

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Výpočet teplotního a vlhkostního pole ve dřevě během sušení

Diplomová práce

2016/2017

Bc. Pavlína Suchomelová



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autorka práce: Bc. Pavlína Suchomelová
Studijní program: Dřevařské inženýrství
Obor: Dřevařské inženýrství

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Miroslav Trcala, Ph.D.

Název práce: **Výpočet teplotního a vlhkostního pole ve dřevě během sušení**
Jazyková varianta: Čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretickou analýzu toku tepla a vody vázané ve dřevě pomocí Fourierova a Fickova zákona.
2. Zohledněte provázanost obou počítaných fyzikálních polí (např. prostřednictvím závislosti vybraných materiálových vlastností na teplotě a vlhkosti nebo přidavnými fyzikálními jevy).
3. Implementujte příslušné parciální diferenciální rovnice do vhodného výpočetního softwaru založeného na metodě konečných prvků.
4. Srovnajte nelineární výpočet s lineárním.
5. Srovnajte vaše výpočty s normou.
6. Členění práce: Úvod, Cíl, Literární přehled, Metodika, Výsledky a diskuze, Závěr, Použitá literatura.

Rozsah práce: 50

Literatura:

1. *Transport Processes in Wood*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 s. ISBN 3-504-12574-4.
2. *Wood: Influences of moisture on physical properties*. Virginia: Virg. Polytech. Institute & State University, 1995. 227 s. ISBN 0-9622181-0-3.
3. POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
4. TRCALA, M. A 3D transient nonlinear modelling of coupled heat, mass and deformation fields in anisotropic material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. sv. 55, č. 17-18, s. 4588--4596. ISSN 0017-9310.
5. *Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva*. Habilitační práce. MZLU v Brně, 2004. 126.
6. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 283 s. ISBN 3-540-19258-1.
7. TRCALA, M. *Model vázaného pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení*. Diplomová práce. Brno: LDF MENDELU, 2009. 84.

Datum zadání: leden 2017

Datum odevzdání: duben 2017

Bc. Pavlína Suchomelová
Autorka práce

Mgr. Ing. Miroslav Trcala, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Dr. Ing. Pavel Král
Vedoucí ústavu

doc. Ing. Radomír Klvač, Ph.D.
Děkan LDF MENDELU

Prohlašuji, že jsem práci: *Výpočet teplotního a vlhkostního pole ve dřevě během sušení* vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 4. dubna 2017

.....

Bc. Pavlína Suchomelová

Děkuji vedoucímu mojí diplomové práce, panu Ing. Miroslavu Trcalovi, Ph.D., za jeho vstřícný přístup při konzultacích, za odborné připomínky, trpělivost a ochotu vždy pomoci, poradit a diskutovat o řešené problematice.

Abstrakt

Bc. Pavlína Suchomelová

Výpočet teplotního a vlhkostního pole ve dřevě během sušení

Tato práce se zabývá srovnáním několika způsobů výpočtů teplotního a vlhkostního pole ve dřevě s obsahem vody vázané během sušení a jejich srovnáním s v praxi užívanou normou pro umělé sušení řeziva. Jednotlivé modely představují čtyři různé způsoby výpočtu nestacionárního vázaného šíření vlhkosti a tepla ve dřevě. První model je lineárním výpočtem, zbylé tři modely jsou nelineární, s proměnnými materiálovými koeficienty závislými na vlhkosti a teplotě, a liší se způsobem zadání koeficientu termodifuze, tzv. Soretova efektu.

Cílem diplomové práce je prokázat a popsat vliv Soretova efektu na průběh sušení a popsat rozdíl mezi obecně užívaným předpokladem průběhu sušení dřeva s předpokladem stanoveným výpočtem vázaného šíření řešených fyzikálních polí.

Klíčová slova: vlhkostní pole ve dřevě, teplotní pole ve dřevě, umělé sušení dřeva, metoda konečných prvků, vázané šíření polí ve dřevě, Soretův efekt

Abstract

Bc. Pavlína Suchomelová

The Calculation of Thermal and Moisture Fields in Wood During Drying

The thesis is focused on comparison of several ways of the calculation of thermal and moisture fields in wood containing bound water during drying and their comparison with commonly used standards for wood drying processes. Each of the four models presents different way of the unsteady-state calculation of the coupled thermal and moisture field in wood. The first model describes linear simulation, other three models present nonlinear simulation using material coefficients dependent on temperature and moisture content, differing in the method of the thermodiffusion (Soret effect) coefficient settings.

The aim of the thesis is to establish the influence of Soret effect on the wood drying process and to describe the difference between commonly used presumption of this process and its presumption given by the unsteady-state computation of the coupled thermal and moisture fields in wood.

Keywords: moisture field in wood, thermal field in wood, wood drying process, finite elements method, coupled thermal and moisture fields, Soret effect

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	CÍL PRÁCE.....	11
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED	12
3.1	Umělé sušení dřeva	12
3.1.1	Způsoby umělého sušení dřeva	12
3.2	Pohyb vody ve dřevě při sušení	12
3.2.1	Pohyb vody volné ve dřevě	13
3.2.2	Pohyb vody vázané ve dřevě.....	13
3.3	Pohyb tepla ve dřevě během sušení	15
3.3.1	I. Fourierův zákon	15
3.3.2	II. Fourierův zákon.....	15
3.4	Provázanost vlhkostního a teplotního pole ve dřevě.....	16
3.4.1	Soretův efekt.....	16
3.4.2	Dufourův efekt	16
3.4.3	Materiálové koeficienty.....	17
3.5	Okrajové podmínky.....	17
3.5.1	Koeficient přestupu vlhkosti	17
3.5.2	Koeficient přestupu tepla.....	17
3.6	Definice rovnic pro okrajové podmínky	17
3.7	Vliv prostředí na proces sušení	18
3.7.1	Rovnovážná vlhkost dřeva	19
4	METODIKA	20
4.1	Řešené numerické modely	20
4.1.1	Stanovení počátečních podmínek.....	21
4.1.2	Stanovení parametrů sušicího prostředí dle ON 49 0651.....	21
4.2	Zjednodušení situace pro účely výpočtu.....	22

4.3	Tvorba geometrie tělesa	22
4.4	Fyzikální model nelineárního výpočtu se Soretovým efektem	23
4.4.1	Definované PDR.....	23
4.4.2	Stanovení materiálových koeficientů	23
4.4.3	Implementace soustavy PDR do software Comsol Multiphysics ...	30
4.4.4	Stanovení okrajových podmínek.....	30
4.5	Síť.....	31
4.6	Výpočet	31
4.7	Výsledky	31
5	VÝSLEDKY A DISKUSE.....	33
5.1	Teplotní pole	33
5.2	Vlhkostní pole	34
5.2.1	Analýza pohybu vlhkostního pole v různých bodech tělesa	34
5.2.2	Analýza vlhkosti na středové úsečce tělesa.....	39
5.2.3	Analýza pohybu vlhkostního pole na středovém řezu tělesem	41
5.2.4	Srovnání průběhu vlhkosti v modelech s ON 49 0651.....	42
6	ZÁVĚR.....	44
	SUMMARY	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	50
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
	SEZNAM GRAFŮ	54

1 ÚVOD

Technologická operace sušení dřeva je nedílnou součástí procesu zpracování dřeva, ať již pro nábytkářské, stavební nebo jiné účely. Na kvalitě aplikovaného sušícího režimu závisí do jisté míry i kvalita finálního výrobku. Z tohoto důvodu by v dřevařské praxi měl být kladen zřetel na zkvalitňování sušících procesů a schopnost tyto procesy optimalizovat pro různorodé vlastnosti materiálů i pro specifické požadavky na vlastnosti finálního výrobku. Toho lze dosáhnout pouze na základě detailního pochopení všech fyzikálních dějů, které probíhají ve dřevě a okolním prostředí během sušení.

V současné době je využíváno především umělého sušení řeziva. Sušárny řeziva jsou, co se týče vybavení, na vysoké úrovni. Je však třeba si uvědomit, že i s moderním technickým vybavením lze provádět nekvalitní sušení, zejména při nevhodné volbě sušícího režimu. Proto je k dosažení nejvyšší kvality sušení zapotřebí používat specifické režimy sušení pro různou kvalitu, druh a plánované použití řeziva. A právě k tvorbě těchto specifických sušících režimů by bylo vhodné využívat nejen poznatky z praktických měření a obecné normy, ale i numerické modely, s jejichž pomocí je možné simulovat sušící procesy za různých podmínek a následně vyhodnotit nejvhodnější postup pro konkrétní případ.

Sušení je ovlivněno vnějším prostředím (okolí) a vnitřním prostředím (materiál). Je to dynamický děj, který probíhá nerovnoměrně v celém objemu řeziva. Fyzikální děj sušení dřeva je popisován jako pohyb vody a tepla v každém bodě řeziva, který je způsoben gradienty vlhkosti a teploty. Při modelování pohybu vody a tepla ve dřevě za pomoci těchto gradientů je třeba si uvědomit, že tyto gradienty spolupůsobí a vzájemně se ovlivňují. Je dokázáno, že toto spolupůsobení může způsobit zablokování některých vodivých cest ve dřevě nebo některý z těchto toků eliminovat.

V současné době je mnoho možností, jak tyto děje ve dřevě simulovat. Z důvodu nemožnosti analytického řešení multifyzikálních úloh, kterou je právě i výpočet provázaného vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení, se k modelování těchto dějů používají různé druhy software fungujících na základě analýzy metodou končených prvků. Pro účely této práce byl využit software Comsol Multiphysics, jehož nespornou výhodou je například schopnost řešit celou soustavu parciálních diferenciálních rovnic najednou, v rámci jednoho modelu. Parciální diferenciální rovnice

popisující pohyb vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení jsou odvozeny z II. Fickova a II. Fourierova zákona.

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této práce je vytvořit několik variant výpočtu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení, porovnat je mezi sebou a s příslušnou normou. Vedlejším cílem práce je sestavit stručný literární přehled k řešené problematice, zejména k teorii Fourierova a Fickova zákona.

První varianta bude provedena lineárním výpočtem. Další tři varianty výpočtu budou nelineární, s materiálovými koeficienty stanovenými jako funkcemi vlhkosti dřeva a teploty. Tyto tři výpočty se budou od sebe lišit způsobem provázání vlhkostního a teplotního pole ve dřevě. Normové hodnoty pro srovnání budou odvozeny z *ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva*.

Tato práce by měla prokázat a popsat rozdíl mezi obecně používaným předpokladem průběhu sušení dřeva převzatým z normy a předpokladem tohoto průběhu stanoveným numerickými simulacemi sušení dřeva, a zároveň by měla prokázat vliv Soretova efektu na průběh sušení.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 Umělé sušení dřeva

Fyzikální jevy, které probíhají v sušárně během sušení dřeva jsou velmi různorodé. Jak uvádí Klement a Detvaj (2007), je třeba zabývat se vlastnostmi a změnami sušícího prostředí (termodynamikou sušení), vazbami vody se dřevem (statikou sušení), ohřevem a ochlazováním materiálu (přenosem tepla), výměnou vody na povrchu dřeva, pohybem vody uvnitř materiálu (dynamikou sušení), zákonitostmi průběhu procesu sušení v čase (kinetikou sušení) a změnou stavu nahřátého vlhkého dřeva jako elasticko-plastické látky v čase (reologií materiálu).

Umělé sušení dřeva se od přirozeného liší především v možnosti regulovat vlastnosti sušícího prostředí. Rozlišujeme několik způsobů umělého sušení dřeva, a to podle sušící teploty a způsobu ohřevu sušeného materiálu.

3.1.1 Způsoby umělého sušení dřeva

Nejčastěji používaným způsobem umělého sušení je sušení teplovzdušné, které probíhá v sušárnách při teplotách směsi vzduchu a vodní páry do 40 °C (při nízkoteplotním předsušení) nebo v rozmezí 40–100 °C (klasické teplovzdušné sušení). Výhodami klasického sušení dřeva jsou především jeho univerzálnost, co se dřeviny, tloušťky řeziva i počáteční vlhkosti týče, střední až krátký čas sušení a možnost použití různých vyhřívacích médií. Nevýhodami jsou vyšší energetické náklady a možné chyby způsobené především neodborným sušením (Klement a Detvaj, 2007). Ve výpočtech v této práci je uvažováno právě s klasickým teplovzdušným sušením.

Dalšími způsoby sušení dřeva jsou sušení vysokoteplotní, které probíhá v přehřáté páře při teplotách vyšších než 100 °C nebo v současné době stále více se rozšiřující speciální způsoby sušení, a to sušení kondenzační, vakuové, kontaktní, indukční, mikrovlnné apod. Využívá se také kombinovaných způsobů sušení.

3.2 Pohyb vody ve dřevě při sušení

Změna vlhkosti vysoušeného dřeva probíhá v důsledku místních rozdílů neboli gradientů vlhkosti, teploty a tlaku v objemu materiálu. Tyto gradienty spolupůsobí a navzájem se ovlivňují. Přenos vody vlivem gradientu vlhkosti je způsoben tím, že rychlost pohybu vody je menší než rychlost odpaření vody z povrchu. Tento je

pojmenováván jako vlhkostní spád, pohyb vody v důsledku vlhkostního spádu je označována jako vlhkostní vodivost. (Dejmal, 1995)

Změny vlhkosti způsobené gradientem teploty popisujeme jako teplotně-vlhkostní vodivost. Voda se v důsledku rozdílných teplot pohybuje ve směru k místu s nižší teplotou. (Dejmal, 1995)

Pohyb vody ve dřevě způsobený gradientem tlaku se projevuje při ohřevu vlhkého dřeva při teplotách vyšších než 100 °C (Dejmal, 1995). Voda se pohybuje z místa s vyšším do místa s nižším tlakem vodních par.

3.2.1 Pohyb vody volné ve dřevě

Voda volná se vyskytuje ve dřevě s vlhkostí vyšší než cca 30 %. Ze dřeva se uvolňuje dříve než voda vázaná. Pohyb vody volné ve dřevě je popisován objemovým tokem nazývaným propustnost a je vyvolán gradientem vnějšího tlaku. Voda volná se pohybuje vodivými cestami, tedy makrokapilárami a mezokapilárami s poloměrem větším než 10^{-7} m (Horáček, 2008). Aby bylo možné trvalé odpařování vlhkosti, musí být zajištěna jímavost vlhkosti okolním prostředím (Dejmal, 1995).

Propustnost dřeva je popsána Darcyho zákonem pro viskózní proudění tekutin, příp. Hagen-Poiseuillovým zákonem pro viskózní tok kapalin. Tato práce se však zabývá procesem sušení předsušeného dřeva s počáteční vlhkostí 25 %, proto zde nebude propustnost podrobněji popisována.

3.2.2 Pohyb vody vázané ve dřevě

Voda vázaná ve dřevě se nachází v buněčných stěnách, kde je vázána pomocí vodíkových můstků. Voda je schopna se ve dřevě vázat až do okamžiku nasycení buněčné stěny (cca do vlhkosti 30 %). Při vlhkostech dřeva nad mezí nasycení buněčné stěny je již ve dřevě shromažďována voda volná, která vyplňuje lumény buněk a mezibuněčné stěny. (Požgaj, 1993)

$$\mathbf{j} = -\mathbf{D}\nabla c \quad (3.1)$$

j – hustota molekulárního toku ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), \mathbf{D} – matice koeficientů difuze ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) a c – koncentrace vody ve dřevě ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Voda vázaná se ve dřevě pohybuje difuzí. Tuto difuzi lze popsat jako molekulární tok způsobený nenulovým gradientem koncentrace ∇c , při kterém dochází k vyrovnávání koncentrace v různých bodech materiálu (Horáček, 2008). Difuzi vody ve dřevě lze poté zapsat obecně vztahem (3.1).

