

**Mendelova univerzita v Brně**

**Lesnická a dřevařská fakulta**

**Ústav nauky o dřevě**

**NUMERICKÁ SIMULACE PROCESU TERMOSANACE  
STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ**

Bakalářská práce

Zadání

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: *Numerická simulace procesu termosanace stavebních konstrukcí* vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací. Jsem si vědom, 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 o tom, 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 1. 5. 2015

.....

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji firmě Thermosanace s.r.o. za impulz k vypracování této bakalářské práce a za poskytnutí experimentálně měřených dat, pomocí kterých jsem si mohl udělat představu o reálném průběhu teplot ve vybraných místech dřevěných konstrukcí, které byly skutečně v minulosti sanovány. Dále děkuji svému vedoucímu panu Mgr. Ing. Miroslavu Trcalovi, Ph.D. za jeho vedení práce, odborné rady a čas. V neposlední řadě děkuji také svojí rodině a přátelům za jejich podporu nejen ve studiu.

**Autor:** Martin Kučera

**Název:** Numerická simulace procesu termosanace stavebních konstrukcí

### **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá numerickou simulací procesu termosanace dřevěných prvků krovu. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí.

První částí je teoretická část, kde je provedena analýza proudění vzduchu v prostoru sanované konstrukce a přenos tepla z ohřátého vzduchu na dřevěnou konstrukci krovu. K této problematice jsou uvedeny zákony proudění a přenosu tepla.

Druhou částí práce je simulace procesu termosanace na konkrétních případech. Pro danou situaci byly vytvořeny vhodné 2D a 3D modely situací, ve kterých poté proběhla numerická simulace, která byla provedena pomocí softwaru založeném na metodě konečných prvků. Výsledkem jsou grafická znázornění rychlosti proudění vzduchu v okolí sanovaného prvku, rozložení teplot v prostoru sanace a na průřezu prvku samotného. U každé simulace byla měřena teplota ve vhodně zvolených bodech tak, aby bylo možné určit dobu termosanace.

### **Klíčová slova**

Termosanace, metoda konečných prvků, přenos tepla, Fourierův zákon, CFD analýza, proudění vzduchu, Navier-Stokesův zákon

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with the numeric simulation of hot-air treatment of wooden elements of roof truss constructions. The thesis is divided into two main parts.

In the first, theoretical part, analyses of an air-flow in the area of treated construction and a heat transfer from a pre-heated air to the wooden construction are elaborated. Necessary theoretical background - laws of convection and heat transfer are listed.

The second part of this thesis consists of simulations of hot-air wood treatment in particular applications. Appropriate 2D and 3D models of given situations were created and used as inputs for the finite element method analyses. Gained results are graphical depiction of the velocity of air-flow surrounding the treated elements, temperature distribution in their surrounding and cross-section of the elements itself. In order to derive the required time of the treatment process, temperatures in appropriately chosen points have been measured.

## **Keywords**

Hot-air wood treatment, finite element method, heat transfer, Fourier's law, CFD analysis, air flow, Navier - Stoke's law

## Obsah

1	Úvod.....	6
2	Cíl práce .....	7
3	Literární přehled.....	8
4	Metodika .....	13
5	Teorie .....	15
5.1	Přenos tepla.....	15
5.1.1	Přenos tepla kondukcí .....	15
5.1.2	Přenos tepla konvekcí .....	16
5.1.3	Přenos tepla radiací .....	17
5.2	Rovnice pro přenos tepla .....	17
5.2.1	Přenos tepla kondukcí v pevných látkách .....	17
5.2.2	Přenos tepla konvekcí v tekutinách.....	18
5.3	CFD Analýza .....	18
5.3.1	Laminární a turbulentní proudění.....	19
5.3.2	Navier-Stokesovy rovnice .....	19
6	Simulace.....	21
6.1	2D simulace .....	21
6.1.1	2D simulace ohřevu jednoduchého dřevěného prvku .....	21
6.1.2	2D simulace termosanace krovové soustavy.....	23
6.2	3D simulace .....	26
7	Výsledky .....	31
7.1	2D simulace .....	31
7.1.1	2D simulace ohřevu jednoduchého dřevěného prvku .....	31
7.1.2	2D simulace termosanace dřevěného krovu.....	35
7.2	3D simulace .....	40
7.2.1	Situace č. 1 .....	40

7.2.2	Situace č. 2 .....	43
7.2.3	Situace č. 3 .....	46
8	Diskuse .....	51
9	Závěr .....	54
10	Summary .....	55
11	Seznam použitých zdrojů .....	56



# 1 Úvod

Dřevo jako materiál je díky svým vlastnostem předurčeno k využití ve stavebnictví. Již dlouhou dobu je využíváno jako konstrukční materiál pro dřevěné stavby nebo jejich části. Přestože u dřeva převažují kladné vlastnosti, je náchylné na nežádoucí působení vody a vlhkosti. Proto je nutné dřevěné konstrukce před vlhkostí vhodně chránit, jelikož určitá míra vlhkosti dřeva je předpokladem pro napadení biotickými činiteli, jimiž jsou dřevokazné houby a dřevokazný hmyz.

U konstrukcí, kde nebyla provedena řádná ochrana dřevěných prvků, jako jsou starší, či nevhodně ošetřené konstrukce a byly napadeny biotickými činiteli, je nutné zastavit jejich další činnost a do budoucna také konstrukci ošetřit proti opětovnému napadení. Konkrétně to znamená omezení činnosti a usmrcení všech biotických činitelů ve dřevě, po kterém následuje vhodné ošetření například nátěrem, impregnací nebo lepší konstrukční ochranou.

V praxi se používá několik druhů ošetření napadených prvků, z nichž mnohé znamenají značné zásahy do stávající konstrukce, ale existují i metody, které zachovávají původní konstrukci a zastaví činnost biotických činitelů. Jednou z těchto metod je tzv. termosanace, neboli ošetření pomocí horkého vzduchu. Principem je zvýšení teploty v celém průřezu každého prvku konstrukce na teplotu koagulace bílkovin, při které je zahuben dřevokazný hmyz a je tak zastavena jeho činnost. Tato teplota musí být poté udržována v každém jednotlivém prvku konstrukce po určitou dobu.

Mnoho jevů, probíhajících ve dřevě lze v současnosti díky rozmachu počítačových technologií simulovat za použití vhodného softwaru, pracujícího metodou konečných prvků. Za pomoci vhodně zvolené modelové situace lze poměrně přesně simulovat průběhy různých fyzikálních polí v libovolném materiálu při zvolených okrajových podmínkách. Je však nutné brát na zřetel, že situace musí být namodelována dostatečně zjednodušeně, protože například simulace ve třech rozměrech a nestacionární simulace jsou velmi náročné na výpočetní výkon počítače. V tomto případě se jedná o simulace teplotního pole a proudění vzduchu během procesu termosanace za pomoci softwaru COMSOL Multiphysics ve 2D a 3D.

## **2 Cíl práce**

Cílem práce je provedení teoretické analýzy proudění horkého vzduchu kolem sanované dřevěné konstrukce za použití Navier-Stokesova zákona, přenosu tepla ze vzduchu na dřevěnou konstrukci krovu a vedení tepla ve dřevě za použití Fourierova zákona. Dále pomocí vhodně sestavených modelových situací a výpočetního softwaru, využívajícího metodu konečných prvků, simulovat proces termosanace a zjistit časové průběhy teplot ve vybraných místech dřevěné konstrukce. Pomocí výsledků, získaných ze simulace procesu termosanace, poté odhadnout její dobu na různých 2D a 3D příkladech.

