0,0022	0,0469	611,38	611,24	30,61	44,11
Měření 24.8. 2015	465,81	0,0000	0,0040	465,81	465,80	8,93	9,81
Měření 1.10. 2015	457,17	0,0001	0,0080	457,17	457,15	7,21	7,77
Měření 29.10. 2015	458,29	0,0000	0,0040	458,30	458,29	7,44	8,04
Měření 5.11. 2015	457,21	0,0001	0,0075	457,22	457,20	7,22	7,78

Tab. 13 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva jasanu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	25,3	0,487	1,380	0,257	30,1	33,3
Měření 30.7. 2015	22,6	0,427	1,490	0,286	27,1	25,4
Měření 24.8. 2015	27,9	0,240	1,230	0,195	27,2	43,0
Měření 1.10. 2015	27,4	0,246	1,200	0,206	28,1	29,6
Měření 29.10. 2015	23,7	0,224	1,200	0,187	22,9	42,0
Měření 5.11. 2015	25,3	0,230	1,160	0,198	24,5	37,2

Tab. 14 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva jasanu – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 2, javor

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	638,13	0,0057	0,0752	638,24	638,02	46,30	86,20
Měření 30.7. 2015	552,31	0,0035	0,0595	552,41	552,23	37,95	61,16
Měření 24.8. 2015	374,56	0,0000	0,0063	374,57	374,55	8,50	9,30
Měření 1.10. 2015	371,87	0,0001	0,0089	371,88	371,86	7,84	8,51
Měření 29.10. 2015	373,41	0,0001	0,0080	373,42	373,40	8,22	8,96
Měření 5.11. 2015	372,26	0,0000	0,0040	372,27	372,26	7,94	8,62

Tab. 15 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva javoru – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	24,5	0,466	1,420	0,327	30,5	33,8
Měření 30.7. 2015	21,6	0,438	1,540	0,285	27,2	25,1
Měření 24.8. 2015	28,5	0,237	1,140	0,209	27,3	43,0
Měření 1.10. 2015	27,9	0,270	1,190	0,227	28,3	29,4
Měření 29.10. 2015	24,0	0,220	0,896	0,245	23,1	42,0
Měření 5.11. 2015	25,5	0,231	1,130	0,204	24,7	37,2

Tab. 16 Výsledky měření u vzorku 2 dřeva javoru – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 3, smrk

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	912,05	0,0036	0,0601	912,14	911,96	60,87	155,59
Měření 30.7. 2015	798,16	0,0031	0,0556	798,24	798,09	55,29	123,67
Měření 24.8. 2015	391,17	0,0000	0,0049	391,17	391,16	8,77	9,62
Měření 1.10. 2015	388,19	0,0000	0,0040	388,19	388,18	8,07	8,78
Měření 29.10. 2015	389,90	0,0000	0,0000	389,90	389,90	8,48	9,26
Měření 5.11. 2015	388,64	0,0001	0,0075	388,65	388,63	8,18	8,91

Tab. 17 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva smrku – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	24,7	0,362	1,370	0,264	30,5	36,5
Měření 30.7. 2015	22,2	0,357	1,380	0,258	26,9	24,7
Měření 24.8. 2015	28,3	0,190	1,010	0,188	27,7	41,6
Měření 1.10. 2015	29,1	0,211	0,850	0,248	29,3	27,3
Měření 29.10. 2015	24,1	0,184	0,957	0,192	23,3	42,2
Měření 5.11. 2015	25,8	0,185	0,960	0,193	24,9	37,4

Tab. 18 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva smrku – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 3, dub

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	558,04	0,0007	0,0261	558,08	558,01	37,11	59,02
Měření 30.7. 2015	529,32	0,0006	0,0242	529,35	529,29	33,70	50,83
Měření 24.8. 2015	385,32	0,0000	0,0040	385,33	385,32	8,93	9,80
Měření 1.10. 2015	375,45	0,0000	0,0040	375,45	375,44	6,53	6,99
Měření 29.10. 2015	375,97	0,0000	0,0040	375,98	375,97	6,66	7,14
Měření 5.11. 2015	375,00	0,0000	0,0049	375,01	375,00	6,42	6,86

Tab. 19 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva dubu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	22,8	0,735	1,640	0,449	26,7	25,1
Měření 30.7. 2015	27,3	0,540	1,660	0,325	30,6	35,0
Měření 24.8. 2015	27,7	0,328	1,480	0,222	27,1	43,4
Měření 1.10. 2015	25,7	0,303	1,420	0,214	25,9	32,5
Měření 29.10. 2015	23,4	0,302	1,420	0,212	23,2	42,3
Měření 5.11. 2015	24,8	0,305	1,440	0,212	24,4	38,0

Tab. 20 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva dubu – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 3, jasan

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	680,36	0,0017	0,0417	680,42	680,31	35,22	54,37
Měření 30.7. 2015	644,34	0,0010	0,0319	644,38	644,30	31,60	46,19
Měření 24.8. 2015	485,73	0,0001	0,0075	485,74	485,72	9,26	10,21
Měření 1.10. 2015	475,94	0,0003	0,0172	475,97	475,92	7,40	7,99
Měření 29.10. 2015	476,68	0,0000	0,0040	476,68	476,67	7,54	8,15
Měření 5.11. 2015	475,34	0,0000	0,0049	475,35	475,34	7,28	7,85

Tab. 21 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva jasanu – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	26,0	0,428	1,440	0,297	30,4	36,3
Měření 30.7. 2015	22,8	0,382	1,450	0,264	26,8	25,2
Měření 24.8. 2015	27,9	0,251	1,250	0,201	27,4	42,7
Měření 1.10. 2015	30,3	0,241	1,130	0,213	29,6	27,5
Měření 29.10. 2015	24,4	0,222	1,140	0,195	23,4	41,4
Měření 5.11. 2015	26,1	0,217	1,210	0,179	25,1	38,1

Tab. 21 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva jasanu – druhá část

Naměřené údaje – vzorky 3, javor

	m (g)	δ^2 (m)	δ (m)	max (m)	min (m)	w _r (%)	w _a (%)
Měření 20.7. 2015	563,76	0,0025	0,0498	563,83	563,69	44,33	79,62
Měření 30.7. 2015	501,31	0,0007	0,0265	501,35	501,28	37,39	59,72
Měření 24.8. 2015	343,00	0,0000	0,0063	343,01	342,99	8,49	9,28
Měření 1.10. 2015	339,20	0,0000	0,0040	339,20	339,19	7,47	8,07
Měření 29.10. 2015	340,29	0,0000	0,0000	340,29	340,29	7,77	8,42
Měření 5.11. 2015	339,31	0,0000	0,0040	339,32	339,31	7,50	8,11

Tab. 22 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva javoru – první část

	T (C°)	λ (W/m·K)	c _p (J/m ³ ·K) · 10 ⁶	a (m ² /s) · 10 ⁻⁶	t _v (C°)	H (%)
Měření 20.7. 2015	24,8	0,406	1,490	0,273	30,4	36,5
Měření 30.7. 2015	22,3	0,374	1,480	0,253	26,4	25,8
Měření 24.8. 2015	28,4	0,222	1,130	0,196	27,3	42,9
Měření 1.10. 2015	30,8	0,217	0,858	0,253	29,3	28,3
Měření 29.10. 2015	24,5	0,204	0,879	0,232	23,5	41,1
Měření 5.11. 2015	26,2	0,214	1,050	0,204	25,1	38,0

Tab. 23 Výsledky měření u vzorku 3 dřeva javoru – druhá část