3.2.2.1 I. Fickův zákon

I. Fickův zákon popisuje difuzi konstantní v čase, tedy stacionární. Lze jej zapsat následujícím vztahem (3.2).

$$\frac{m}{tS} = D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (3.2)$$

m – hmotnost prodifundované kapaliny (kg), t – čas (s), S – plocha difuze (m^2), Δx – vzdálenost rozdílných koncentrací (m) a Δc – rozdíl koncentrací ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). (Horáček, 2004)

3.2.2.2 II. Fickův zákon

II. Fickův zákon popisuje nestacionární difuzi, při níž jsou tok tekutiny a její koncentrace proměnné nejen v prostoru, jako u I. Fickova zákona, ale i v čase. Nestacionární difuze vody ve dřevě je podle tohoto zákona vyjadřována vztahem (3.3).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K_w S \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)_{t,x} \quad (3.3)$$

K_w – koeficient vlhkostní vodivosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), M – vlhkost dřeva (-). (Horáček, 2004)

Z této rovnice vychází, po přepočtení vlhkostní koncentrace c na vlhkost M , parciální diferenciální rovnice vyjádřená vztahem (3.4), použitá pro popis difuze vody ve dřevě v této práci (Trcala, 2009).

$$\frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla M = 0 \quad (3.4)$$

\mathbf{D} – matice difuzních koeficientů ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pro speciálně ortotropní těleso pak platí následující vztah (3.5) dle Horáčka (2004).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_L \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_R \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

Pro řešení této rovnice je nutné znát okrajové podmínky, rozložení vlhkosti na počátku sušení a hodnotu požadované finální vlhkosti dřeva.

3.3 Pohyb tepla ve dřevě během sušení

K pohybu teplotního pole dochází při nehomogenním rozložení teploty v materiálu. Teplo se pohybuje z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Šíří se kondukcí, konvekcí a radiací. (Horáček, 2004) Konduktce tepla (též vedení, difuze tepla) probíhá tepelnou výměnou na úrovni mikroskopického pohybu částic hmoty a popisuje ji Fourierův zákon vedení tepla (3.6).

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3.6)$$

q – hustota tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), λ – koeficient tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a ∇T – teplotní gradient v tělese (K).

3.3.1 I. Fourierův zákon

Stacionární difuze tepla je popsána I. Fourierovým zákonem, který je vyjádřen následujícím vztahem (3.7). (Horáček, 2008)

$$\frac{Q}{St} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.7)$$

Q – množství tepla (J), S – plocha tělesa (m^2), t – čas (s), ΔT – teplotní rozdíl (K), Δx – vzdálenost rozdílných teplot (m), a λ – koeficient tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

3.3.2 II. Fourierův zákon

K nestacionární difuzi tepla dochází, jsou-li tepelný tok a gradient tepla proměnné v prostoru i času. Nestacionární difuze má větší význam než stacionární, především u procesů úpravy dřeva jako je ohřev, impregnace nebo sušení (Siau, 1984). V 1D prostoru má potom předpis pro nestacionární difuzi tepla následující podobu (3.8).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \lambda S \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{t,x} \quad (3.8)$$

Jak uvádí Horáček (2004), při přechodu tepla přes objem látky se část tepla spotřebuje na vyrovnání vnitřní energie částic a zbytek se přenesse dle zákona zachování energie. Po úpravě dle této úvahy dostaneme PDR (3.9) popisující II. Fourierův zákon.

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = 0 \quad (3.9)$$

C – měrné teplo dřeva ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ – hustota dřeva ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Po rozepsání pro speciálně ortotropní těleso pak platí obecný tvar (3.10)
 II. Fourierova zákona v kartézské souřadné soustavě, dle Horáčka (2004).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_L \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_R \frac{\partial T}{\partial z} \right) = C\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.10)$$

3.4 Provázanost vlhkostního a teplotního pole ve dřevě

3.4.1 Soretův efekt

Difuzní tok vody je vyvolán nejen gradientem vlhkosti (koncentrace), ale i gradientem teploty. Vlhkost přechází z místa s vyšší do místa s nižší koncentrací vlhkosti. Tento jev označujeme jako vlhkostní vodivost. Zároveň se ale vlhkost pohybuje z místa s vyšší do místa s nižší teplotou, potom se jedná o teplotně-vlhkostní vodivost (Dejmal, 1995). Za určitých okolností, obvykle během ohřevu, může při sušení dřeva nastat situace, kdy se voda ve dřevě pohybuje směrem od okraje ke středu materiálu. K této situaci dochází vlivem protisměrného působení gradientu vlhkosti a teploty, kdy gradient teploty má vyšší vliv. Fyzikálně je tento jev popsán jako termodifuze vody neboli tzv. Soretův efekt.

Soretův efekt se vyskytuje jen při nenulovém gradientu teploty. V některých místech sušeného řeziva může způsobit lokální zvýšení vlhkosti oproti vlhkosti počáteční. (Siau, 1995) Dochází k němu především na počátku sušení v povrchových vrstvách, kde je ohřev sušeného řeziva nejrychlejší. Soretův efekt je popisován následujícími vztahy:

$$s = \frac{\partial M}{\partial T} \quad (3.11)$$

$$s = \frac{\varphi}{RT} \cdot \frac{\partial EMC}{\partial \varphi} \cdot \frac{E_a}{T} \quad (3.12)$$

s – koeficient Soretova efektu (K^{-1}), φ – relativní vzdušná vlhkost, R – univerzální plynová konstanta ($8,31441 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), EMC – rovnovážná vlhkost dřeva, E_a – aktivační energie vody vázané ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$). (Trcala, 2009)

3.4.2 Dufourův efekt

Vliv na vázané šíření vlhkostního a teplotního pole má i tzv. Dufourův efekt, který zohledňuje vliv derivace vlhkosti podle času na koeficient tepelné vodivosti. Vliv tohoto efektu na průběh vlhkostního a teplotního pole v čase je však považován za velmi malý

a není třeba jej brát do úvahy (Siau, 1995). I pro účely této práce byl vliv Dufourova efektu zanedbán.

3.4.3 Materiálové koeficienty

Vliv na provázání vlhkostního a teplotní pole mají také materiálové koeficienty jako například koeficienty difuze vody, hustota dřeva, měrné teplo, koeficienty tepelné vodivosti aj., jsou-li uvažovány jako závislé na vlhkosti a teplotě. Tato problematika je podrobněji popsána v metodické části práce, v kapitole 4.4.2 *Stanovení materiálových koeficientů*.

3.5 Okrajové podmínky

3.5.1 Koeficient přestupu vlhkosti

Při vlhkosti nad mezí hygroskopicity (cca 30 %) platí při přestupu vlhkosti podmínky pro odpařování z volné hladiny. Při nižších vlhkostech platí podmínky vlhkostní vodivosti (Dejmal, 1995). Přestup vlhkosti je ovlivněn relativní vlhkostí vzduchu, teplotou a tlakem prostředí, rychlostí proudění vzduchu a teplotou a vlhkostí dřeva. Přenos vody mezi povrchem a okolním prostředím je popsán koeficientem přestupu vlhkosti α_M . Koeficient přestupu vlhkosti se dle Horáčka (2004) pohybuje v intervalu 10^{-7} – 10^{-6} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale např. v tabulkách Siau (1995) je udáván jako 10^{-4} – 10^{-2} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro účely této práce byl koeficient přestupu vlhkosti stanoven jako konstantní, odvozený podle Horáčka (2004), jako $\alpha_M=5\cdot 10^{-7}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.5.2 Koeficient přestupu tepla

Koeficient přestupu tepla je závislý především na rychlosti proudění vzduchu a teplotě, přičemž výraznější je vliv rychlosti proudění vzduchu. Horáček (2004) ve své práci uvádí, že vliv koeficientu přestupu tepla je zanedbatelný při přirozeném proudění vzduchu (do $0,5$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Rychlost proudění vzduchu v sušárnách ovlivňuje koeficient přestupu tepla v řádu desítek. V této práci bylo uvažováno nucené proudění vzduchu, pro které Horáček (2004) uvádí rozmezí koeficientu přestupu tepla 10 – 35 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, proto byl stanoven koeficient přestupu tepla $\alpha_T=20$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

3.6 Definice rovnic pro okrajové podmínky

Okrajové podmínky slouží k definici koncentrace vlhkosti a teploty mezi povrchem vysoušeného materiálu a sušícím prostředím.

Pro modely v této diplomové práci, byly použity okrajové podmínky III. řádu, kterými je popsáno odpařování vody z povrchu sušeného řeziva a ohřev povrchu tělesa. Tyto okrajové podmínky (3.13) a (3.14) byly sestaveny podle Trealy (2011) a říkají, že tok vlhkosti, případně tepla, ve směru kolmém na povrch tělesa odpovídá rozdílu mezi vlhkostí na povrchu dřeva a rovnovážnou vlhkostí dřeva, resp. teplotou povrchu dřeva a teplotou vzduchu. Tyto okrajové podmínky mají následující podobu:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{D}\nabla M = \alpha_M(EMC - M) \quad (3.13)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \lambda \nabla T = \alpha_T(T_{air} - T) \quad (3.14)$$

n – normálový vektor, T_{air} – teplota prostředí (K).

3.7 Vliv prostředí na proces sušení

Základními parametry procesu sušení dřeva jsou teplota vzduchu, psychrometrický rozdíl, rychlost proudění vzduchu a tlak sušícího prostředí.

Teplota vzduchu předurčuje sušenému materiálu stupeň ohřevu, má vliv na vodivost vody ve dřevě i na mechanické vlastnosti dřeva. Se stoupající teplotou je také spojena zvýšená pohybová energie, která snižuje vazebné síly vody vázané ve dřevě (Klement, Detvaj, 2007).

Psychrometrický rozdíl je rozdílem mezi teplotou suchého teploměru (teplota prostředí) a teplotou mokrého teploměru. Tato diference se používá k odvození vlhkosti vzduchu v prostředí.

Rychlost proudění vzduchu se při umělém sušení pohybuje obvykle od 0,5 do 4 m·s⁻¹ (Kafka, 1989). Ovlivňuje přívod tepla dřevu ze sušícího prostředí, odvod vody z povrchu dřeva do prostředí a udržuje potřebné sušící prostředí v sušárně. Má tedy zásadní vliv na velikost koeficientů přestupu vlhkosti a tepla (Klement, Detvaj, 2007).

Sušící prostředí je ovlivněno i tlakem prostředí. Rozdíl tlaku prostředí a parciálního tlaku vodní páry ve dřevě se nazývá spád parciálního tlaku. Tento spád je hnací silou sorpce vody do okolí (Klement, Detvaj, 2007). Tlak prostředí má vliv především na koeficient difuze vody ve dřevě – s rostoucím tlakem prostředí klesá koeficient difuze vody ve dřevě.

3.7.1 Rovnovážná vlhkost dřeva

Rovnovážná vlhkost dřeva (*EMC*) je dána jeho hygroscopicitou – schopností přijímat a vydávat vlhkost v závislosti na změnách teploty a vlhkosti okolního vzduchu. Je-li dřevo dostatečně dlouho v prostředí s konstantní teplotou a relativní vlhkostí vzduchu, dosáhne stavu vlhkostní rovnováhy (Klement, Detvaj, 2007). Aby se dřevo v sušárně vysoušelo, je třeba udržovat takové parametry sušicího prostředí, aby rovnovážná vlhkost dřeva byla vždy nižší než jeho momentální vlhkost.

Pro určení rovnovážné vlhkosti dřeva k danému prostředí se užívá nomogramů, např. dle Keylwerha (1951), tabulek, např. dle *ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva* nebo rovnic pro sorpční izotermy, např. Dentova nebo deBoer-Zwickerova (Horáček, 2008). Pokud je vlhkost dřeva nižší než rovnovážná vlhkost dřeva, dřevo vodu absorbuje z ovzduší, dokud nedosáhne stavu vlhkostní rovnováhy. Je-li jeho vlhkost vyšší než rovnovážná vlhkost dřeva, dřevo vodu desorbuje do okolního prostředí (Horáček, 2008). Absorpce a desorpce vody dřevem jsou vratné procesy, neprobíhají však po shodné křivce.

4 METODIKA

4.1 Řešené numerické modely

V rámci této práce byly sestaveny následující čtyři výpočty pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení, které jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1 Přehled modelů vytvořených v rámci této práce

A. Lineární výpočet	A: s konstantními materiálovými koeficienty
B. Nelineární výpočet (s materiálovými koeficienty závislými na vlhkosti a teplotě)	B.1: bez zohlednění Soretova efektu
	B.2: s konstantním koeficientem Soretova efektu
	B.3: s koeficientem Soretova efektu stanoveným jako funkce vlhkosti a teploty

V následující tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny konstanty a proměnné použité ve výpočtech. V kapitolách 4.2 až 4.4 je popsána metodika sestavení nejsložitějšího z uvedených výpočtů (B.3), ze kterého byly odvozeny i zbývající modely A, B.1 a B.2.

Tab. 2 Přehled parametrů prostředí a materiálových koeficientů použitých ve výpočetních modelech

	A	B.1	B.2	B.3	Jednotky
Prostředí					
φ	$\varphi(t)$				[-]
T_{air}	353				[K]
EMC	EMC(t)				[-]
Materiál					
M_0	0,25	0,25	0,25	0,25	[-]
T_0	293	293	293	293	[K]
ρ_0	420	420	420	420	[g·cm ⁻³]
ρ_M	420	$\rho_M(M)$	$\rho_M(M)$	$\rho_M(M)$	[g·cm ⁻³]
C	1535	C(M, T)	C(M, T)	C(M, T)	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
D_L	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$D_L(M, T)$	$D_L(M, T)$	$D_L(M, T)$	[m·s ⁻¹]
D_T	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$D_T(M, T)$	$D_T(M, T)$	$D_T(M, T)$	[m·s ⁻¹]
D_R	$1,68 \cdot 10^{-9}$	$D_R(M, T)$	$D_R(M, T)$	$D_R(M, T)$	[m·s ⁻¹]
λ_L	0,52	$\lambda_L(M, T)$	$\lambda_L(M, T)$	$\lambda_L(M, T)$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_T	0,20	$\lambda_T(M, T)$	$\lambda_T(M, T)$	$\lambda_T(M, T)$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_R	0,31	$\lambda_R(M, T)$	$\lambda_R(M, T)$	$\lambda_R(M, T)$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
s	-	-	0,222	s(M, T)	[K ⁻¹]
α_M	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	[m·s ⁻¹]
α_T	20	20	20	20	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]

4.1.1 Stanovení počátečních podmínek

Počáteční podmínky, tedy vlhkost a teplota na počátku sušení, byly stanoveny jako rovnoměrně rozložené. Bylo předpokládáno předsušené řezivo bez obsahu vody volné. Počáteční vlhkost byla stanovena jako $M_0=0,25$ a počáteční teplota $T_0=283$ K.