### 3 Literární přehled

#### Tepelné vlastnosti dřeva

##### Tepelná vodivost

Tepelná vodivost materiálu může být definována jako tepelný tok, přenesený přes jednotku tloušťky materiálu při různých teplotách obou stran materiálu. Tepelná vodivost materiálu je míra schopnosti materiálu vést teplo. Vysoká hodnota tepelné vodivosti ukazuje, že materiál je dobrý tepelný vodič, naopak nízká hodnota ukazuje, že materiál je špatný tepelný vodič nebo izolant (Cengel 2007).

Siau (1984) uvádí, že tepelná vodivost dřeva je podle Fourierova zákona vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti dle vztahu:

$$\lambda = \frac{q \cdot H}{\Delta T} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (3.1)$$

$q$  – tepelný tok [ $W \cdot m^{-2}$ ],  $\Delta T$  – rozdíl teplot [K],  $H$  – vzdálenost rozdílných teplot [m]

Pro porovnání se dřevem jsou v následující tabulce uvedeny některé běžně používané materiály.

Tab. 1: Součinitele tepelné vodivosti některých materiálů při 20 °C

<b>Materiál</b>	<b><math>\lambda</math> [<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>]</b>
Diamant	2300
Měď	401
Hliník	237
Železo	80,2
Rtuť	8,54
Sklo	0,78
Keramika	0,78
Voda	0,61
<b>Dřevo</b>	<b>0,18 – 0,49</b>
Skelné vlákno	0,043
Vzduch	0,026
Polyuretanová pěna	0,026

Zdroj: Cengel 2007

## Tepelná kapacita

Dřevo, stejně jako každá jiná látka, je schopno teplo akumulovat. Veličinou této vlastnosti je tepelná kapacita ( $c_p$ ). Tato veličina udává množství tepla, které je nutné na ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1 K. Platí:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (3.2)$$

Q – množství tepla [J],  $\Delta T$  – rozdíl teplot [K], m – hmotnost [kg]

Hmotnost absolutně suchého tělesa je hmotnost dřevní substance, proto c nezávisí na druhu dřeva a na hustotě. Pro absolutně suché dřevo při teplotě 0 °C je průměrná hodnota měrného tepla udávána 1,55 KJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup> (Gandelová et al. 2002)

Tab. 2: Tepelné kapacity vybraných materiálů při 20 °C

<b>Materiál</b>	<b>C<sub>p</sub> [J · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>]</b>
Voda	4182
<b>Dřevo</b>	<b>1550</b>
Vzduch	1005
Hliník	910
Keramika	840
Sklo	680
Železo	450
Měď	390
Rtuť	140

Zdroj: The Engineering Toolbox

## Teplotní vodivost

Teplotní vodivost je další materiálovou vlastností, která se objevuje v analýzách vedení tepla. Vyjadřuje rychlost prostupu tepla materiálem a je definována pomocí koeficientu prostupu tepla jako:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

c – tepelná kapacita [J · Kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>],  $\lambda$  - součinitel tepelné vodivosti, [W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>],  $\rho$  – hustota [Kg · m<sup>-3</sup>]

Materiál, který má vysokou tepelnou vodivost nebo nízkou tepelnou kapacitu bude mít samozřejmě vysoký koeficient prostupu tepla. Čím vyšší je prostup tepla, tím rychleji se teplo šíří tělesem. Nízká hodnota prostupu tepla znamená, že většina tepla je absorbována materiálem a malé množství tepla je vedeno dále (Cengel 2007).

Tab. 3: Teplotní vodivost některých materiálů při 20 °C

<b>Materiál</b>	<b><math>\alpha</math> [<math>\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}</math>]</b>
Vzduch	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Měď	$113 \cdot 10^{-6}$
Hliník	$97,5 \cdot 10^{-6}$
Železo	$22,8 \cdot 10^{-6}$
Rtuť	$4,7 \cdot 10^{-6}$
Sklo	$0,34 \cdot 10^{-6}$
Keramika	$0,52 \cdot 10^{-6}$
Skelné vlákno	$0,23 \cdot 10^{-6}$
Voda	$0,14 \cdot 10^{-6}$
<b>Dřevo</b>	<b><math>0,13 \cdot 10^{-6}</math></b>

Zdroj: Cengel 2007

### Termosanace

Dřevokazný hmyz se spolehlivě likviduje zahřátím dřeva v celém průřezu po dobu nejméně 1 hodiny na teplotu nejméně 55 °C. K dosažení této teploty je potřeba tepelný agregát, kterým se do prostoru fouká horký vzduch. Dřevo je špatný vodič tepla, proto je v závislosti na tloušťce dřeva obvykle zapotřebí působit zvýšenou teplotou několik hodin. U větších objektů je nutná kontrola teploty i uvnitř dřeva. Postup likvidace hmyzu pomocí horkého vzduchu je energeticky velice náročný, ale je velmi přijatelný a šetrný k životnímu prostředí. Není nutno měnit napadené díly dřeva, pokud neztratily svoji nosnou funkci. Není prokázáno, zda je po ošetření horkým vzduchem vyloučeno opětovné napadení dřeva hmyzem. Pokud by se po skončení horkovzdušné likvidace prováděla preventivní chemická ochrana, je nezbytné nejdříve odřezat (odsekat) hmyzem poškozený rozpadající se povrch dřeva.

Horkovzdušným ošetřením dřeva se likvidují i dřevokazné houby. Vyžadují však vyšší teploty, hlavně k likvidaci výtrusů. Vlivem horkovzdušného ošetření dochází ve všech dřevěných částech objektu k rychlému vysoušení a tvorbě trhlin. Aby se zabránilo možným škodám na nábytku, omítkách a jinde, je nutné během zahřívání

zabezpečit zvlhčování. Horkovzdušné ošetření dřeva provádí výhradně odborné specializované firmy (Žák, Reinprecht 1998).

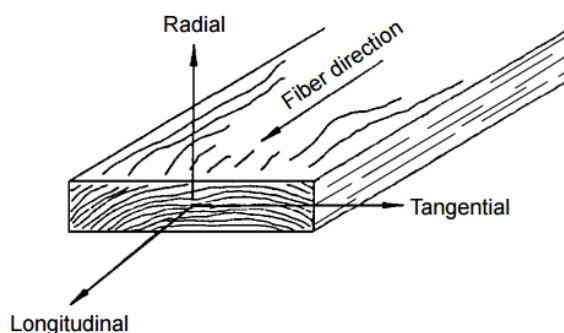
### **Metoda konečných prvků**

Anglicky se tato metoda nazývá Finite Element Method (FEM). Je to metoda numerické matematiky, která umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané soustavou diferenciálních nebo integrálních rovnic, které by nebylo možné řešit analyticky.

Řešená oblast je v metodě konečných prvků postavena z mnoha malých navzájem spojených podoblastí s definovanými bázovými funkcemi, které tvoří tzv. konečné prvky (Rao 2010). Přesné řešení je pak nahrazeno přibližným diskretizovaným řešením (lineární kombinací bázových funkcí nad jednotlivými konečnými prvky) a přesnost tohoto přibližného numerického řešení lze pak ovlivňovat volbou jemnosti sítě nebo volbou stupně polynomu, který tvoří bázovou funkci.

### **Anizotropní charakter dřeva**

Dřevo jako organický, buněčný, pravoúhle anizotropní materiál, vykazuje velmi nerovnoměrné mechanické a fyzikální vlastnosti v různých směrech, které leží ve třech hlavních rovinách L, R, a T (longitudální – L, rovnoběžný se směrem růstu vláken dřeva; radiální – R; tangenciální – T). Další nerovnoměrné rozložení vlastností je způsobeno přírodním původem dřeva a jeho dlouhodobým vystavením povětrnosti během růstu (suky, tahové a tlakové dřevo, jarní a letní dřevo, odklon vláken, atd.). Nejvíce se odlišují materiálové hodnoty pro směr rovnoběžně s vlákny (L), od hodnot pro oba směry kolmo k vláknům (R, T), které se též vzájemně mírně odlišují (Truhlář 2011).



*Obr. 1: Anatomické směry dřeva, zdroj: Wood Handbook 2010*

Gu (2001) uvádí, že v důsledku anizotropních vlastností dřeva bude vedení tepla ve třech anatomických směrech (radiálním, tangenciálním a podélném) odlišné, protože tepelné vodivosti v těchto směrech se liší.

Během fyzikální analýzy a matematického modelování je nutné zvažovat anizotropní strukturu dřeva. Hodnoty koeficientů vodivosti a prostupu tepla v geometrických směrech často nejsou známy. Tyto koeficienty jsou stanoveny (měřením, analytickým odvozením) pouze v anatomických směrech a je nutné je transformovat do geometrických směrů, před vlastním řešením soustav parciálních diferenciálních rovnic (Trcala 2012).

## 4 Metodika

Tato bakalářská práce se dá obsahově rozdělit do dvou částí. První částí práce je teoretický rozbor způsobů přenosu tepla a proudění vzduchu pomocí základních zákonů a rovnic, které tuto problematiku popisují. Druhou částí jsou samotné simulace jednoduchých modelových situací ve 2D a 3D, které popisují průběh termosanace dřevěných prvků krovu.

V teoretickém rozboru jsou uvedeny tři základní způsoby přenosu tepla (konvekce, konduktce, radiace), přičemž největší pozornost je věnována konvekci a konduktci, která je popsána Fourierovým zákonem vedení tepla. K těmto dvěma způsobům přenosu tepla jsou mimo obecných vztahů uvedeny i rovnice, které zpracovává software COMSOL Multiphysics. Dále je uvedena CFD analýza, zabývající se prouděním tekutin, které je popsáno Navier-Stokesovými rovnicemi.

Druhá část práce, zabývající se simulacemi, obsahuje několik rozdílných druhů řešených situací. Simulace jsou provedeny za pomoci softwaru COMSOL Multiphysics, který pracuje metodou konečných prvků. Zadání různých situací, které byly zpracovány, vychází z 2D nebo 3D geometrie, která je importována v běžných CAD formátech nebo může být v omezené míře vytvořena přímo v softwaru COMSOL. Po vytvoření vhodné geometrie, popisující danou situaci, se nadefinují materiály, které jsou této geometrii následně přiřazeny. Definice materiálů může probíhat manuálně, zadáním hodnot, které příslušný simulovaný fyzikální děj potřebuje, nebo lze využít vestavěné knihovny materiálů. V našem případě byl vzduch zvolen jako vestavěný materiál, oproti tomu dřevěné prvky byly definovány manuálně, přičemž bylo přihlédnuto na anizotropii dřeva. Dalším krokem je výběr příslušných fyzikálních modulů, kterými byly *laminar flow* pro proudění vzduchu, *heat transfer in solids* a *heat transfer in fluids* pro přenos tepla ve vzduchu a dřevě. Proudění vzduchu bylo v 2D i 3D simulacích vždy počítáno stacionárně, tudíž se neměnilo v čase. Důvodem je vysoká výpočetní náročnost simulací proudění, jednak z hlediska doby trvání výpočtu, ale také z hlediska náročnosti paměťové. Tato zjednodušení sice vedou k méně přesným výsledkům, ale pro potřeby této práce jsou dostačující. Přenos tepla ve dřevě byl již počítán nestacionárně, čímž vznikla představa o době prohřátí prvku na požadovanou teplotu. Každému z fyzikálních modulů byly poté přiřazeny odpovídající okrajové podmínky a dále byl zvolen vhodný časový krok pro řešení dané situace. Pro vyjádření teplot a rychlosti proudění vzduchu byly použity grafické výstupy ze softwaru COMSOL a dále byly numericky měřeny teploty v bodech,



které se v dané konstrukci prohřejí na požadovanou teplotu jako poslední. Tyto teploty poté byly vhodně graficky interpretovány ve formě grafů, znázorňujících dobu termosanace. Ke grafickým výstupům proudění vzduchu byly dále numericky vyjádřeny hodnoty rychlosti proudění vzduchu v okolí sanovaného prvku krovu. Konkrétně byly zpracovány 3 základní situace:

První nejjednodušší případ je 2D dřevěný prvek, který je ohříván v prostředí horkého vzduchu, přičemž je zanedbáno proudění kolem něj. Výsledkem je doba termosanace a rozložení teploty na průřezu, které můžeme porovnat s výsledky složitějších situací.

Druhým případem je složitější 2D geometrie dřevěného krovu v řezu, která byla vhodně poupravena tak, aby skrze její části mohl proudit vzduch. Ve vhodných místech byla opět měřena teplota, která určila časy termosanace.

Posledním případem je 3D simulace jednoduchých dřevěných prvků, které jsou různě umístěny v prostoru, ve kterém probíhá termosanace. Výsledkem je porovnání časů termosanace stejného prvku, který je odlišně umístěn a vystaven proudění horkého vzduchu.

## 5 Teorie

V našem případě, kdy bude simulováno proudění teplého vzduchu, následný přenos tepla na dřevěný prvek a šíření tepla na jeho průřezu, je zapotřebí tuto situaci popsat jak zákony proudění tekutin, kterými se zabývá CFD analýza, tak i zákony přenosu tepla.

### 5.1 Přenos tepla

Çengel (2007) definuje teplo jako formu energie, která může být v důsledku rozdílu teplot přenesena z jedné soustavy do druhé. Přenos energie ve formě tepla probíhá vždy ve směru od média o vyšší teplotě k médiu o nižší teplotě a zastaví se, když obě média dosáhnou stejné teploty. Teplo může být přenášeno třemi odlišnými způsoby: kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) a radiací (zářením).

Horáček (2008) uvádí, že tepelný tok je možno popsat jako stacionární nebo nestacionární děj. Je-li po celou dobu vedení tepla v tělese konstantní teplotní spád, popisujeme přenos tepla stacionárním dějem, není-li teplotní spád konstantní, mluvíme o nestacionárním přenosu tepla.