4.1.2 Stanovení parametrů sušícího prostředí dle ON 49 0651

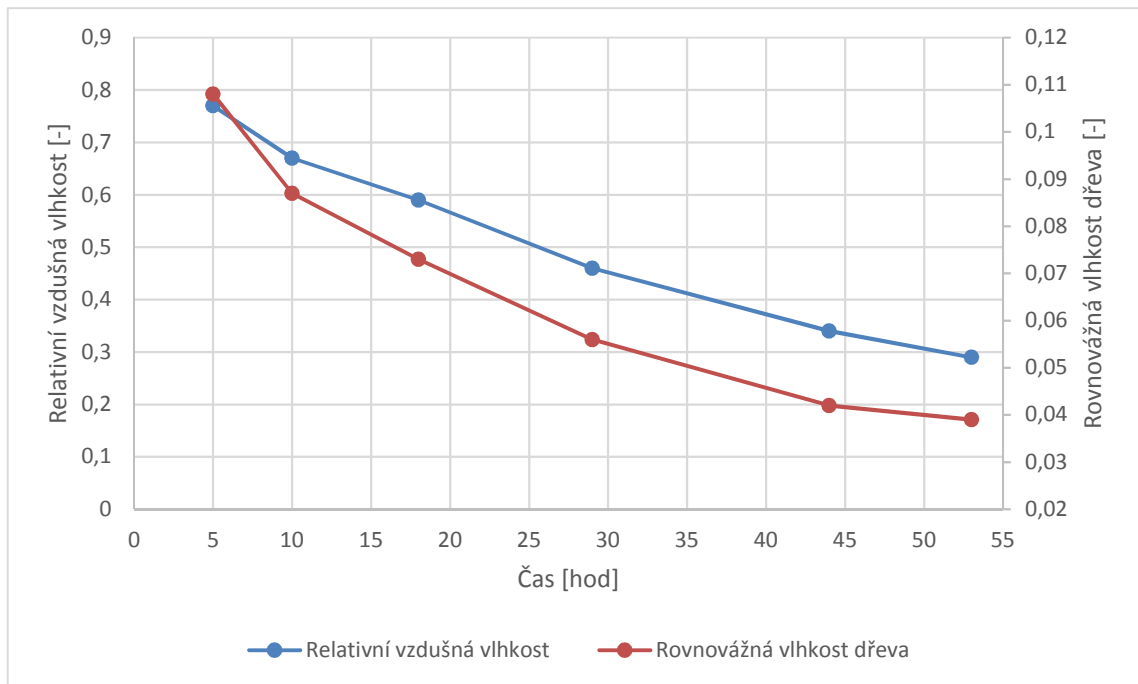
Parametry sušícího prostředí a doba sušení pro modely byly stanoveny dle *ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva*, aby bylo možné srovnání výsledků výpočtů s průběhem sušení popsaným v této normě. Při sestavování tohoto časového sušícího řádu bylo třeba vzít ohled na fakt, že se zabýváme vysoušením řeziva s počáteční vlhkostí nižší, než je mez hygroskopicity, tzv. předsušeného řeziva. Pro něj, dle odstavců 21 a 25 v *ON 49 0651*, platí dvě zvláštní pravidla, a to zvýšení vlhkostního stupně o jeden řád na počátku vlastního sušení po dobu stejnou jako je doba ohřevu a udržování psychrometrického rozdílu 6 °C po celou dobu ohřevu.

Doba ohřevu se stanovuje podle odstavce 26 v ON, který říká, že pro ohřev 1 cm tloušťky řeziva je třeba 1 hodina ohřevu. Při práci s normou je třeba vzít v úvahu také opravné součinitele udávané normou. Pro náš příklad byly použity následující opravné součinitele. Součinitel dřeviny, tedy smrku ($k_1=1,0$) a součinitel rychlosti proudění vzduchu pro rychlost $v_{air}=1,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($k_2=1,0$). Výsledný opravný koeficient má tedy hodnotu $k=1$, proto nemá na čas vlastního sušení žádný vliv. Podrobný popis parametrů sušícího prostředí a přehled sušících časů je přehledně uveden v tabulce (Tab. 3).

Po zohlednění všech požadavků normy na sestavování časového sušícího řádu jsme získali pro vysušení dřeva na požadovanou vlhkost 8 % výsledný čas $t=53\text{ h}$ (190800 s). Teplota prostředí byla pro celou dobu ohřevu i sušení stanovena na $T=80\text{ °C}$ (353 K). Časový průběh *EMC* a φ dle normy je vyobrazen v grafu (Graf 1).

Tab. 3 Sušící parametry prostředí sestavené dle ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva

	Vlhkostní stupeň	T_s [°C]	T_m [°C]	P_r [°C]	t [hod]	t_{celk} [hod]	φ [-]	<i>EMC</i> [-]
OHŘEV	25	80	74	6	5	5	0,77	0,108
VLASTNÍ SUŠENÍ	30–25	80	71	9	5	10	0,67	0,087
	25–20	80	68	12	8	18	0,59	0,073
	20–15	80	63	17	11	29	0,46	0,056
	15–10	80	57	23	15	44	0,34	0,042
	10–8	80	55	25	9	53	0,29	0,039



Graf 1 Parametry prostředí (φ a EMC) v čase dle ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva

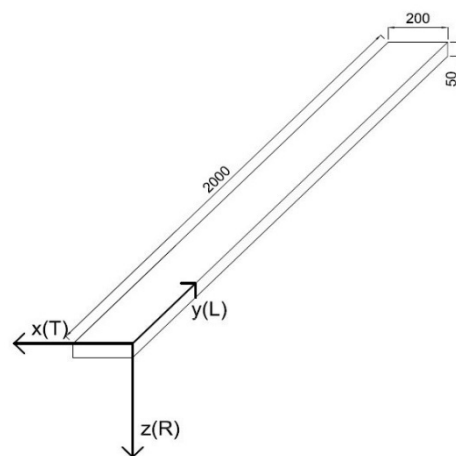
4.2 Zjednodušení situace pro účely výpočtu

Ve všech případech analýzy metodou konečných prvků dochází k jistému zjednodušení modelového příkladu. V tomto případě se jedná o následující zjednodušení:

- Těleso je uvažováno jako speciálně ortotropní (neuvažuje se odklon vláken)
- Je počítáno s rovnoměrně rozloženou vlhkostí i teplotou ve dřevě na počátku sušení
- Koeficienty přestupu vlhkosti a přestupu tepla jsou uvažovány jako konstanty
- Je zanedbán Dufourův efekt
- Zanedbává se vliv deformačního pole a napětí ve dřevě během sušení

4.3 Tvorba geometrie tělesa

Geometrie tělesa byla zadána do klasické kartézské XYZ soustavy. Tangenciální směr T představuje osa x, podélný směr L osa y a radiální směr R osa z. Rozměry tělesa (řeziva) byly pro všechny výpočty stanoveny jako 50x200x2000 mm. Volba geometrie tělesa je znázorněna na obrázku (Obr. 1).



Obr. 1 Geometrie tělesa, pro které byl vytvořen model

4.4 Fyzikální model nelineárního výpočtu se Soretovým efektem

4.4.1 Definované PDR

Jak již bylo uvedeno výše, práce vychází ze dvou difuzních parciálních diferenciálních rovnic (4.1)(4.2), které popisují difuzi vlhkosti (dle II. Fickova zákona) a tepla (dle II. Fourierova zákona). Tyto rovnice již splňují podmínku provázanosti teplotního a vlhkostního pole ve dřevě, a to za využití koeficientu Soretova efektu, dle Horáčka (2004). Ve své finální podobě mají tyto PDR následující znění.

$$\frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{D}\nabla M + s\mathbf{D}\nabla T) = 0 \quad (4.1)$$

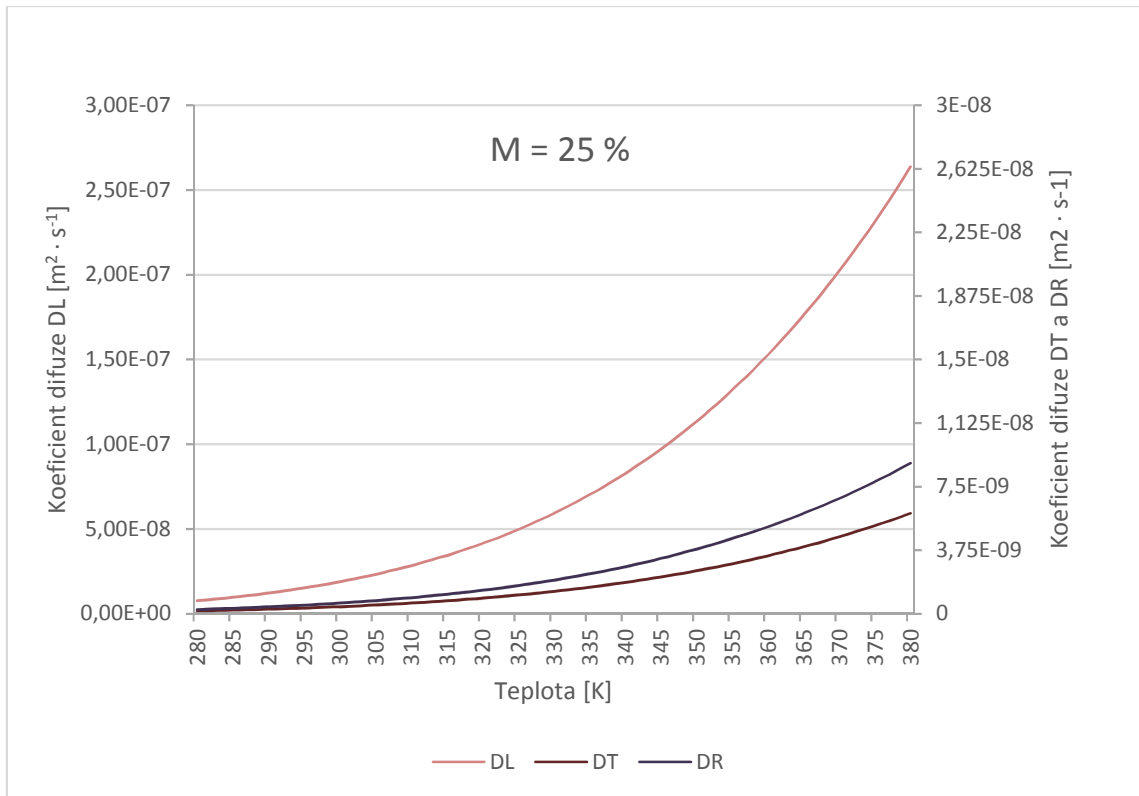
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = 0 \quad (4.2)$$

4.4.2 Stanovení materiálových koeficientů

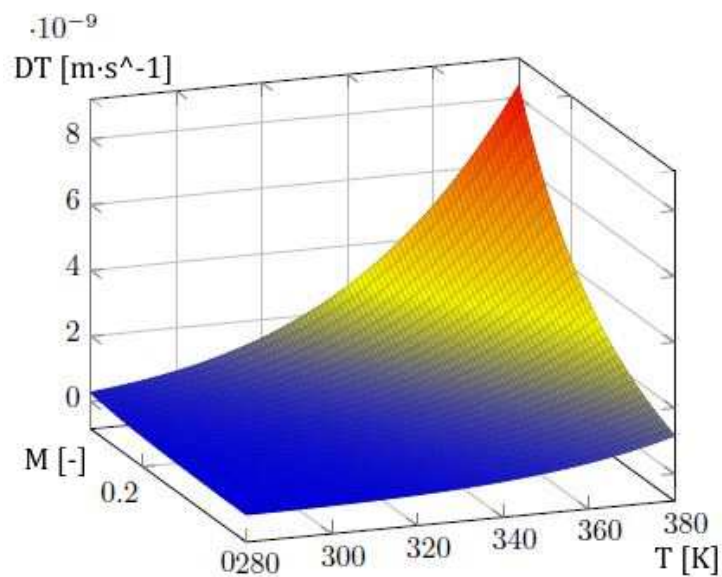
Materiálové vlastnosti jako koeficient difuze, koeficient tepelné vodivosti, měrné teplo aj. byly uvažovány jako funkce závislé na vlhkosti a teplotě materiálu. V následujících podkapitolách je nastíněn postup jejich výpočtu, který byl proveden zčásti v MS Excel (následný import do Comsol Multiphysics) a zčásti přímo ve výpočtovém software Comsol Multiphysics. Plošné grafy byly generovány pomocí on-line programu TeX, resp. TeXonWeb, dostupného z <http://tex.mendelu.cz>.

4.4.2.1 Výpočet koeficientů difuze vody

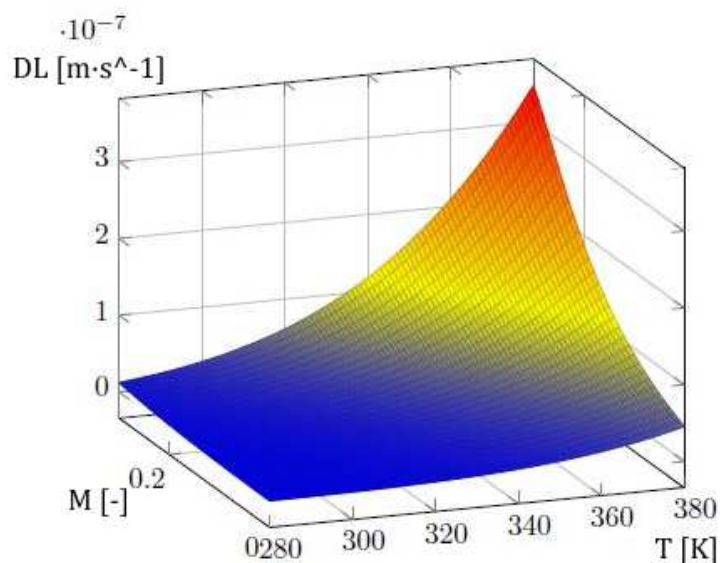
Koeficienty difuze vody byly vypočítány v programu MS Excel pro všechny kombinace vlhkostí $M \in (0; 0,3)$ [-] a teplot $T \in (280; 380)$ [K], a následně byly aplikovány do programu Comsol Multiphysics jako interpolační funkce vlhkosti a teploty. V grafu (Graf 2) je zobrazena závislost koeficientů difuze na teplotě pro všechny ortotropní směry ve dřevě při počáteční vlhkosti 25 %. Vliv teploty a vlhkosti na koeficienty difuze v tangenciálním a podélném směru je znázorněn na obrázcích (Obr. 2, Obr. 3). K největší změně koeficientu difuze vlivem vlhkosti dochází ve směru podélném, zanedbatelná však není ani změna ve směrech příčných.



Graf 2 Difuzní koeficienty v jednotlivých směrech při počáteční vlhkosti $M = 25\%$ v závislosti na teplotě vysoušeného materiálu



Obr. 2 Koeficient difuze v tangenciálním směru v závislosti na M a T



Obr. 3 Koeficient difuze v podélném směru v závislosti na M a T

Pro výpočet koeficientů difuze v tangenciálním, podélném a radiálním směru byly použity následující vztahy dle Horáčka (2004) a Trcaly (2009).

$$D_T = \left(\frac{1}{1 - P_M} \right) \cdot \left(\frac{D_{BT} \cdot D_V}{D_{BT} + D_V \cdot (1 - \sqrt{P_M})} \right) \quad (4.3)$$

$$D_L = \left(\frac{P_M}{1 - P_M} \right) \cdot \left(\frac{D_V \cdot D_{BL}}{D_{BL} + 0,01 \cdot (1 - \sqrt{P_M}) \cdot D_V} \right) \quad (4.4)$$

$$D_R = 3,2 \cdot D_T \quad (4.5)$$

P_M – pórovitost dřeva (-), D_{BT} – koeficient difuze v buněčné stěně v příčném směru ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), D_V – koeficient difuze vodní páry v lumenu ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), D_{BL} – koeficient difuze v buněčné stěně v podélném směru ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pórovitost dřeva zde byla uvažována podle Horáčka (2008) jako závislá na vlhkosti a dosazena vztahem

$$P_M = 1 - \rho_k \cdot \left(\frac{1}{\rho_s} + M \right) \quad (4.6)$$

kde konvenční hustota dřeva je vyjádřena opět dle Horáčka (2008) vztahem (4.7).

$$\rho_k = \frac{\rho_0}{1 + 0,28 \cdot \rho_0} \quad (4.7)$$

Koeficient difuze v buněčné stěně v podélném směru byl zadán následujícím vztahem dle Horáčka (2008).

$$D_{BT} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4.8)$$

E_a – aktivační energie vody vázané daná vztahem $E_a = 38500 - 29000M$ ($J \cdot mol^{-1}$), R – univerzální plynová konstanta ($8,31441 J \cdot mol^{-1} \cdot K$)

Koeficient difuze vodní páry v lumenu byl stanoven podle následujícího vztahu, opět dle Horáčka (2008).

$$D_V = D_a \cdot \frac{0,018 \cdot p_0}{\rho_{BS} \cdot RT} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial M} \quad (4.9)$$

D_a – koeficient difuze vodní páry ve vzduchu ($m^2 \cdot s^{-1}$), p_0 – tlak nasycených vodních par (Pa), ρ_{BS} – hustota buněčné stěny ($g \cdot cm^{-3}$).

Ve výpočtu koeficientu difuze vodní páry byly použity následující vztahy dle Horáčka (2008). Koeficient difuze vodní páry ve vzduchu ($m^2 \cdot s^{-1}$):

$$D_a = \frac{2,2}{p_{atm}} \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,75} \quad (4.10)$$

p_{atm} – atmosférický tlak (101330 Pa).