#### 5.1.1 Přenos tepla kondukcí

Probíhá-li přenos tepla v hmotném prostředí, jehož objemové elementy zůstávají v klidu, je přenos tepla charakterizován vedením. Tepelný tok v látce je obecně popsán Fourierovým zákonem vedení tepla (Horáček 2008):

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (5.1)$$

$q$  – hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ],  $\lambda$  – koeficient tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],  $\nabla T$  – teplotní gradient [K]

#### Stacionární vedení tepla

Stacionární vedení tepla ve dřevě je popsáno I. Fourierovým zákonem. Nejdůležitější je jeho integrální tvar:

$$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.2)$$

$Q$  – množství tepla [J],  $S$  – plocha [ $m^2$ ],  $t$  – čas [s],  $\Delta T$  – rozdíl teplot [K],  $\Delta x$  – vzdálenost rozdílných teplot [m],  $\lambda$  – koeficient tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

### Nestacionární vedení tepla

Pokud chceme řešit změny rozložení teploty v tělese v čase, je nutné rovnici vedení tepla podle I. Fourierova zákona derivovat podle času a vzdálenosti. (Horáček 2008). Tato parciální diferenciální rovnice je potom II. Fourierovým zákonem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.3)$$

$t$  – čas [s],  $T$  – teplota [K],  $\lambda$  – koeficient tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

#### 5.1.2 Přenos tepla konvekcí

Proudění je přenos tepla hmotným prostředím, jehož objemové elementy vykonávají translační pohyb. Prouděním se tedy popisuje tepelný tok v tekutinách nebo na rozhraní tekutiny a pevné látky. Děj popisuje Newtonův zákon ochlazování:

$$q = \alpha(T_s - T_\infty)S \quad (5.4)$$

$q$  – tepelný tok [W],  $\alpha$  – koeficient přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $T_s$  – teplota povrchu pevné látky [K],  $T_\infty$  - teplota kapaliny [K],  $S$  – plocha, kolmá k tepelnému toku [ $\text{m}^2$ ]

#### Výpočet koeficientu přestupu tepla:

Při volném proudění:

$$\alpha = 1,4 \left( \frac{\Delta T}{2L} \right)^{0,25} \quad (5.5)$$

Při nuceném proudění:

$$\alpha = 3,6 \frac{(\rho v)^{0,6}}{(2L)^{0,4}} \quad (5.6)$$

$\Delta T$  – průměrný teplotní spád mezi prostředím a materiálem [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $v$  – rychlost proudění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $2L$  – tloušťka materiálu [m]

### 5.1.3 Přenos tepla radiací

Sálání je přenos energie mezi dvěma tělesy o různé teplotě pomocí elektromagnetických vln. K přenosu energie není potřeba, na rozdíl od kondukce a konvekce, hmotného prostředí. Základní vztah pro tepelnou radiaci je Stefan – Boltzmanův zákon pro černá tělesa, udávající maximální tepelný tok, který může být emitován tělesem o povrchové teplotě  $T_s$ :

$$q = \sigma \cdot T_s^4 \cdot S \quad (5.7)$$

$\sigma$  – Stefan – Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ ,  $S$  – plocha [ $\text{m}^2$ ],  $T_s$  – absolutní teplota na povrchu tělesa [K].

Skutečné povrchy těles se od ideálního černého tělesa liší, proto je rovnice doplněna o koeficient intenzity vyzařování  $\varepsilon$ , jehož hodnoty se u dřeva pohybují kolem 0,8...0,9. Bereme-li v úvahu také povrch druhého tělesa k uskutečnění tepelného toku, získáme výslednou rovnici:

$$q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) S \quad (5.8)$$

Pro tepelné vlastnosti dřeva nemá sálání téměř žádný význam, s výjimkou ovlivnění koeficientu přestupu tepla  $\alpha$ , který může být díky radiaci zvýšen o  $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  (Horáček 2008).

Požgaj et al. (1993) uvádí, že podíl konvekce a radiace na celkovém přenosu tepla ve dřevě je obvykle malý a pro zjednodušení se celý přenos popisuje jako vedení tepla.

## 5.2 Rovnice pro přenos tepla

### 5.2.1 Přenos tepla kondukcí v pevných látkách

Při simulacích teplotního pole a přenosu tepla rozlišujeme dva druhy přenosu tepla. Prvním z nich je přenos tepla v pevných látkách. Tento proces může být stacionární nebo nestacionární (závislý na čase). Pro oba případy platí tyto rovnice:

Rovnice pro stacionární přenos tepla:

$$0 = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.9)$$

Rovnice pro nestacionární přenos tepla:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.10)$$

$C_p$  – tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $k$  – koeficient tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $Q$  – zdroj tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $T$  – teplota [K],  $t$  – čas [s]

### 5.2.2 Přenos tepla konvekcí v tekutinách

Dalším druhem je přenos tepla v tekutinách. Pro tento druh platí opět stacionární a nestacionární rovnice. Ty jsou analogické k rovnicím přenosu tepla v pevných látkách, s tím rozdílem, že jsou v nich zohledněny práce tlaku a tepelné ztráty.

Stacionární přenos tepla:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.11)$$

Nestacionární přenos tepla:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.12)$$

$C_p$  – tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $k$  – koeficient tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $Q$  – zdroj tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $u$  – rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $\rho$  – hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $T$  – teplota [K],  
 $t$  – čas [s],

## 5.3 CFD Analýza

Pojem CFD je zkratkou počátečních písmen anglických slov Computational Fluid Dynamics, což lze do češtiny přeložit například jako výpočetní dynamika tekutin. CFD je interdisciplinární obor, který kombinuje vědecké poznatky mnoha oborů, především mechaniky tekutin a termomechaniky, ale také fyziky a matematiky obecně a numerické matematiky. Tato kombinace má za cíl, s pomocí softwarového vybavení a výkonné výpočetní techniky, umožnit simulaci fyzikálních dějů nejrůznější komplexnosti (Przeczek 2011).

### 5.3.1 Laminární a turbulentní proudění

Je zřejmé, že proudění o vyšší vstupní rychlosti přenáší větší množství tepla. Proudění je často charakterizováno veličinou, nazývanou Reynoldsovo číslo, které je definováno jako:

$$Re = \frac{\rho_a u_a L}{\mu_a} \quad (5.13)$$

Kde  $u_a$  je průměrná rychlost na vstupu [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $L$  je charakteristický rozměr[m], například výška nebo šířka kanálu a  $\rho$  je hustota na vstupu [ $kg \cdot m^{-3}$ ], a  $\mu_a$  je dynamická viskozita kapaliny [ $Pa \cdot s^{-1}$ ]. Pokud je Reynoldsovo číslo malé a pod určitou kritickou hodnotou, proudění je laminární. Pokud je nad touto kritickou hodnotou, proudění je turbulentní. Kritická hodnota Reynoldsova čísla je přibližně 2000 (Lewis et al. 2004).

### 5.3.2 Navier-Stokesovy rovnice

Matematický model jakékoliv základní dynamiky tekutin je řízen Navier-Stokesovými rovnicemi. Tyto rovnice jsou důležité a představují tekutinu jako spojitě prostředí. Rovnice zachovávají hmotnost, hybnost a energii a mohou být vyjádřeny v integrálním nebo diferenciálním tvaru (Lewis et al. 2004).

Na Navier-Stokesovy rovnice, řídící pohyb tekutin, můžeme nahlížet jako na Newtonův druhý pohybový zákon pro tekutiny. V případě stlačitelné Newtonovské tekutiny získáme:

$$\underbrace{\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right)}_1 = \underbrace{-\nabla p}_2 + \underbrace{\nabla \cdot \left( \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right)}_3 + \underbrace{F}_4 \quad (5.14)$$

kde  $u$  je rychlost proudění [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $p$  je tlak v tekutině [Pa],  $\rho$  je hustota tekutiny [ $kg \cdot m^{-3}$ ] a  $\mu$  je dynamická viskozita [ $Pa \cdot s^{-1}$ ]. Jednotlivé podmínky odpovídají setrvačným silám (1), tlakovým silám (2), viskózním silám (3) a vnějším silám, působícím na tekutinu (4).

Tyto rovnice se vždy řeší společně s rovnicí kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5.15)$$

Navier-Stokesovy rovnice vyjadřují zachování hybnosti, přičemž rovnice kontinuity vyjadřuje zachování hmotnosti (Multiphysics CYCLOPEDIA, [b.r.]).

Ve většině fyzikálních situací, které nejsou natolik zjednodušené, nejsme schopni řešit Navier-Stokesovy rovnice analyticky. Numerická analýza v softwaru jako COMSOL (pracující metodou konečných prvků) je schopna řešit Navier-Stokesovy rovnice zadáním okrajových podmínek, definovaných různými parametry (Meier 2011).

## 6 Simulace

Pro samotné simulace byl použit software COMSOL Multiphysics, který umožňuje řešit metodou konečných prvků, za použití parciálních diferenciálních rovnic, mnoho druhů fyzikálních úloh. Konkrétně byly použity moduly *Laminar flow* pro laminární proudění tekutin (v našem případě vzduchu), *Heat transfer in fluids* pro přenos tepla v kapalinách a *Heat transfer in solids* pro přenos tepla v pevných látkách (dřevo).

### 6.1 2D simulace

Počítačové simulace nejen teplotního pole a proudění vzduchu, ale obecně, jsou velice náročné na výpočetní výkon počítače. Proto se při sestavování modelu dané situace snažíme ušetřit co nejvíce prostředků. Jedním ze způsobů zjednodušení je řešení problému pouze ve dvojrozměrném prostoru, dovoluje-li to řešená situace. V případě, že je řešení ve 2D dostačující, můžeme si dovolit simulaci zpřesnit použitím hustější sítě, nebo řešit složitější případ, byť je znázorněn jen dvojrozměrně.

#### 6.1.1 2D simulace ohřevu jednoduchého dřevěného prvku

Tato jednoduchá simulace se zabývala pouze rozložením teploty na průřezu jednoduchého dřevěného prvku. Nebylo přitom uvažováno proudění vzduchu kolem prvku. Ten byl pouze umístěn v prostředí o teplotě 90 °C a pomocí různých součinitelů přestupu tepla byla simulována doba prohřátí středu prvku na 55 °C.

#### Geometrie

V tomto jednoduchém případě byl výchozí geometrií pro simulaci dvojrozměrný řez dřevěným prvkem o délce 1000 mm a šířce 150 mm.

#### Anizotropie dřeva

Pomocí koeficientů tepelné vodivosti byl prvek definován jako anizotropní, kdy v podélném směru byla zvolena hodnota koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda = 0,223 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a v příčném směru  $\lambda = 0,086 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tyto hodnoty byly převzaty z měření, které provedl Niemz et al (2010).

#### Definice materiálu

Jediným materiálem v této simulaci bylo smrkové dřevo, které bylo manuálně definováno podle hodnot v následující tabulce:



Tab. 4: Definice materiálu pro 2D simulace ohřevu

<b>Smrkové dřevo</b>	
<b>veličina</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Hustota	420 kg · m <sup>-3</sup>
Tepelná kapacita	1650 J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost: podélný směr	0,223 W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
příčný směr	0,086 W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>

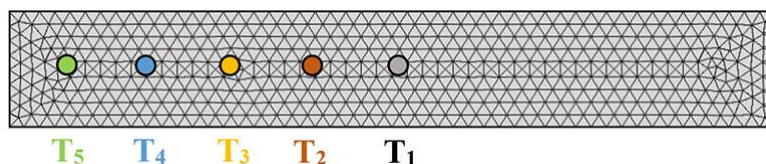
### Okrajové podmínky

Tab. 5: Okrajové podmínky pro 2D simulace ohřevu

<b>Okrajová podmínka</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Teplota prostředí	90 °C
Tlak prostředí	1 atmosféra (101,325 kPa)
Teplota dřevěného prvku	20 °C
Součinitele přestupu tepla:	5 W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup>
	30 W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup>

### Hustota sítě a měření teploty

Díky jednoduchosti vstupní geometrie a samotné simulace je možné pro výpočet použít velmi jemné nastavení sítě. Tím vznikne větší množství konečných prvků a výpočet se zpřesní.



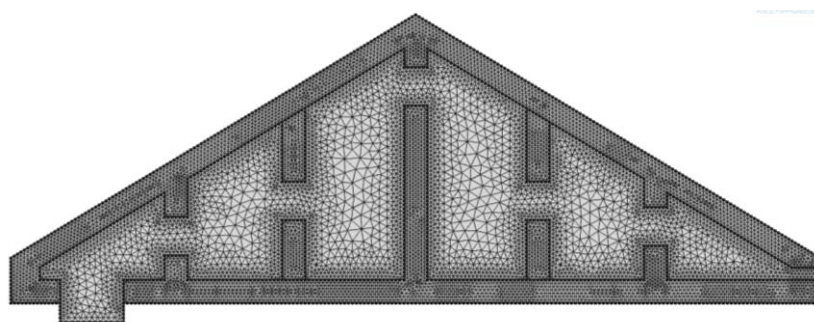
Obr. 2: Hustota sítě a body měření teploty jednoduchého 2D prvku

Měření teplot na podélném průřezu dřevěného prvku probíhalo v pěti bodech, umístěných ve střední části prvku, ve vzdálenostech 100 mm (T<sub>5</sub>), 200 mm (T<sub>4</sub>), 300 mm (T<sub>3</sub>), 400 mm (T<sub>2</sub>) a 500 mm (T<sub>1</sub>). Bude dostačující měřit teploty na jedné polovině prvku, protože hodnoty naměřené na druhé polovině budou prakticky stejné.

## 6.1.2 2D simulace termosanace krovové soustavy

### Geometrie č. 1

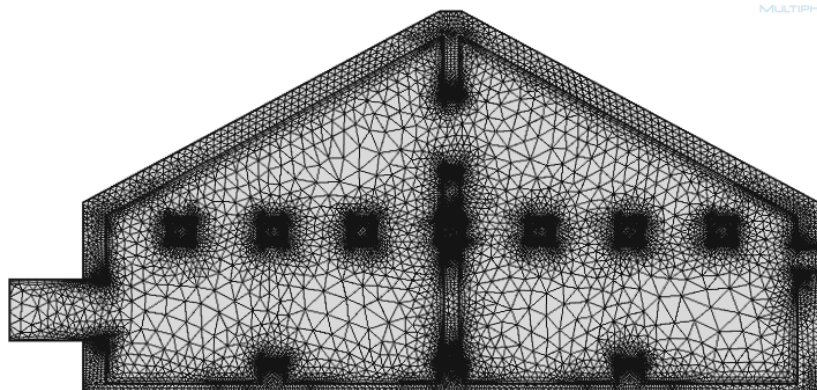
Tato simulace obsahuje složitější dvojrozměrnou geometrii, která znázorňuje řez dřevěnou vazníkovou soustavou, ve které jsou přerušeny některé její prvky, aby mohlo dojít k proudění vzduchu. Z jedné strany je do konstrukce přiváděn horký vzduch rourou o průměru 330 mm a na druhé straně je pomocí otvoru v konstrukci zajištěno proudění vzduchu. Dřevěné prvky mají šířku 150 mm. Pro odlišné fyzikální děje byla zvolena rozdílná hustota sítě. Pro dřevěné prvky to byla jemnější síť pro přesnější vyjádření průběhu teplot a pro samotné proudění hrubší síť, která je dostačující pro určení rychlostního pole proudícího vzduchu.



Obr. 3: Rozdílná hrubost síťování ve složitější 2D geometrii 1

### Geometrie č. 2

Tato simulace představuje řez jednoduchým krovem s trémovým stropem bez záklopu. Prvky krovu a stropu mají opět šířku 150 mm. Uprostřed krovu se nachází sloupek, který je opět přerušen, aby bylo umožněno proudění vzduchu, který je opět přiváděn stejnou rourou o průměru 330 mm. Síť byla opět zvolena hrubší pro proudění a jemnější pro přenos tepla ve dřevě.