Tlak nasycených vodních par (Pa) podle Kirchoffovy rovnice je vyjádřen jako:

$$p_0 = e^{53,421 - \frac{6516,3}{T} - 4,125 \cdot \ln T} \quad (4.11)$$

Redukovaná hustota dřevní substance ($g \cdot m^{-3}$):

$$\rho_{BS} = \frac{\rho_s}{1 + \rho_s \cdot M} \quad (4.12)$$

ρ_s – hustota dřevní substance ($1,5 g \cdot m^{-3}$)

Relativní vlhkost vzduchu vyjádřená z rovnice pro deBoer-Zwickerovu izotermu:

$$\varphi = e^{-Ae^{-BM}} \quad (4.13)$$

A , B – deBoer-Zwickerovy koeficienty ($A = 7,7317006 - 0,014348 \cdot T$ a $B = 0,008746 + 0,000567 \cdot T$).

Koeficient difuze v buněčné stěně pro podélný směr podle Horáčka (2008) byl odvozen z koeficientu pro příčný směr podle následujícího vztahu.

$$D_{BL} = 2,5 \cdot D_{BT} \quad (4.14)$$

4.4.2.2 Výpočet koeficientů tepelné vodivosti

Pro výpočet koeficientů difuze tepla bylo v daném numerickém modelu využito následujících vztahů pro tangenciální, radiální a podélný směr, dle Horáčka (2004). Vliv teploty a vlhkosti na koeficient tepelné vodivosti v podélném směru je zobrazen na obrázku (Obr. 4).

$$\lambda_T = \rho_k \cdot (0,217 + a \cdot M) + 0,024 \cdot P_M \quad (4.15)$$

koeficient $a = 0,0040$ koeficient pro $M < 40\%$.

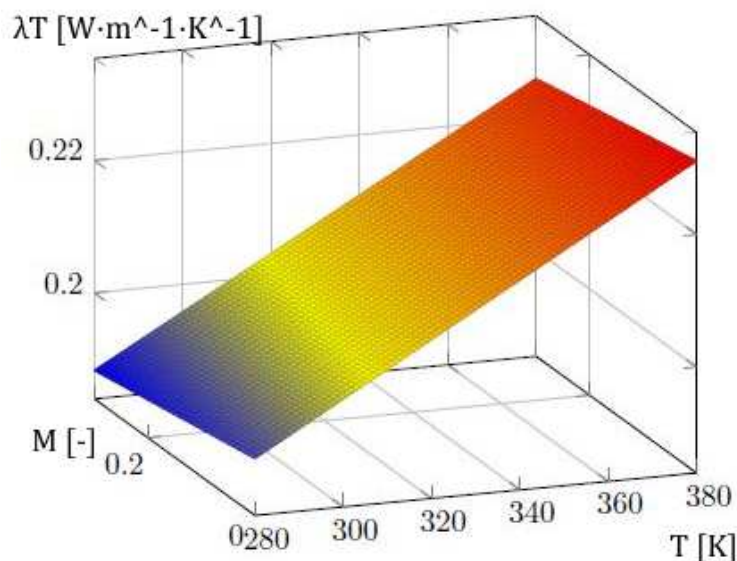
$$\lambda_R = 1,5 \cdot \lambda_T \quad (4.16)$$

$$\lambda_L = 2,5 \cdot \lambda_T \quad (4.17)$$

Závislost těchto vztahů na teplotě byla pro jednotlivé směry vyjádřena dle Trealy (2009) z následujícího vztahu

$$\lambda = \lambda_i (1 + 0,004 \cdot (T - 30)) \quad (4.18)$$

λ_i – koeficient tepelné vodivosti pro jednotlivé směry ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).



Obr. 4 Vliv vlhkosti a teploty na koeficient tepelné vodivosti

4.4.2.3 Výpočet měrného tepla dřeva

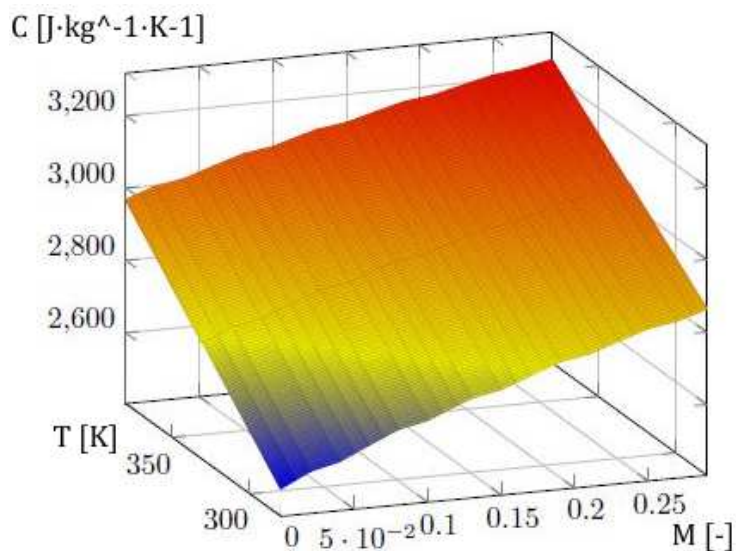
Měrné teplo dřeva bylo uvažováno také jako proměnná závislá na teplotě a vlhkosti. Podle Skaara (1988) byly použity následující vztahy. Tento výpočet platí pro teploty na intervalu 0–100 °C a vlhkosti pod mezí hygroskopicity.

Vliv teploty a vlhkosti na měrné teplo dřeva je zobrazen na obrázku (Obr. 5).

$$C_0 = 1117 + 4,87 \cdot (T - 273,15) \quad (4.19)$$

$$C_M = \frac{C_0 + MC_w}{1 + M} \quad (4.20)$$

C_0 – měrné teplo suchého dřeva ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), C_M – měrné teplo vlhkého dřeva ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), C_w – měrné teplo vody ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).



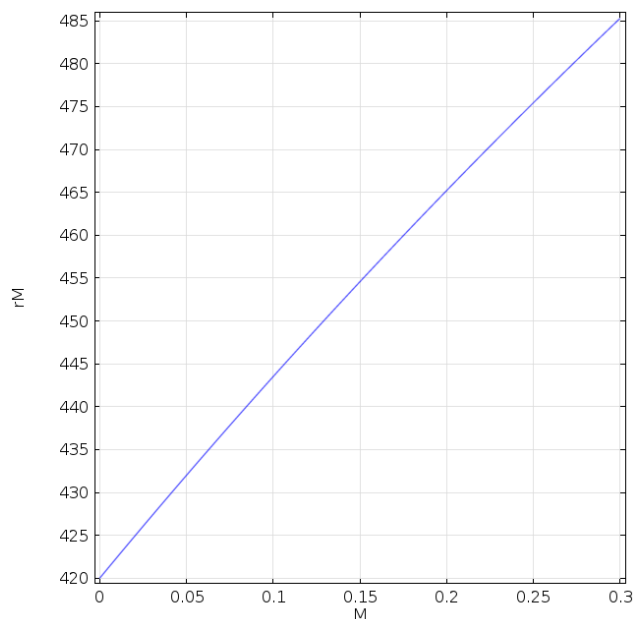
Obr. 5 Vliv vlhkosti a teploty na měrné teplo dřeva

4.4.2.4 Výpočet hustoty dřeva

Hustota dřeva byla definována jako funkce vlhkosti dle Horáčka (2008) vztahem (4.21). Její závislost na vlhkosti je zobrazen v grafu (Graf 3).

$$\rho_M = \rho_0 \frac{1 + M}{1 + 0,993 \cdot \rho_0 \cdot M} \quad (4.21)$$

ρ_M – hustota vlhkého dřeva ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ_0 – hustota suchého dřeva ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

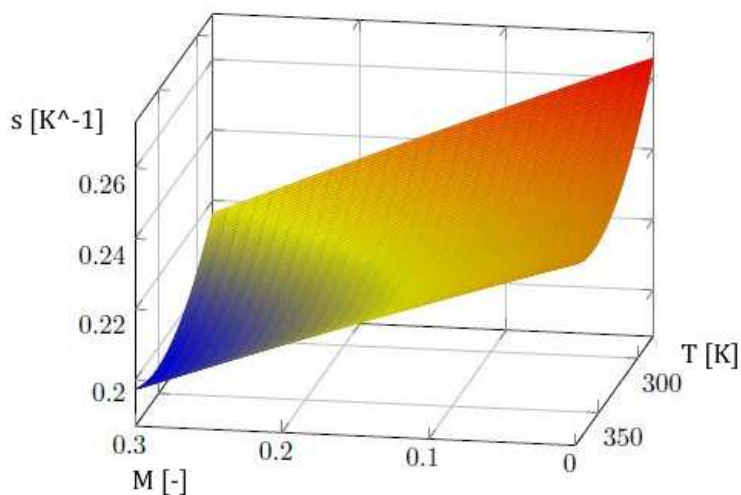


Graf 3 Závislost hustoty dřeva na jeho vlhkosti

4.4.2.5 Výpočet koeficientu Soretova efektu

Výpočet koeficientu Soretova efektu byl proveden v programu MS Excel a do Comsol Multiphysics byl vložen jako interpolační funkce vlhkosti a teploty, jejichž vliv je zobrazen na obrázku (Obr. 6). K výpočtu byl použit vztah (3.12). Tento koeficient byl uvažován jako proměnná závislá na vlhkosti a teplotě, relativní vzdušná vlhkost zde byla vyjádřena z rovnice pro deBoer-Zwickerovu izotermu, jak je popsáno ve vztahu (4.13). Aktivační energie vody vázané byla dosazena z následujícího vztahu:

$$E_a = 38500 - 29000 \cdot M \quad (4.22)$$



Obr. 6 Vliv vlhkosti a teploty na koeficient Soretova efektu

4.4.3 Implementace soustavy PDR do software Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics nabízí několik fyzikálních rozhraní s předdefinovanými PDR, pro různé fyzikální úlohy (Comsol, 2012). V tomto případě bylo využito rozhraní „Coefficient form PDE interface“, do kterého byla nadefinována soustava PDR se dvěma závislými proměnnými – vlhkostí a teplotou. Předpis rovnice v Comsol Multiphysics má následující podobu:

$$\mathbf{e}_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{d}_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (-c \nabla \mathbf{u} - \alpha \mathbf{u} + \gamma) + \beta \nabla \mathbf{u} + \mathbf{a} \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (4.23)$$

$$\mathbf{u} = [M, T]^T \quad \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

V této rovnici jsou \mathbf{e}_a , \mathbf{d}_a , \mathbf{c} , α , γ , β , \mathbf{a} a \mathbf{f} koeficienty závislé na t , x , y , z nebo \mathbf{u} . Dále \mathbf{u} vyjadřuje vektorovou funkci, jejíž složky jsou proměnnými, v tomto případě M a T (Trcala, 2009). Pro zadání naší soustavy PDR byly využity koeficienty \mathbf{c} a \mathbf{d}_a . Koeficient \mathbf{c} byl zadán jako matice složená z jednotlivých submatic, které náleží stanovené soustavě PDR.

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} M \\ T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & s\mathbf{D} \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}, \quad \mathbf{d}_a = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & c\rho_M \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Jednotlivé submatice \mathbf{D} , $s\mathbf{D}$ a λ mají následující podobu:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_T & 0 & 0 \\ 0 & D_L & 0 \\ 0 & 0 & D_R \end{pmatrix}, \quad s\mathbf{D} = \begin{pmatrix} sD_T & 0 & 0 \\ 0 & sD_L & 0 \\ 0 & 0 & sD_R \end{pmatrix}, \quad \lambda = \begin{pmatrix} \lambda_T & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_L & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_R \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

4.4.4 Stanovení okrajových podmínek

Okrajové podmínky byly stanoveny podle rovnic (3.13) a (3.14) a zadány do Comsol Multiphysics pomocí funkce *Flux/Source* v použitém rozhraní s předdefinovanou rovnicí (4.26) pro okrajové podmínky III. řádu.

$$-\mathbf{n} \cdot (-c \nabla \mathbf{u} - \alpha \mathbf{u} + \gamma) = g - q \mathbf{u} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{u} = [M, T]^T \quad \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

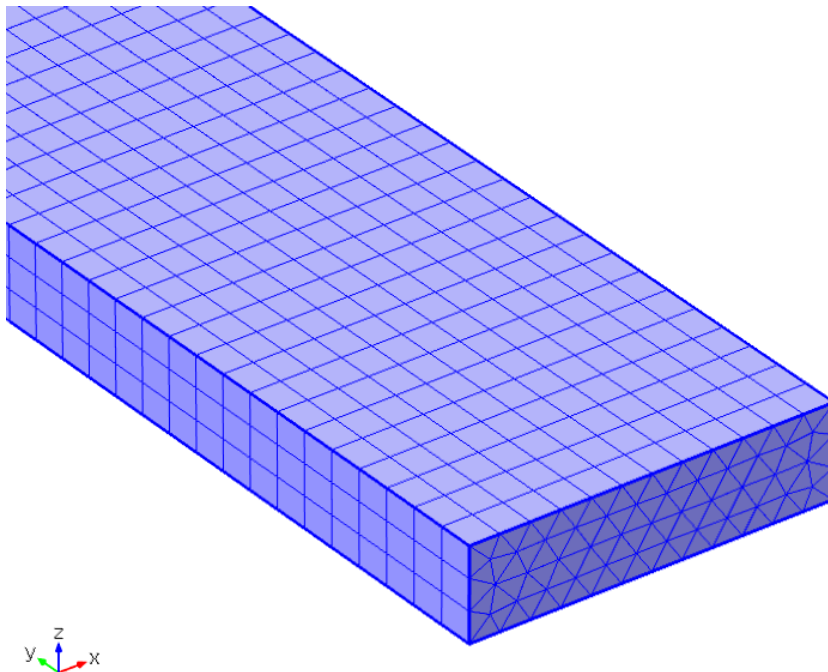
Levá strana rovnice se dosazuje pomocí stejných proměnných jako u rovnice (4.23), pravá strana vyjadřuje okrajovou podmínku, kde g a q jsou popsány vztahy (4.27) a (4.28).

$$g = \begin{pmatrix} \alpha_M EMC \\ \alpha_T T_{air} \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

$$q = \begin{pmatrix} \alpha_M & 0 \\ 0 & \alpha_T \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

4.5 Síť

Těleso bylo vysíťováno strukturovanou sítí pětistěnných hranolů orientovaných svým trojúhelníkovým rozměrem ve směru osy y (Obr. 7). K vytvoření sítě byly použity nástroje *Swept* a *Distribution*. Maximální rozměr prvku byl definován hodnotou 0,02 m, minimální rozměr jako 0,015 m.



Obr. 7 Ukázka použité sítě na části síťovaného tělesa.

4.6 Výpočet

Výpočet byl proveden v Comsol Multiphysics jako časově závislá nelineární úloha s časovým krokem 300 s v celém průběhu (tzn. 636 kroků). K výpočtu byl použit řešič MUMPS.