Obr. 4: Rozdílná hrubost síťování ve složitější 2D geometrii 2

## Definice materiálů

V celém modelu se vyskytovaly dva materiály. Prostředím, ve kterém simulace probíhala, byl vzduch, který je v softwaru COMSOL obsažen ve vestavěné knihovně materiálů. Tato knihovna mimo jiné obsahuje i několik druhů dřeva. Pro potřeby těchto simulací bylo smrkové dřevo definováno jako materiál manuálně. Jelikož v této geometrii se nachází celá řada šikmých a seříznutých prvků, bylo by obtížné namodelovat anizotropii u jednotlivých prvků tak, aby výsledek byl relevantní. Proto v této simulaci anizotropie není uvažována a všechny dřevěné prvky mají stejnou hodnotu tepelné vodivosti  $\lambda = 0,223 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Vlastnosti definovaného materiálu jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 6: Definice dřeva smrku 2D simulace

<b>Smrkové dřevo</b>	
<b>veličina</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Hustota	$420 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tepelná kapacita	$1650 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost	$0,223 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

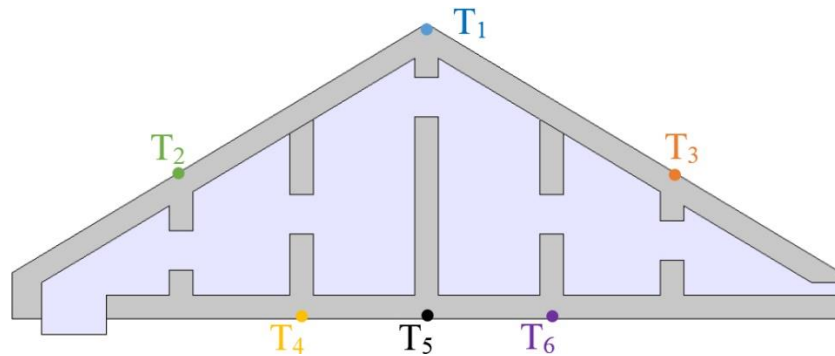
## Okrajové podmínky

Tab. 7: Okrajové podmínky 2D simulace

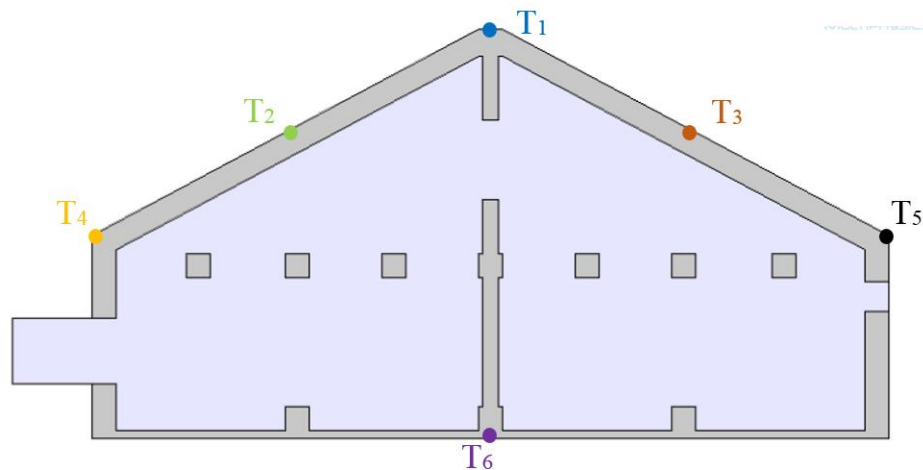
<b>Okrajová podmínka</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Teplota prostředí	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak prostředí	1 atmosféra (101,325 kPa)
Teplota vzduchu na vstupu	$95 \text{ }^\circ\text{C}$
Rychlost proudění vzduchu na vstupu	$0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## Měření teploty

Ve vybraných částech krovu byly měřeny teploty v čase tak, aby poté bylo možno sestavit dobu termosanace z času prohřátí posledního bodu na 55 °C. Umístění bodů pro měření teploty je znázorněno na následujících obrázcích:



Obr. 5: Body měření teploty ve složitější 2D simulaci 1



Obr. 6: Body měření teploty ve složitější 2D simulaci 2

## Průběh simulace

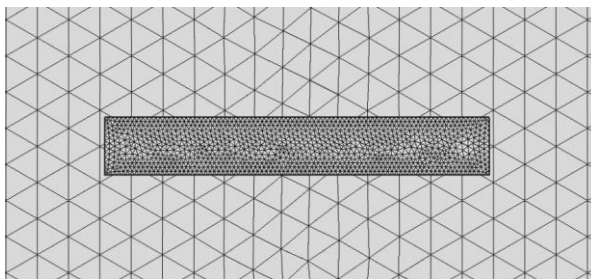
Samotná simulace se skládala ze dvou provázaných částí. První částí je stacionární výpočet proudění vzduchu, ze kterého se získá rychlostní pole pro následný výpočet přenosu tepla v proudícím vzduchu a ve dřevěných prvcích. Zatímco simulaci proudění stačí vypočítat stacionárně, protože se ustálí za velice krátký čas, simulace přenosu tepla je vypočítána nestacionárně, s časovým krokem 2 minuty. Ze získaných časů prohřátí v jednotlivých bodech byla stanovena doba termosanace tak, že se přičetla jedna hodina, po kterou musí být v prvku udržována teplota 55 °C.

## 6.2 3D simulace

Trojrozměrné simulace jsou mnohem náročnější na výpočetní výkon, než dvojrozměrné, proto byla v tomto případě řešena jednodušší geometrie. Proudění vzduchu je opět vypočítáno stacionárně a samotný přenos tepla nestacionárně. Zároveň je možné definovat dřevo jako anizotropní materiál a zadat odlišné parametry v jeho třech anatomických směrech. Tím získáme přesnější představu o ohřevu dřevěného prvku na jeho průřezu.

### Geometrie

Jako vstupní geometrie sloužil dřevěný prvek o rozměrech  $150 \times 150 \times 1000$  mm, který byl definován jako smrkový. Tento dřevěný prvek byl umístěn do kvádrového prostoru o rozměrech  $1000 \times 2000 \times 3000$  mm, do kterého byl přiváděn horký vzduch potrubím o průměru 330 mm a odváděn zadní stěnou, přičemž byly simulovány odlišné situace přenosu tepla ze vzduchu na dřevěný prvek. Ten byl umístěn v prostoru tak, aby simuloval konkrétní prvek krovové soustavy. Síť byla zvolena jemnější pro samotný prvek a hrubší pro geometrii kvádrů, který ohraničoval prostředí, ve kterém docházelo k proudění ohřátého vzduchu.