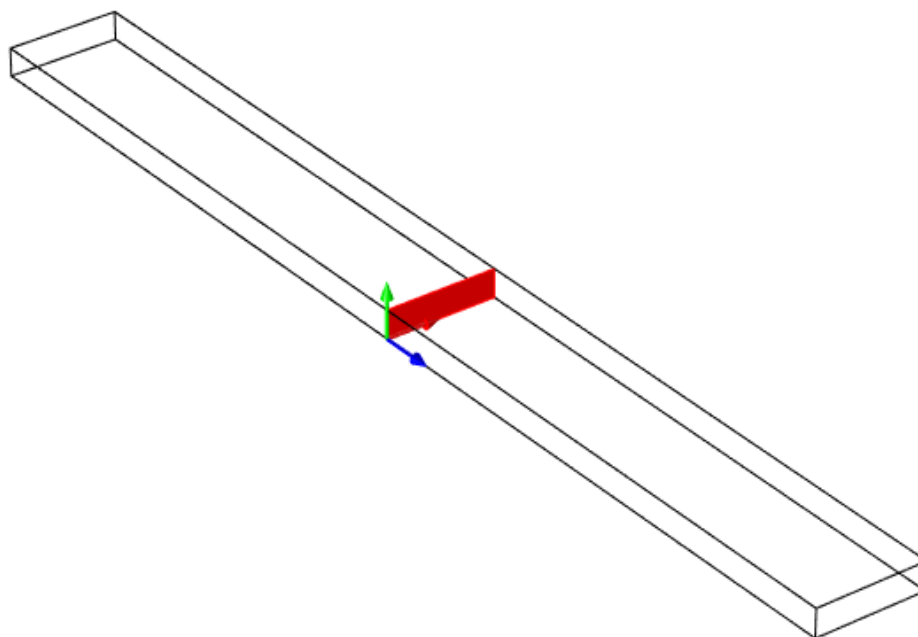
4.7 Výsledky

Postprocessing získaných výsledků byl proveden také v Comsol Multiphysics, ke zobrazení některých závislostí byl použit MS Excel. Vlhkosti v různých časech byly

zobrazovány v 1D bodových a liniových grafech ve čtyřech různých bodech tělesa a na jedné úsečce (Tab. 4). Dále byly vykresleny 2D plošná schémata zobrazující rozložení vlhkosti na středovém řezu tělesem (Obr. 8) pro různé časy. Průměrné vlhkosti a teploty v tělese pro jednotlivé časy byly zjišťovány funkcí pro integraci objemu.

Tab. 4 Souřadnice bodů, úsečky a plochy v tělese, u kterých byl sledován průběh vlhkosti v čase

Bod v tělese	Prostorové souřadnice x, y, z [m]
Střed tělesa	[0,1 1 0,025]
Střed podélné hrany	[0 1 0]
Střed povrchu tělesa (plochy xy)	[0,1 1 0]
Roh tělesa	[0 0 0]
Úsečka v tělese	
Středová úsečka ve směru y	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0,025 \\ 0,2 & 1 & 0,025 \end{bmatrix}$



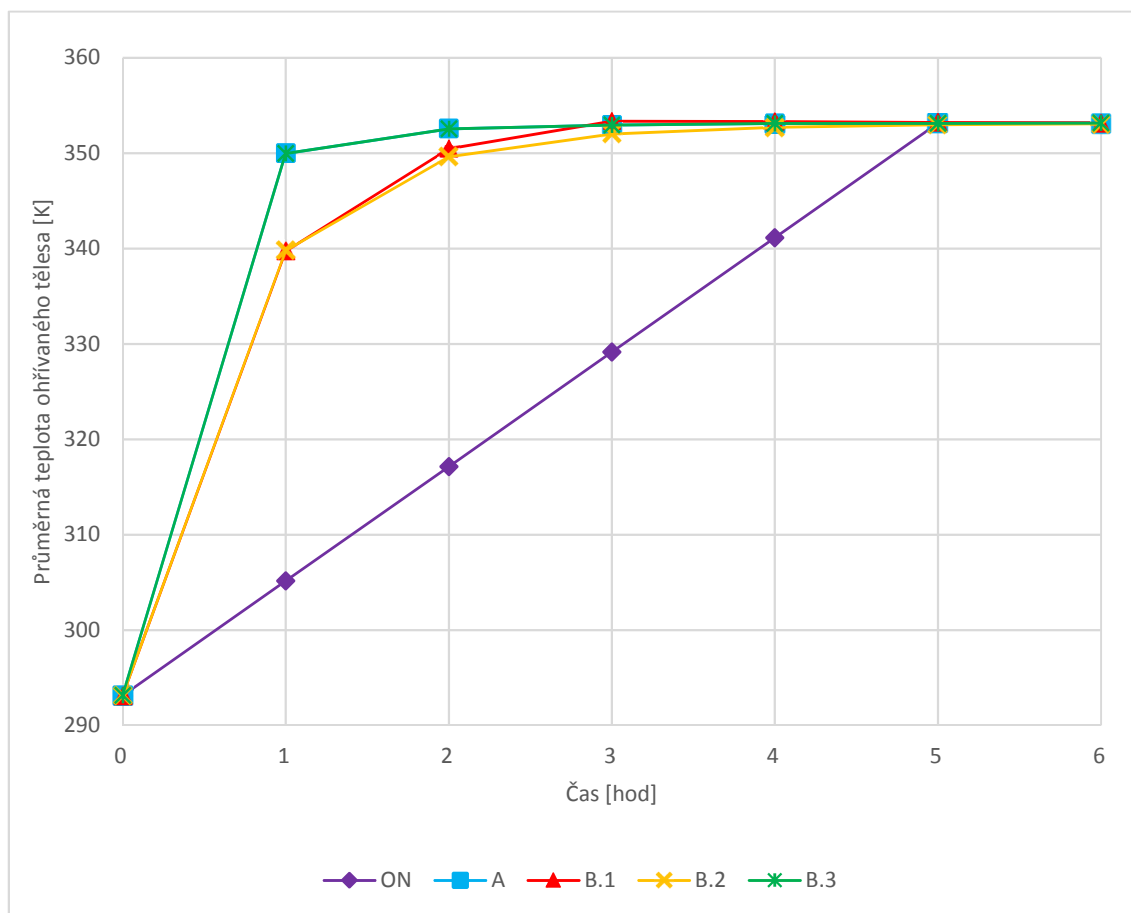
Obr. 8 Středový řez tělesem, na kterém bylo zobrazováno schéma rozložení vlhkosti

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

5.1 Teplotní pole

Teplotní pole ve dřevě během sušení se mění pouze v době ohřevu, poté již zůstává konstantní. Pro srovnání vypracovaných modelů mezi sebou a s normou byl vytvořen graf (Graf 4), který prezentuje, za jak dlouho se řezivo při daných rozměrech a materiálových vlastnostech úplně prohřeje při aplikaci jednotlivých předpokladů. Z výsledků je zřejmé, že zatímco všechny numerické modely říkají, že těleso bude prohřáté již po třech až čtyřech hodinách od zahájení procesu ohřevu, norma předpokládá ohřev o jednu až dvě hodiny delší.

V numerických modelech hraje ve fázi ohřevu významnou roli koeficient přestupu tepla, který je v této práci uvažován jako konstanta, což jistě může způsobit odchylku od reality. Otázkou je, zda by výpočet koeficientu přestupu tepla jako proměnné závislé na vlhkosti a teplotě, měl tak velký vliv, že by se ohřev o dvě hodiny prodloužil a výsledek by se přiblížil době ohřevu udávané normou. Autorka předpokládá, že spíše ne.



Graf 4 Průměrná teplota v ohřívaném tělese v čase dle numerických modelů A až B.3 a dle ON 49 0651.

5.2 Vlhkostní pole

5.2.1 Analýza pohybu vlhkostního pole v různých bodech tělesa

V následujících kapitolách jsou prezentovány a komentovány výsledky v několika bodech sušeného řeziva, ve kterých lze na průběhu vlhkosti sledovat vlivy různých materiálových koeficientů a prostředí. Souřadnice zkoumaných bodů jsou uvedeny v kapitole 4.7, v tabulce (Tab. 4).

5.2.1.1 Průběh vlhkosti ve středu tělesa

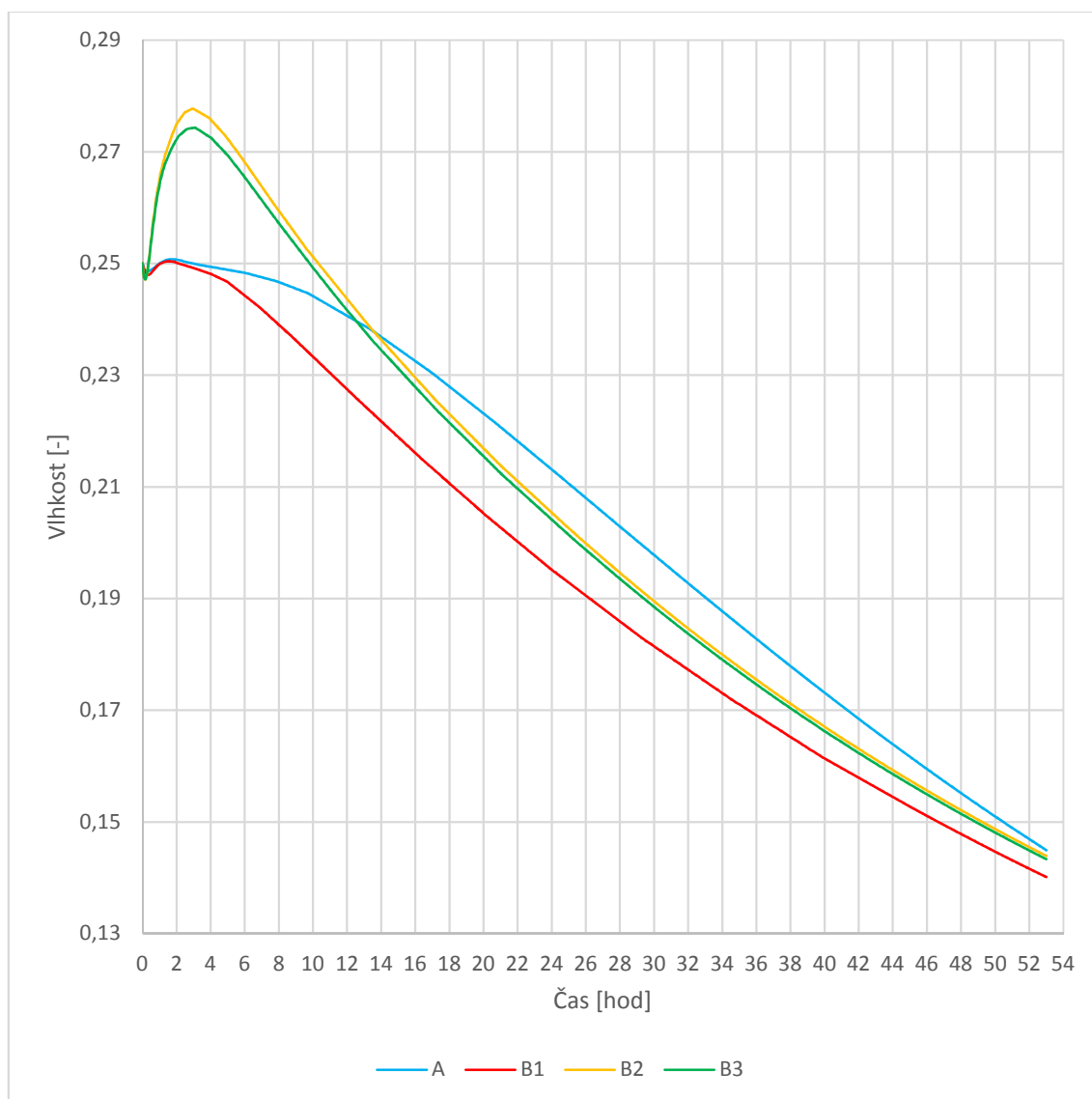
Výsledné křivky průběhu vlhkosti ve středu tělesa ve všech čtyřech vytvořených modelech jsou zobrazeny v grafu (Graf 5). Vidíme, že jednotlivé způsoby výpočtů se nejvíce liší na počátku sušení, tedy v době ohřevu, kdy model lineární (A) a model nelineární bez uvažování Soretova efektu (B.1) předpokládají téměř konstantní průběh vlhkosti, zatímco oba modely se zohledněným Soretovým efektem (B.2 a B.3) vykazují náhlý vzrůst vlhkosti v době ohřevu, který je způsoben termodifuzí. Srovnání vlhkostí na konci ohřevu a na konci vlastního sušení je uvedeno v tabulce (Tab. 5).

Tab. 5 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu tělesa

Bod	Střed tělesa			
	A	B.1	B.2	B.3
Konec ohřevu (3 hod)	25,00 %	24,92 %	27,77 %	27,43 %
Konec sušení (53 hod)	14,50 %	14,01 %	14,39 %	14,33 %

Lineární model (A) předpokládá ve fázi vlastního sušení nejpomalejší trend úbytku vlhkosti a má nejvyšší konečnou vlhkost. Model B.1 předpokládá rychlejší sušení a nejnižší konečnou vlhkost. Modely B.2 a B.3 mají po celou dobu ohřevu i sušení stejný trend, mají i podobnou konečnou vlhkost.

Největší difference mezi jednotlivými modely lze tedy pozorovat na konci ohřevu. Vyšší hodnota u modelů B.2 a B.3 je způsobena vlivem termodifuze – gradient teploty má při ohřevu větší vliv na pohyb vody vázané ve dřevě než vliv gradientu vlhkosti, proto v tomto úseku procesu dochází k hromadění vody ve středu sušeného řeziva. Vysoká difference mezi modely A a B.1 v průběhu sušení je způsobena pravděpodobně vlivem velkého rozdílu difuzních koeficientů zadaných jako konstant a těch určených jako závislých na okamžité vlhkosti a teplotě.



Graf 5 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech v geometrickém středu tělesa

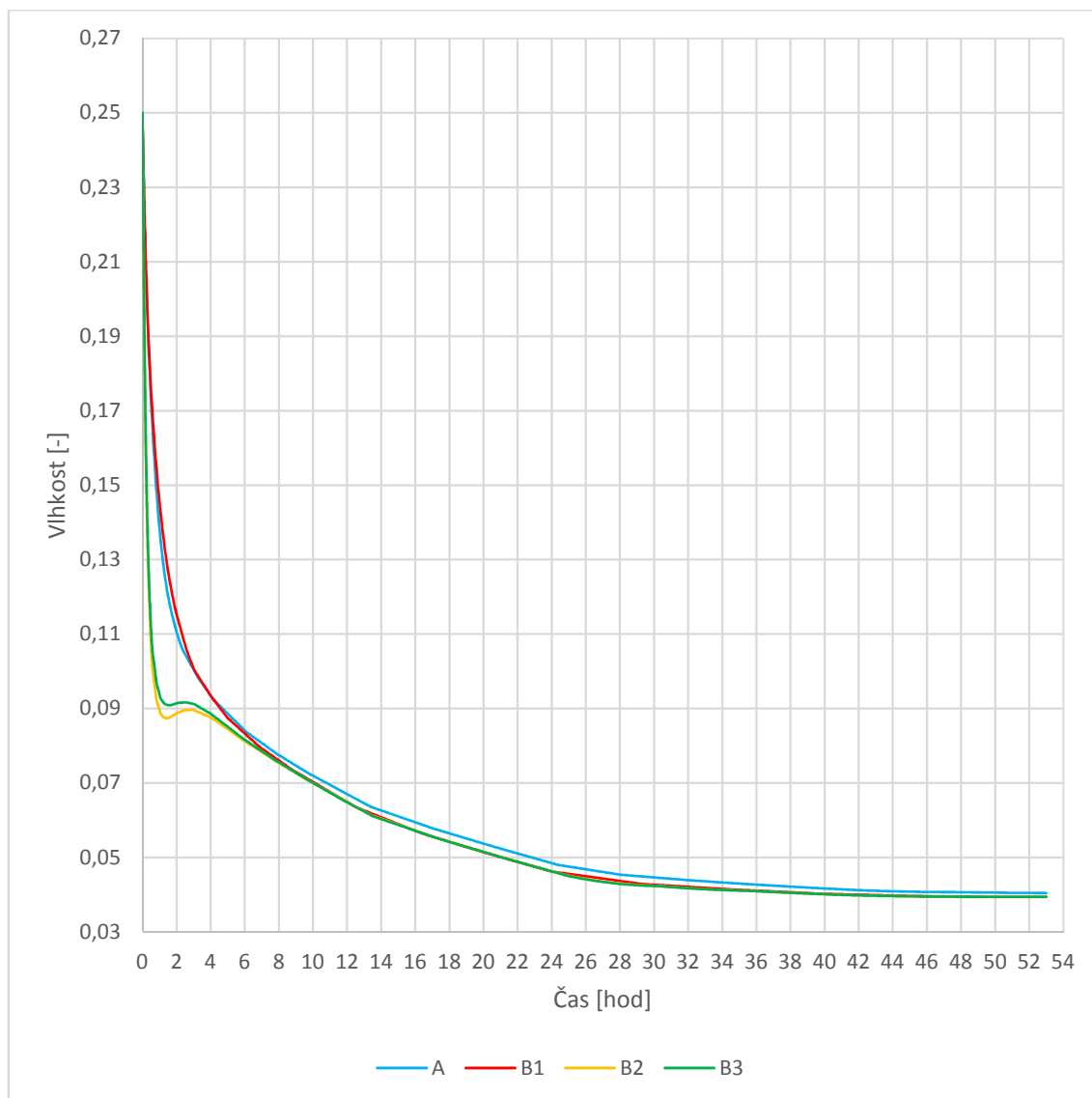
5.2.1.2 Průběh vlhkosti ve středu podélné hrany tělesa

V tabulce (Tab. 6) jsou uvedeny vlhkosti dle jednotlivých modelů na konci ohřevu a na konci vlastního sušení.

Tab. 6 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu podélné hrany tělesa

Bod	Střed podélné hrany tělesa			
	A	B.1	B.2	B.3
Konec ohřevu (3 hod)	10,05 %	10,08 %	8,96 %	9,12 %
Konec sušení (53 hod)	4,04 %	3,94 %	3,94 %	3,94 %

Průběh vlhkosti ve středu podélné hrany tělesa v jednotlivých modelech je zobrazen v grafu (Graf 6). Všechny čtyři křivky mají velmi podobný průběh, významně se liší pouze v průběhu ohřevu. Největší difference je zřejmá v první polovině ohřevu, kdy první dva modely (A a B.1) předpokládají o 4 % vyšší vlhkost než modely B.2 a B.3. Tato difference je způsobena tím, že vlivem termodifuze u modelů B.2 a B.3 dochází k odchodu vlhkosti nejen do okolního prostředí, ale i ve směru do středu sušeného řeziva. Konečná vlhkost u všech těchto modelů se uprostřed podélné hrany tělesa liší pouze nevýznamně.



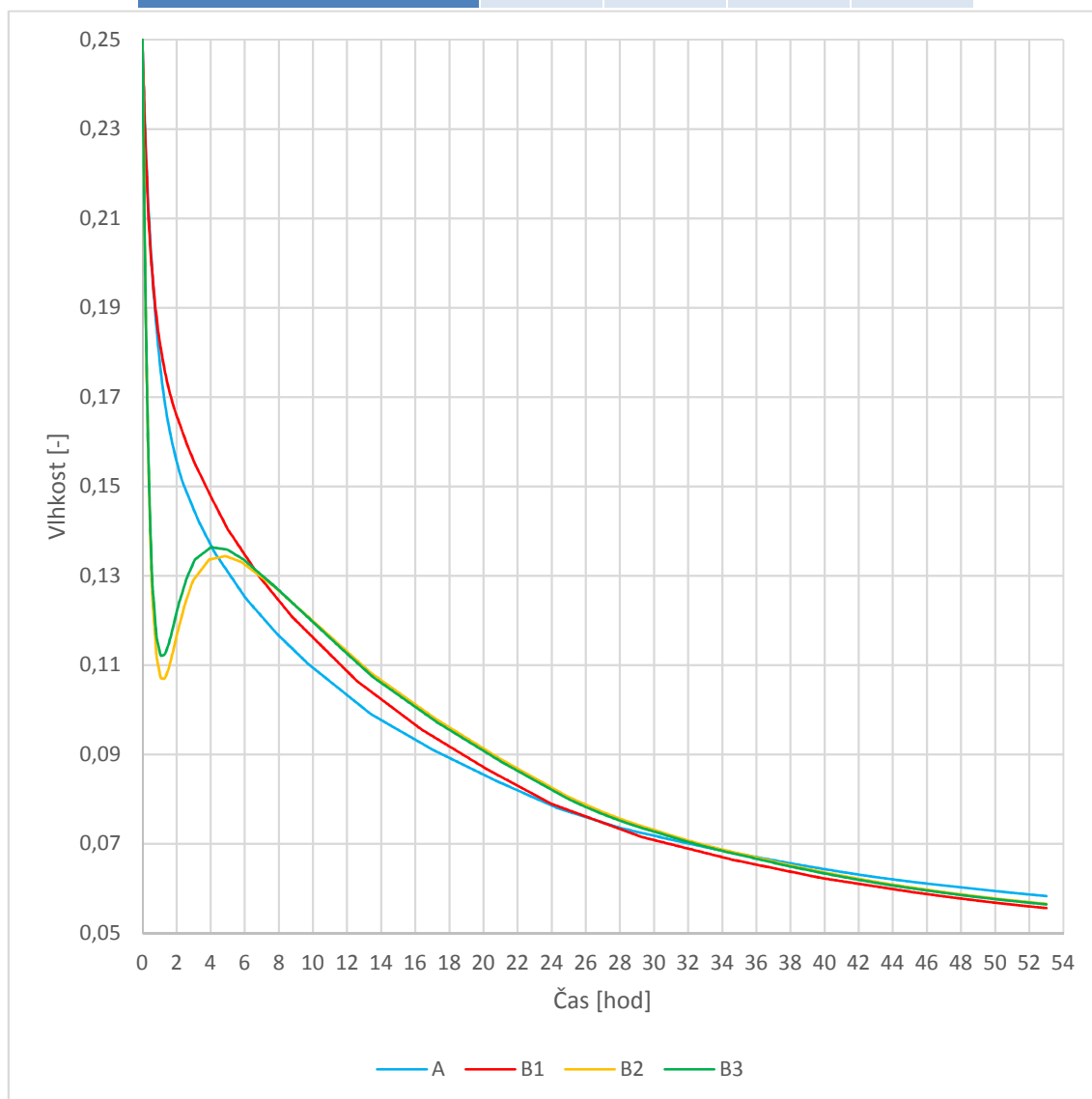
Graf 6 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech uprostřed podélné hrany tělesa

5.2.1.3 Průběh vlhkosti ve středu plochy XY na povrchu tělesa

V tabulce (Tab. 7) jsou uvedeny vlhkosti v jednotlivých modelech na konci ohřevu a na konci vlastního sušení pro tento bod. Lze pozorovat, že vlhkosti na konci ohřevu jsou průměrně o 4,5 % vyšší než u vlhkostí ve stejném čase v bodě uprostřed podélné hrany tělesa (Tab. 6). To je způsobeno větším vlhkostním spádem (a tedy i přestupem vlhkosti do okolí) na hraně než uprostřed plochy tělesa.

Tab. 7 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu plochy XY na povrchu tělesa

Bod	Střed plochy XY na povrchu tělesa				
	Model	A	B.1	B.2	B.3
Konec ohřevu (3 hod)		14,49 %	15,58 %	12,90 %	13,30 %
Konec sušení (53 hod)		5,83 %	5,56 %	5,66 %	5,64 %



Graf 7 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech, v bodě uprostřed plochy XY na povrchu tělesa

Průběh vlhkosti v čase pro jednotlivé modely je opět zobrazen v grafu (Graf 7). Zde se opět projevuje vysoká odchylka mezi modely bez Soretova efektu a modely se Soretovým efektem v první polovině ohřevu, tato diference je ještě významnější než u bodu na hraně tělesa a činí přibližně 6 %. Rozdílné diference u bodu na hraně a bodu v ploše jsou způsobeny tím, že v bodě na hraně tělesa působí proti toku vlhkosti směrem dovnitř tělesa (způsobeným termodifuzí) větší gradient vlhkosti způsobující odchod vlhkosti z tělesa do prostředí než v bodě uprostřed plochy.

Ve stejném grafu lze také pozorovat větší rozdíl mezi modely A a B.1, zejména v prvních dvaceti hodinách sušení. Ten je způsoben pravděpodobně rozdílem koeficientů difuze konstantních v modelu A a proměnných podle vlhkosti a teploty v modelu B.1. Konečně vlhkosti podle všech čtyřech modelů se v tomto bodě liší pouze v řádu desetin.

5.2.1.4 Průběh vlhkosti v rohu tělesa

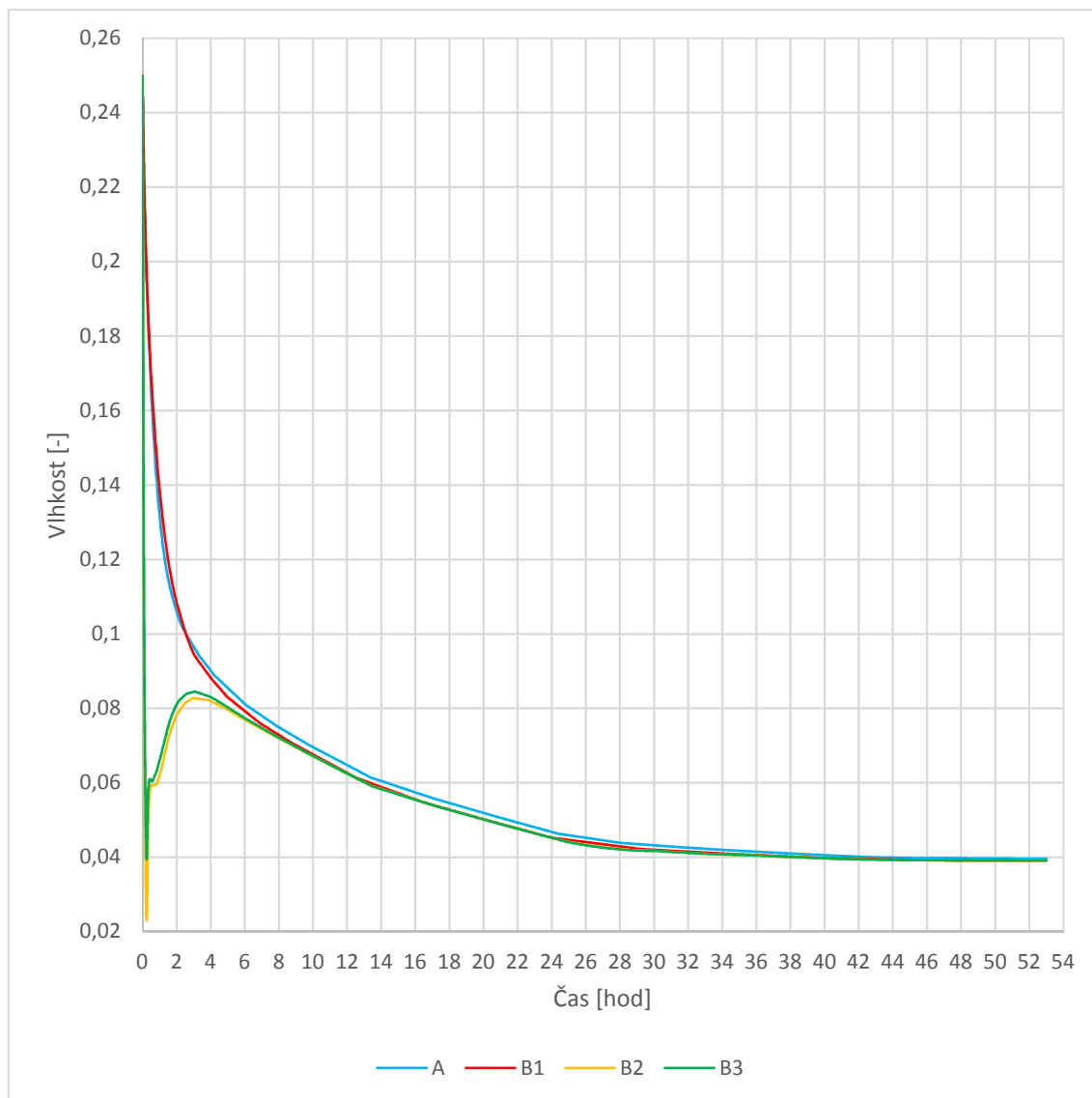
V rohovém bodě je nejnižší vlhkost ze všech sledovaných bodů v tělese v celém průběhu sušení. Vlhkost po skončení ohřevu se dle jednotlivých modelů pohybuje mezi 8,28 a 9,66 %, konečná vlhkost je u všech modelů těsně pod 4 % (Tab. 4).

Tab. 8 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti v rohu tělesa

Bod	Roh tělesa			
	A	B.1	B.2	B.3
Konec ohřevu (3 hod)	9,66 %	9,48 %	8,28 %	8,44 %
Konec sušení (53 hod)	3,96 %	3,92 %	3,92 %	3,92 %

V grafu (Graf 8) můžeme pozorovat velmi prudký trend vysychání hned ihned po začátku ohřevu. Model s koeficientem Soretova efektu závislým na vlhkosti a teplotě (B.3) předpokládá již po ¼ hodině pokles vlhkosti na 3,9 %, model B.2 dokonce na 2,3 %. I u modelů A a B.1 lze hovořit o rychlém vysychání na počátku ohřevu, a to na 19,5 %. U prvních dvou jmenovaných modelů však vlhkost začne opět (již pomaleji) stoupat v důsledku prohřívání dřeva směrem dovnitř (a tím pádem poklesu vlivu termodifuze) a tento trend si drží až do konce ohřevu.

U druhých dvou jmenovaných (A. B.1) vlhkost klesá až do konce vlastního sušení. Rychlý pokles vlhkosti v době ohřevu u těchto dvou modelů je způsoben rychlým prohřevem tohoto rohu tělesa, který způsobí rychlé odpařování ze dřeva do vzduchu.



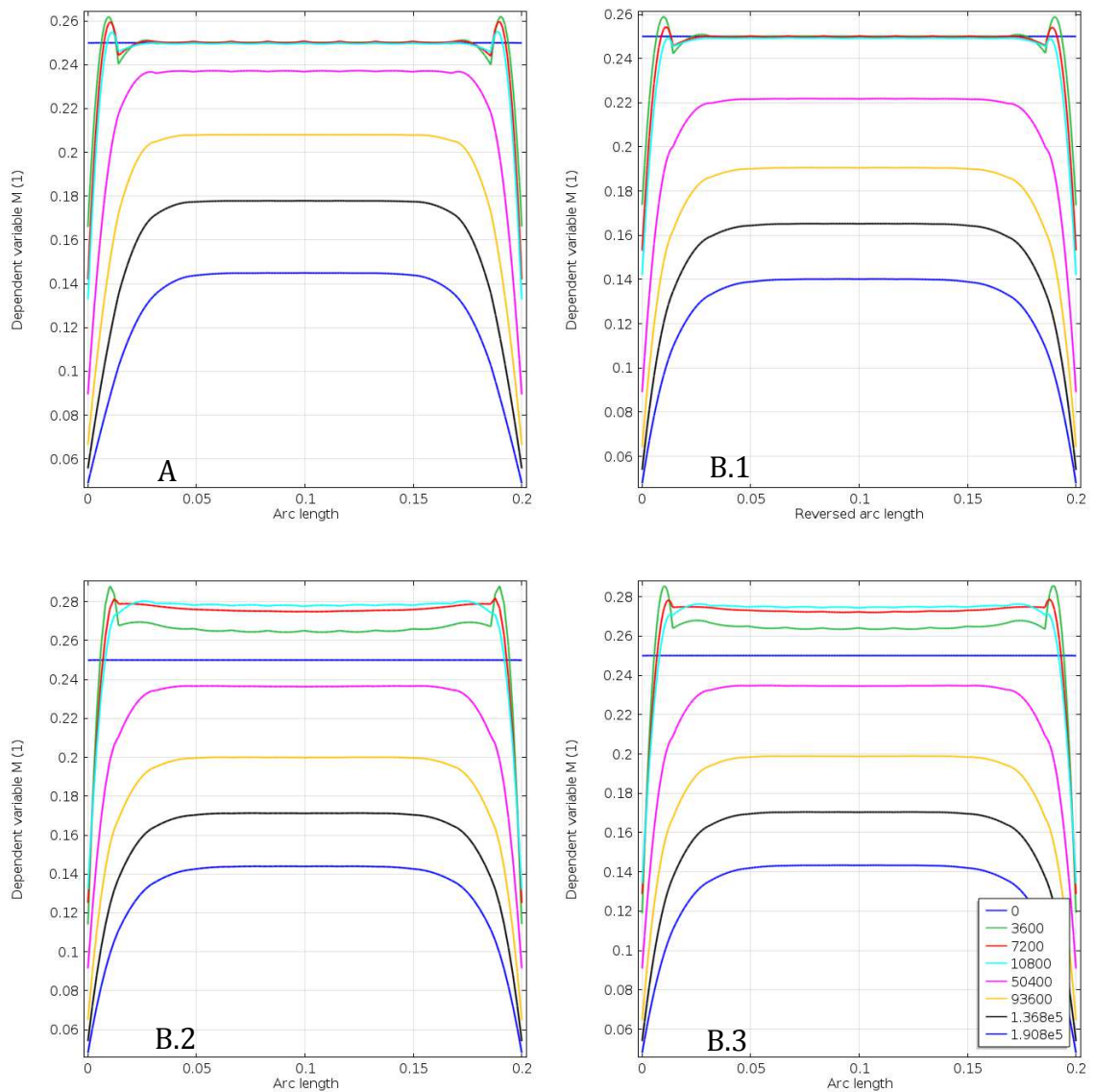
Graf 8 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech v rohovém bodě tělesa