Obr. 7: Hrubší a jemnější síť dvou rozdílných geometrií pro 3D simulace

### Definice materiálů

V modelu se vyskytovaly opět dva materiály. Prostředím, ve kterém simulace probíhala, byl vzduch, který byl opět použit z vestavěné knihovny materiálů. Smrkové dřevo bylo opět definováno jako materiál manuálně tak, aby vlastnosti dřeva přesněji odpovídaly realitě, protože dřevo jakožto anizotropní materiál má ve svých anatomických směrech odlišné vlastnosti. Konkrétně je dřevo materiálem ortotropním, kdy jednotlivé anatomické směry jsou totožné se souřadnými osami v prostoru. V našem případě není uvažován odklon vláken a hovoříme tedy o speciálně ortotropním tělese. Toto musíme vzít v potaz při definování modelu. Při simulaci přenosu tepla ve dřevě proto zadáme

materiál jako anizotropní a v jednotlivých směrech definujeme tepelnou vodivost pomocí matice:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_L & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_R & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_T \end{bmatrix} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6.1)$$

kde  $\lambda_L$  – koeficient tepelné vodivosti v podélném směru,  $\lambda_R$  – koeficient tepelné vodivosti v radiálním směru,  $\lambda_T$  – koeficient tepelné vodivosti v tangenciálním směru.

V následující tabulce jsou uvedeny konkrétní hodnoty nadefinovaného materiálu:

*Tab. 8: Definice dřevěných prvků 3D simulace*

<b>Smrkové dřevo</b>	
<b>veličina</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Hustota	420 kg · m <sup>-3</sup>
Tepelná kapacita	1650 J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost: podélný směr	0,223 W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
radiální směr	0,086 W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
tangenciální směr	0,071 W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>

Hodnoty tepelné vodivosti, uvedené v tabulce byly převzaty z měření, které provedl Niemz et al. (2010).

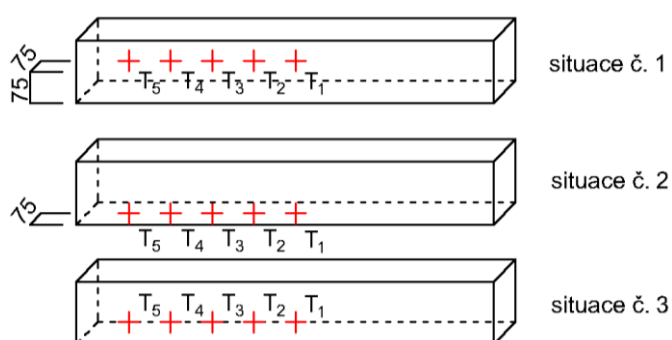
### Okrajové podmínky

*Tab. 9: Okrajové podmínky 3D simulace*

<b>Okrajová podmínka</b>	<b>hodnota a jednotka</b>
Teplota prostředí	20 °C
Tlak prostředí	1 atmosféra (101,325 kPa)
Teplota vzduchu na vstupu	90 °C
Rychlost proudění vzduchu na vstupu	0.1 m · s <sup>-1</sup>

## Měření teploty

Pro určení doby termosanace je zásadní stanovit v ohřívaném materiálu body, které jako poslední dosáhnou požadované teploty. Proto bylo pro představu o teplotě uvnitř dřevěného prvku zvoleno několik bodů, ve kterých byla v čase měřena teplota. Jelikož geometrie a proudění vzduchu ovlivňuje umístění těchto bodů, nejsou umístěny vždy v geometrickém středu jednotlivých prvků, ale pro každou situaci různě.

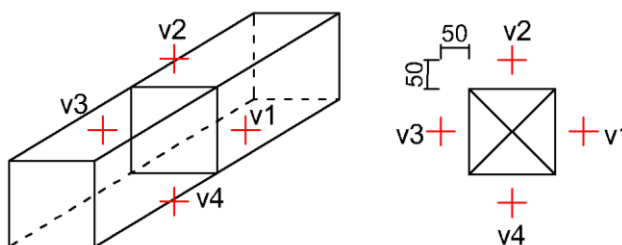


Obr. 8: Body pro měření teploty ve 3D simulacích

V situaci č. 1 jsou body pro měření teploty umístěny ve středu průřezu ve vzdálenosti 100 mm (T<sub>5</sub>), 200 mm (T<sub>4</sub>), 300 mm (T<sub>3</sub>), 400 mm (T<sub>2</sub>) a 500 mm (T<sub>1</sub>). V situaci č. 2 jsou body posunuty do středu spodní plochy prvku a jejich rozmístění po délce je stejné. V situaci č. 3 jsou body posunuty do spodní hrany zadní plochy. Body jsou tedy umístěny v místech, která budou prohřáta jako poslední.

## Rychlost proudění vzduchu

Každá ze situací má odlišné proudění vzduchu kolem prvku, vyplývající ze zadané geometrie. Na rychlosti proudění vzduchu závisí rychlost přenosu tepla na dřevěný prvek. V každé situaci byly v okolí prvku změřeny rychlosti proudění vzduchu. Umístění bodů, ve kterých byla změřena rychlost, je podle následujícího obrázku ve vzdálenosti 50 mm od bočních ploch prvku, přesně v polovině jeho délky.



Obr. 9: Body měření rychlosti proudění vzduchu ve 3D simulacích

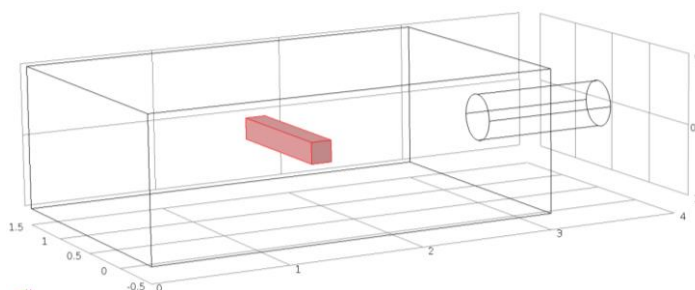
## Průběh simulace

Samotná simulace se stejně jako v případě 2D simulace skládala ze dvou částí, jimiž byl opět stacionární výpočet proudění a nestacionární výpočet přenosu a šíření tepla. Proudění vzduchu může být počítáno stacionárně nejen pro ušetření výpočetního výkonu, ale především proto, že se za velice krátkou dobu ustálí a nemění se. Rychlostní pole, získané stacionárním výpočtem proudění vzduchu, bylo použito jako výchozí parametr pro nestacionární výpočet. Celková doba termosanace jednotlivých dřevěných prvků se lišila podle umístění prvku a přístupu proudícího vzduchu k němu. Pro výpočet byl použit krok 60 s. K vypočteným časům ohřevu na hranici 55 °C byl přičten čas 3600 s (1 hodina), po který musí být tato teplota udržována v prvku, aby byl dřevokazný hmyz zahuben.

## Simulované případy umístění dřevěného prvku

### Situace č. 1

Dřevěný prvek je umístěn kolmo k ústí potrubí, kterým je přiváděn horký vzduch do prostoru, ve vzdálenosti 1500 mm a proudící vzduch má přístup k jeho povrchu ze 4 stran. Tato situace simuluje umístění krovových prvků, jako jsou rozpěry, vazné trámy nebo kleštiny.

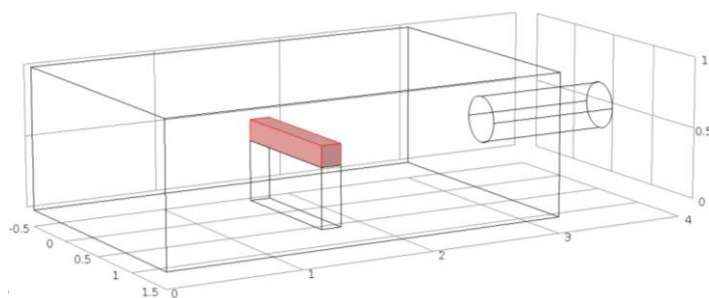


Obr. 10: Geometrie pro situaci č. 1

### Situace č. 2

Dřevěný prvek je opět umístěn kolmo k ústí potrubí, ve vzdálenosti 1500 mm, ale je proudícímu vzduchu vystaven pouze ze 3 stran. Spodní stěna prvku je izolována od proudícího vzduchu další nedřevěnou konstrukcí. Tato situace simuluje umístění podezděného dřevěného prvku, jakým je pozednice nebo nosník, položený na horním líci zdiva.