5.2.2 Analýza vlhkosti na středové úsečce tělesa

Na obrázku (Obr. 9) jsou zobrazeny vlhkosti na středové úsečce tělesa ve směru y , v časech 0, 1, 2, 3, 14, 26, 28 a 53 hodin. U prvních dvou modelů bez Soretova efektu (A a B.1) si můžeme všimnout, že v době ohřevu vlhkost neklesá. Blízko okrajů řeziva podle těchto modelů dochází při ohřevu k lokálnímu zvýšení vlhkosti nad počáteční vlhkost, to je způsobeno buď numerickou chybou, nebo pravděpodobně použitím konstantního koeficientu přestupu vlhkosti a jeho poměrem s koeficienty difuze. Tyto konstantní materiálové koeficienty, resp. jejich poměr, se v době ohřevu nejvíce liší od reality (ověřeno v Comsol Multiphysics). Po skončení ohřevu už vlhkost v čase postupně klesá. V konečném čase se vlhkost pohybuje mezi 5 a 14 % u obou těchto modelů a je konstantní v rozmezí $y=0,05-0,15$ m.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

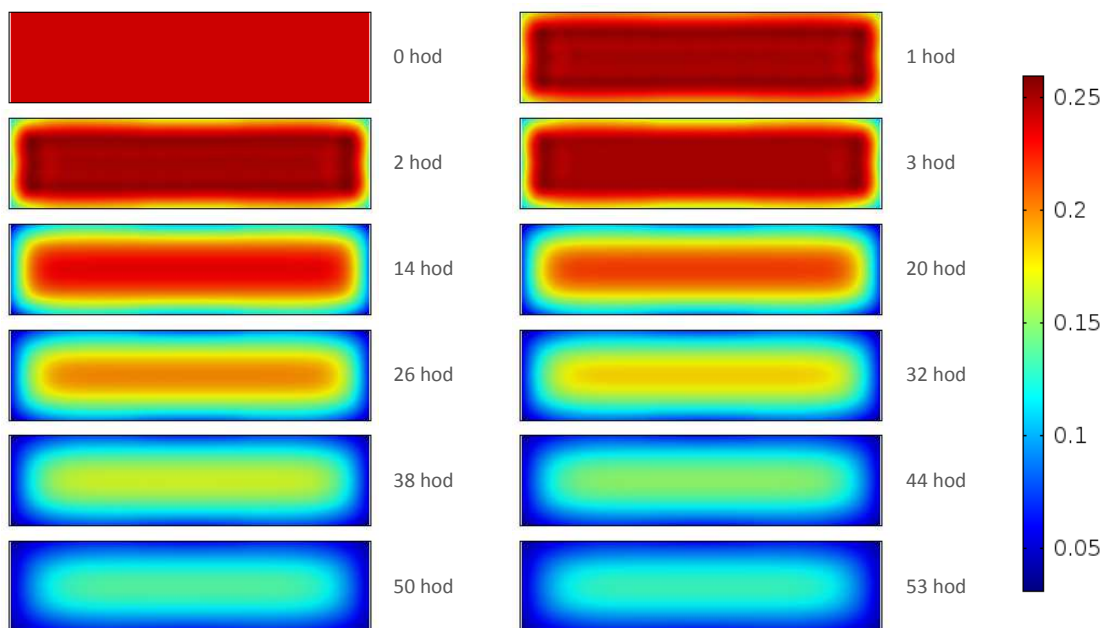
U modelů B.2 a B.3 se Soretovým efektem pozorujeme nárůst vlhkosti v době ohřevu až o 2 %. K tomuto nárůstu dochází z důvodu vlivu termodifuze, vlhkost se přesouvá z okrajových vrstev směrem do středu řeziva, kde se hromadí. Ke zvýšení vlhkosti na okrajích řeziva zde dochází z důvodu vyššího vlivu termodifuze než gradientu vlhkosti. Konečné vlhkosti na této úsečce se pohybují ve stejných hodnotách jako u modelů A a B.1.



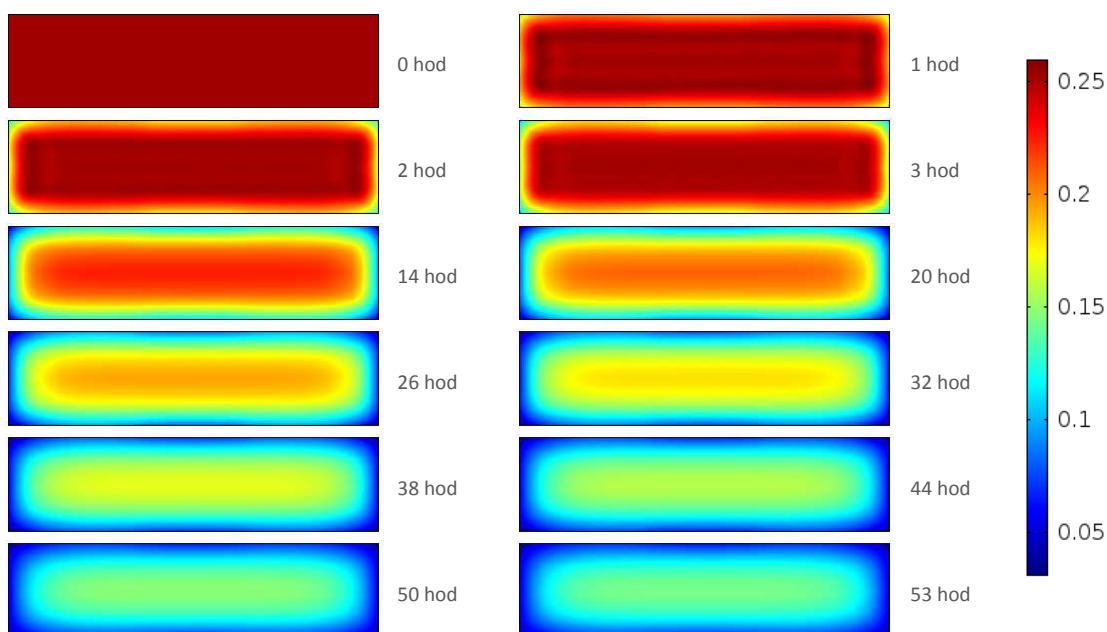
Obr. 9 Průběh vlhkosti ve vybraných časech na středové úsečce tělesem vedené ve směru y (legenda [s])

5.2.3 Analýza pohybu vlhkostního pole na středovém řezu tělesem

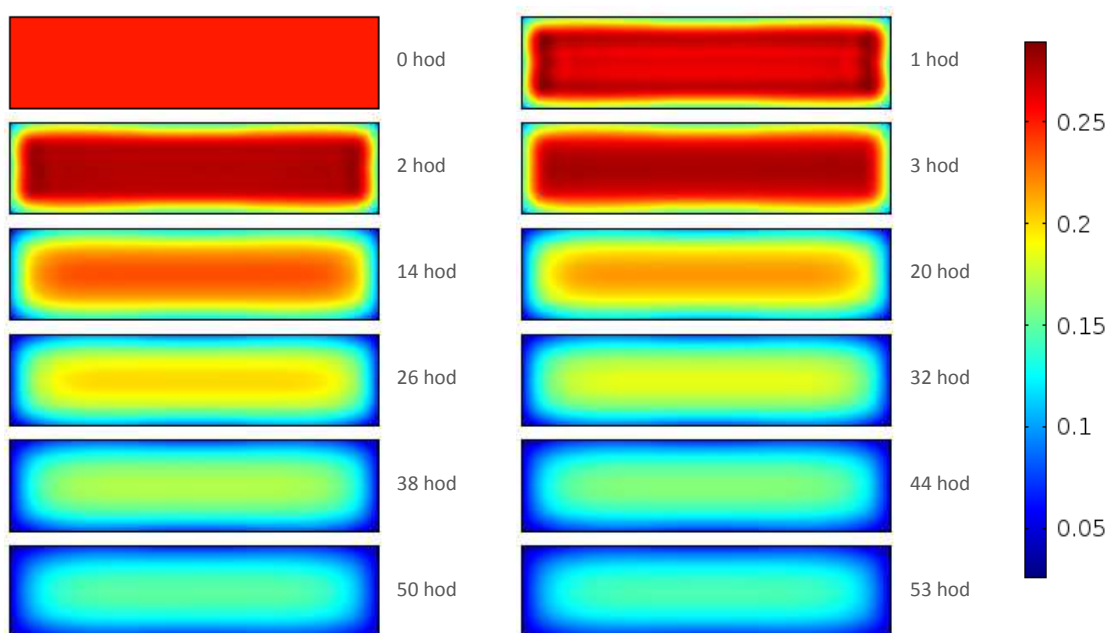
Na následujících obrázcích (Obr. 10, Obr. 11, Obr. 12 a Obr. 13) jsou zobrazena rozložení vlhkosti na středovém průřezu (ve směru yz) ve vybraných časech. Jejich srovnáním můžeme pozorovat, že z tohoto hlediska se jednotlivé modely liší především v době ohřevu, kdy u prvních dvou modelů pozorujeme pomalejší trend snižování vlhkosti na okrajích než u modelů B.2 a B.3. V průběhu vlastního sušení (od 3 hod dále) můžeme říci, že vysoušení probíhá přibližně stejně u všech čtyřech modelů.



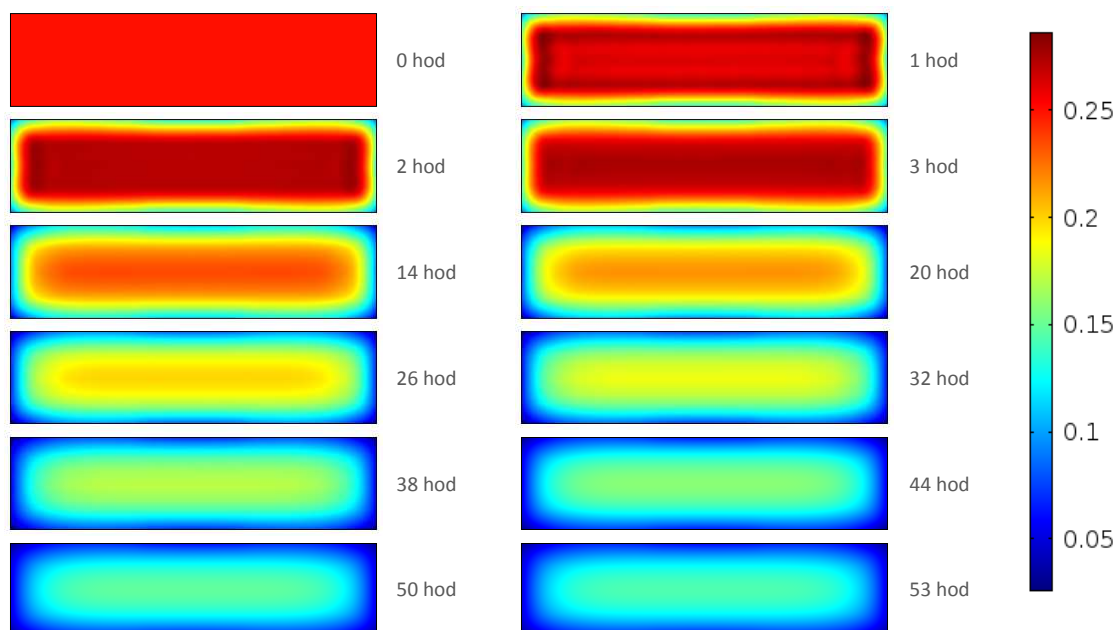
Obr. 10 Model A: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem



Obr. 11 Model B.1: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem



Obr. 12 Model B.2: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem



Obr. 13 Model B.3: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem

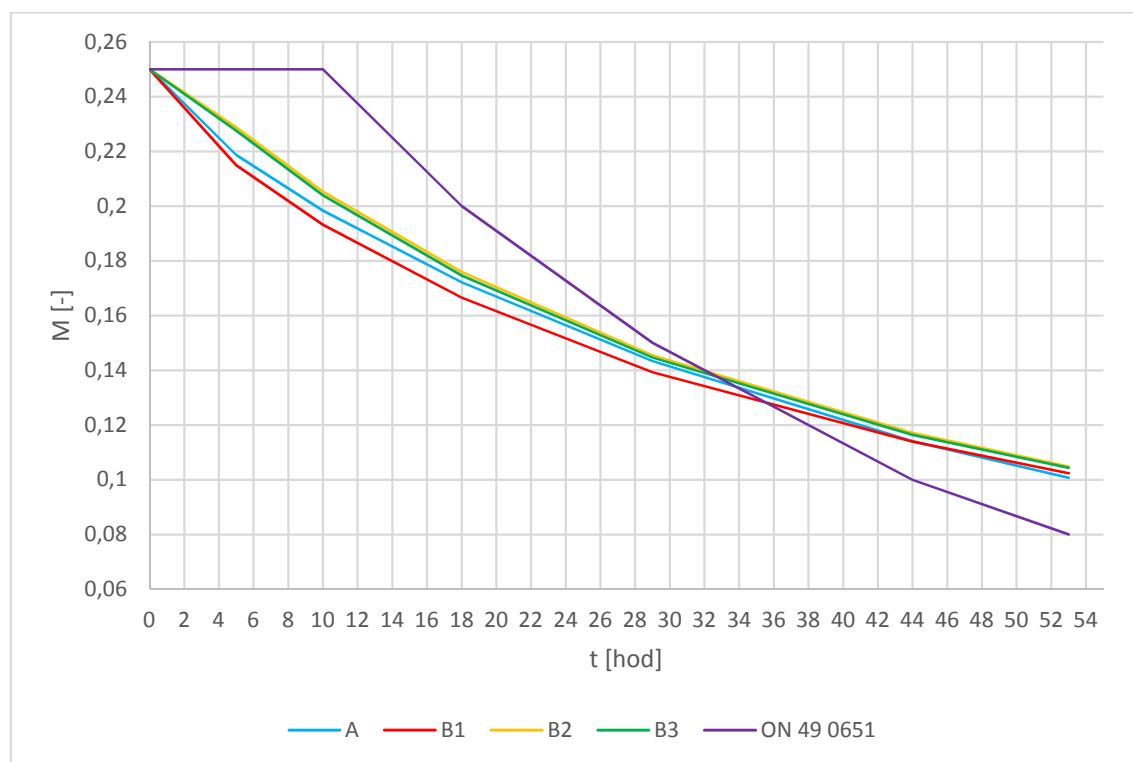
5.2.4 Srovnání průběhu vlhkosti v modelech s ON 49 0651

Tab. 9 Průměrné vlhkosti sušeného řeziva dle jednotlivých modelů a dle normy

t [hod]	A	B1	B2	B3	ON 49 0651
0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
5	0,2187	0,215	0,2288	0,2276	0,25
10	0,1983	0,1932	0,2053	0,204	0,25
18	0,1721	0,1665	0,1759	0,1746	0,2
29	0,1434	0,1393	0,1455	0,1446	0,15
44	0,114	0,1139	0,117	0,1164	0,1
53	0,1007	0,1024	0,1048	0,1044	0,08

V tabulce (Tab. 9) jsou uvedeny vypočítané průměrné vlhkosti dle jednotlivých modelů a předpokládané vlhkosti získané sestavením časového sušícího řádu dle příslušné normy. Zatímco u jednotlivých numerických modelů se průměrné vlhkosti v jednotlivých časech liší maximálně v rámci o 1,38 %, při srovnání modelových hodnot s normovými přicházíme na rozdíl až 5,68 % (v čase 10 hodin, mezi modelem B.1 a normou).

V grafu (Graf 9) jsou zobrazeny křivky průměrných vlhkostí dle jednotlivých předpokladů průběhu vlhkosti během sušení. Můžeme pozorovat, že zatímco dle normy zůstává prvních deset hodin vlhkost konstantní a až poté začíná klesat, modelové hodnoty mají klesající tendenci již od první hodiny procesu. Po desáté hodině sušení začne klesat vlhkost určená dle normy, klesá strměji než vypočtené modely, až je kolem 35. hodiny protne a skončí na nižší vlhkosti, než jaké jsou konečné vlhkosti dle modelů. Ve výsledku bylo zjištěno, že při stanovování vlhkosti pomocí modelů je třeba prodloužit sušící čas, aby bylo dosaženo požadované vlhkosti.



Graf 9 Průměrné vlhkosti v různých časech sušení dle jednotlivých modelů a normy

6 ZÁVĚR

Tato práce byla rozčleněna do tří hlavních bloků. První z nich, *Literární přehled*, shromažďuje základní informace o umělém sušení a jeho teorii, o odvození Fickova a Fourierova zákona, způsobech provázání vlhkostního a teplotního pole ve dřevě a okrajových podmínkách. V kapitole *Metodika* jsou definovány jednotlivé modely, které byly sestaveny v rámci této diplomové práce. Podrobně je popsán postup tvorby nejsložitějšího z modelů (B.3), který popisuje nelineární, nestacionární model sušení dřeva s maximální provázaností vlhkostního a teplotního pole. Od tohoto modelu byly odvozeny i modely jednodušší – A, B.1 a B.2. Zvláštní pozornost byla v této kapitole věnována odvození materiálových koeficientů závislých na vlhkosti a teplotě dřeva. Třetí stěžejní částí práce je kapitola *Výsledky a diskuze*, kde byly z různých hledisek důkladně porovnány jednotlivé modely mezi sebou a s normou *ON 49 0651*. Komplexní zhodnocení výsledků z pohledu autorky je uvedeno v následujících odstavcích.

Při porovnávání modelů A, B.1, B.2 a B.3 mezi sebou a s normou *ON 49 0651* byly kladeny následující otázky:

- Jak nepřesný je lineární výpočet oproti nelineárnímu bez Soretova efektu?
- Jaký vliv na průběh vlhkosti během sušení a celkový sušicí čas má Soretův efekt?
- Jaké nepřesnosti způsobí konstantně zadaný koeficient Soretova efektu ve srovnání s modelem, kde byl zadán jako závislý na vlhkosti a teplotě?
- Jak se liší průběh sušení u modelových případů oproti obecně užívané normě *ON 49 0651*?

Nepřesnost lineárního výpočtu oproti nelineárnímu bez Soretova efektu byla ze sledovaných bodů prokázána především u bodu uprostřed tělesa, v bodech na povrchu tělesa se předpoklad linearit prokázal jako dostačující a výsledky se velice blížily výsledkům z modelu, který předpokládal nelinearitu materiálových koeficientů. Z hlediska průměrné vlhkosti v tělese v průběhu sušení se lineární model lišil od nelineárního ve sledovaných časech (Tab. 9) maximálně o 0,56 %, což se jeví jako relativně nízká hodnota. Můžeme tedy říci, že při vhodně stanovených konstantách pro materiálové koeficienty (zejména koeficienty difuze a tepelné vodivosti) a při potřebě zjišťovat pouze průměrnou vlhkost v tělese, se lineární model jeví jako dostačující. Otázkou je, jak by vypadal průběh vlhkosti vypočtený lineárním modelem s uvažovaným

konstantním Soretovým efektem, zda by se vypočtené vlhkosti také blížily hodnotám z modelů nelineárních.

Z hlediska zkoumání vlivu Soretova efektu na průběh změn a rozložení vlhkosti během sušení a jeho celkový čas, autorka zjistila, že Soretův efekt ovlivní průběh vlhkosti pouze v době ohřevu, dále již pokračuje v podobném trendu jako u modelů bez uvažování Soretova efektu (pro uvažovaný sušící režim cca od osmé hodiny sušení), vlhkost postupně klesá a konečná vlhkost se liší od modelů bez uvažování Soretova efektu pouze v řádu desetin procent. Toto zjištění potvrzuje závěr diplomové práce Trcaly (2009).

Koeficient Soretova efektu zadaný jako konstanta měl ve většině zkoumaných bodů větší efekt na průběh vlhkosti než koeficient Soretova efektu uvažovaný jako závislý na vlhkosti a teplotě. Ve středovém bodě, kdy vlivem termodifuze dochází v době ohřevu k nárůstu vlhkosti byl tento nárůst ve svém maximu o 0,4 % vyšší u modelu B.2 ($s=konst.$) než u modelu B.3 ($s(M, T)$). U bodů na povrchu tělesa byla vlhkost u modelu B.2 vždy nižší než u modelu B.3, v rohovém bodě dokonce o 1,6 %. Otázkou je, zda by tyto rozdíly byly stále takové, i kdyby se konstanta Soretova efektu stanovila přesnější metodou – zde byla uvažována jako průměrná hodnota koeficientů Soretova efektu vypočítaných pro všechny kombinace vlhkostí $M \in \langle 0; 0,3 \rangle$ [-] a teplot $T \in \langle 280; 380 \rangle$ [K]. Autorka se však přiklání k používání koeficientu Soretova efektu závislého na vlhkosti a teplotě, který bude vždy přesněji určovat průběh vlhkosti v době ohřevu.

K největším rozporům mezi předpoklady průběhu sušení došlo při srovnání předpokladů stanovených výpočty s předpokladem daným normou ON 49 0651. Průměrná vlhkost v tělese se liší v celém průběhu sušení, konečnou vlhkost norma předpokládá nižší průměrně o 2,31 % než konečné vlhkosti z výpočtů. Předmětem zamyšlení by tedy měla být otázka, do jaké míry je pravdivý vývoj vlhkosti v průběhu celého sušení stanovený normou. Autorka zastává názor, že reálnému vývoji vlhkosti se nejlépe blíží model B.3, který je nejnelineárnější ze všech sestavených modelů a předpokládá, že k dosažení požadované konečné průměrné vlhkosti v tělese by bylo zapotřebí prodloužit sušící čas stanovený normou.

SUMMARY

The aim of this diploma thesis called *The Calculation of Thermal and Moisture Fields in Wood During Drying* was to create several different unsteady-state numerical models describing the process of kiln drying of lumber, to compare them with each other and with generally used standard for kiln drying of lumber, *ON 49 0651*. The author has developed following four numerical models.

- A. Linear model with constant material coefficients
- B. Non-linear models with material coefficients dependent on moisture and temperature of the lumber:
 - 1. without Soret effect
 - 2. with Soret effect coefficient as a constant
 - 3. with Soret effect coefficient as a variable dependent on moisture and temperature of the lumber

Numerical models and standard were compared from those aspects:

- Extent of inaccuracy of linear model in comparison to nonlinear model without Soret effect.
- The influence of Soret effect on the flow of moisture during drying and on the total drying time.
- The difference between flows of moisture in nonlinear model with Soret effect as constant and nonlinear model with Soret effect as a variable dependent on moisture and temperature.
- The difference between flows of moisture during drying in numerical models and general used standard.

The linear model was qualified like adequately exact, if the only thing observed would be the average moisture in the lumber. In case it is necessary to determine the moisture in various points in the lumber, it is better to use one of the nonlinear models.

It was find out that Soret effect has no impact on the total drying time, but it considerably affects the moisture layout in the time of warming the lumber.

The constant coefficient of Soret effect has more significant effect than coefficient as variable dependent on moisture and temperature. In comparison to the model with

Soret effect as the variable, the model with constant coefficient had higher moisture increase in the middle of the lumber and higher moisture decrease in the surface layers.

The most significant differences were found out between flow of moisture during drying process as modelled in this thesis and flow of moisture during drying process as presented in standard *ON 49 0651*. Model average moisture in the lumber differs from average moisture defined by standard differs during entire time of drying process. The standard defined final moisture at the end of the process is 2,31 % lower than final moisture computed by the numerical models.

The author of this thesis thinks that the most complicated nonlinear model with variable Soret effect coefficient is the most exact premise of the kiln drying process.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

COMSOL. *Comsol Multiphysics User's Guide* [online]. Comsol, 2012. [6. 2. 2017]. Dostupné z: <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/pps-comsol/documents/User%20Guide/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>

DEJMAL, A. *Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1995. ISBN 80-7157-163-6.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. vyd. / . Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-169-2.

HORÁČEK, P. *Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva.*, Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004. ISBN 80-86386-59-7.

KAFKA, E. *Dřevařská příručka, 1. díl*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00009-2

KLEMENT, I., a DETVAJ, J. *Technológia prvostupňového spracovania dreva: [vysokoškolská učebnica]*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. ISBN 978-80-228-1811-7.

ON 49 0651. *Umělé sušení řeziva*. Praha: Ústav pro normalizaci a měření, 1989.

POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

SIAU, John Finn. *Transport Processes in Wood*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-504-12574-4.

SIAU, John F. *Wood: Influences of moisture on physical properties*. Virginia: Virg.Polytech.Institute&State University, 1995. ISBN 0-9622181-0-3.

SKAAR, Christen. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. ISBN 3-540-19258-1.

TRCALA, Miroslav. *Model vázaného pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení*. Diplomová práce. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

TRCALA, Miroslav. Počítačové simulace vázaného teplotního, vlhkostního a deformačního pole ve dřevě. *SilvaNet – WoodNet*. Brno, 2011, 127-128.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Veličina	Jednotky
<i>a</i>	koeficient pro výpočet tepelné vodivosti při $M < 40\%$	-
<i>A, B</i>	deBoer-Zwickerovy koeficienty	-
<i>c</i>	koncentrace vody ve dřevě	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
<i>C</i>	měrné teplo dřeva	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
<i>C₀</i>	měrné teplo suchého dřeva	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
<i>C_M</i>	měrné teplo vlhkého dřeva	
<i>C_w</i>	měrné teplo vody	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
<i>D</i>	koeficienty difuze vody	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>D_a</i>	koeficient difuze vodní páry ve vzduchu	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>D_{BL}</i>	Koeficient difuze v buněčné stěně v podélném směru	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>D_{BT}</i>	koeficient difuze v buněčné stěně v příčném směru	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>D_{T, D_{L, D_R}}</i>	koeficienty difuze v tangenciálním, axiálním a radiálním směru	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>D_V</i>	koeficient difuze vodní páry v lumenu	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
<i>e</i>	Eulerovo číslo	2,7182818
<i>E_a</i>	aktivační energie vody vázané	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$
<i>EMC</i>	rovnovážná vlhkost dřeva	-
<i>j</i>	hustota molekulárního toku	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>k</i>	součin opravných součinitelů pro celkový sušící čas	-
<i>k₁</i>	opravný součinitel dřeviny	-
<i>k₂</i>	opravný součinitel pro rychlost proudění vzduchu	-
<i>K_w</i>	koeficient vlhkostní vodivosti	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>L, R, T</i>	podélný, radiální a tangenciální směr ve dřevě	-
<i>m</i>	hmotnost prodifundované kapaliny	Kg
<i>M</i>	vlhkost dřeva	-
<i>M₀</i>	počáteční vlhkost dřeva	-
<i>n</i>	normálový vektor	-
<i>p₀</i>	tlak nasycených vodních par	Pa
<i>p_{atm}</i>	atmosférický tlak	101 330 Pa
<i>P_M</i>	pórovitost dřeva	-
<i>P_r</i>	psychrometrický rozdíl	K
<i>q</i>	hustota tepelného toku	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
<i>Q</i>	množství tepla	J
<i>R</i>	univerzální plynová konstanta	$8,31441\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
<i>S</i>	plocha	m^2
<i>s</i>	koeficient Soretova efektu	K^{-1}
<i>t</i>	čas	S

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Veličina	Jednotky
T	teplota dřeva	K
T_0	počáteční teplota dřeva	K
T_{air}	teplota vzduchu	K
t_{celk}	celkový sušicí čas	hod
T_m	teplota mokrého teploměru	K
T_s	teplota suchého teploměru	K
v_{air}	rychlost proudění vzduchu	$m \cdot s^{-1}$
x, y, z	prostorové souřadnice	M
α_M	koeficient přestupu vlhkosti	$m \cdot s^{-1}$
α_T	koeficient přestupu vlhkosti	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ	koeficient tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_T, \lambda_L, \lambda_R$	koeficienty tepelné vodivosti v tangenciálním, axiálním a radiálním směru	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	hustota dřeva	$g \cdot cm^{-3}$
ρ_0	hustota suchého dřeva	$g \cdot cm^{-3}$
ρ_{bs}	hustota buněčné stěny	$g \cdot cm^{-3}$
ρ_k	konvenční hustota dřeva	$g \cdot cm^{-3}$
ρ_M	hustota vlhkého dřeva	$g \cdot cm^{-3}$
ρ_s	hustota dřevní substance	$g \cdot cm^{-3}$
φ	relativní vzdušná vlhkost	-

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled modelů vytvořených v rámci této práce	20
Tab. 2 Přehled parametrů prostředí a materiálových koeficientů použitých ve výpočetních modelech	20
Tab. 3 Sušící parametry prostředí sestavené dle ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva....	21
Tab. 4 Souřadnice bodů, úsečky a plochy v tělese, u kterých byl sledován průběh vlhkosti v čase.....	32
Tab. 5 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu tělesa.....	34
Tab. 6 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu podélné hrany tělesa	35
Tab. 7 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti ve středu plochy XY na povrchu tělesa	37
Tab. 8 Tabulka vlhkosti na konci ohřevu a konečné vlhkosti v rohu tělesa.....	38
Tab. 9 Průměrné vlhkosti sušeného řeziva dle jednotlivých modelů a dle normy	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Geometrie tělesa, pro které byl vytvořen model.....	22
Obr. 2 Koeficient difuze v tangenciálním směru v závislosti na M a T	24
Obr. 3 Koeficient difuze v podélném směru v závislosti na M a T	25
Obr. 4 Vliv vlhkosti a teploty na koeficient tepelné vodivosti	27
Obr. 5 Vliv vlhkosti a teploty na měrné teplo dřeva.....	28
Obr. 6 Vliv vlhkosti a teploty na koeficient Soretova efektu	29
Obr. 7 Ukázka použité sítě na části síťovaného tělesa.....	31
Obr. 8 Středový řez tělesem, na kterém bylo zobrazováno schéma rozložení vlhkosti .	32
Obr. 9 Průběh vlhkosti ve vybraných časech na středové úsečce tělesem vedené ve směru y (legenda [s])	40
Obr. 10 Model A: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem	41
Obr. 11 Model B.1: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem	41
Obr. 12 Model B.2: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem	42
Obr. 13 Model B.3: Průběh vlhkosti na středovém řezu tělesem	42

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Parametry prostředí (φ a EMC) v čase dle ON 49 0651 – Umělé sušení řeziva.	22
Graf 2 Difuzní koeficienty v jednotlivých směrech při počáteční vlhkosti $M = 25 \%$ v závislosti na teplotě vysoušeného materiálu	24
Graf 3 Závislost hustoty dřeva na jeho vlhkosti	29
Graf 4 Průměrná teplota v ohřívaném tělese v čase dle numerických modelů A až B.3 a dle ON 49 0651.....	33
Graf 5 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech v geometrickém středu tělesa.....	35
Graf 6 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech uprostřed podélné hrany tělesa	36
Graf 7 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech, v bodě uprostřed plochy XY na povrchu tělesa	37
Graf 8 Průběh vlhkosti v jednotlivých modelech v rohovém bodě tělesa	39
Graf 9 Průměrné vlhkosti v různých časech sušení dle jednotlivých modelů a normy ..	43