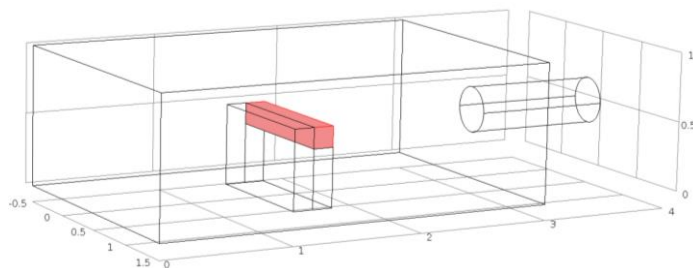




*Obr. 11: Geometrie pro situaci č. 2*

### **Situace č. 3**

Tento případ je podobný předchozímu, s tím rozdílem, že jsou proudícímu vzduchu vystaveny pouze 2 jeho strany a za jeho zadní stranou se opět nachází nedřevěná konstrukce, která brání přístupu vzduchu. Tato situace simuluje pozednici, která přiléhá ze zadní strany na jinou konstrukci nebo nosník, stýkající se se svislou stěnovou konstrukcí.



*Obr. 12: Geometrie pro situaci č. 3*

## 7 Výsledky

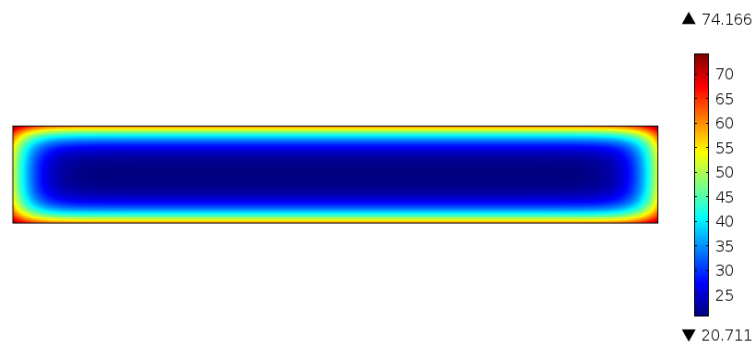
### 7.1 2D simulace

Výsledky dvojrozměrných simulací byly interpretovány grafickým znázorněním rozložení teploty na průřezu daného prvku. Dále byly graficky znázorněny průběhy ohřevu v bodech, ve kterých byla měřena teplota (Obr. 2 a Obr. 4). Z průběhů ohřevu byla poté stanovena konkrétní doba termosanace pro jednotlivé prvky. Při simulaci termosanace dřevěného krovu, pro kterou bylo nutné počítat i rychlostní pole proudícího vzduchu, bylo znázorněno graficky také proudění vzduchu 2D geometrií krovu.

#### 7.1.1 2D simulace ohřevu jednoduchého dřevěného prvku

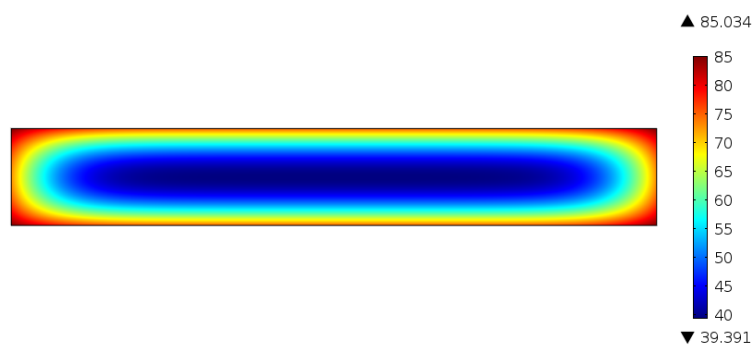
Koeficient přestupu tepla  $\alpha = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

##### Rozložení teploty na průřezu prvku



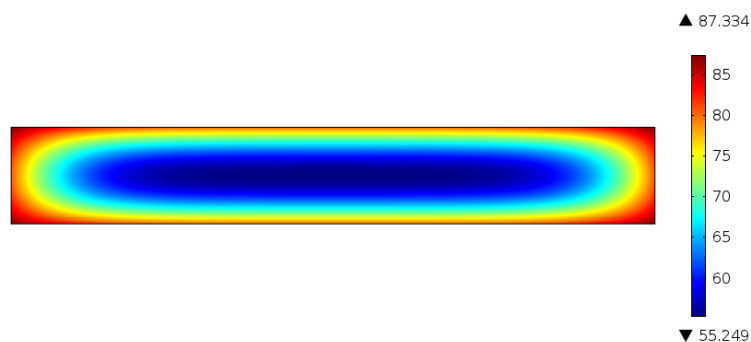
Obr. 13: Rozložení teploty na průřezu prvku po 1 hodině ohřevu [°C]

Po 1 hodině ohřevu prvku je zřetelně vidět, že se za tuto relativně krátkou dobu začínají prohřívát povrchové vrstvy, zatímco středová část prvku má stále teplotu 20 °C.



Obr. 14: Rozložení teploty na průřezu prvku po 5 hodinách ohřevu [°C]

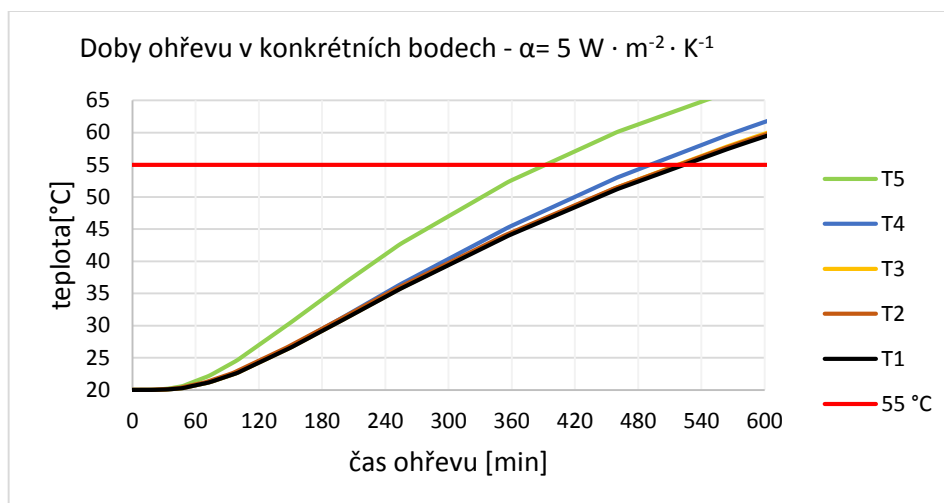
Po 5 hodinách ohřevu povrchové vrstvy dosahují téměř vnější teploty, která je konstantně 90 °C. Velká část prvku již dosáhla teploty přes 55 °C a středová vrstva je ohřívá již na teplotu kolem 40 °C.



Obr. 15: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení 55 °C

Na konci ohřevu je již na celém průřezu dosažena teplota 55 °C. Ze všech třech obrázků rozložení teploty na průřezu prvku je zřetelné, že v podélném směru se teplo šíří rychleji a okraje prvku ve směru podélném mají proto vyšší teplotu, než například středové části.

### Doba ohřevu prvku



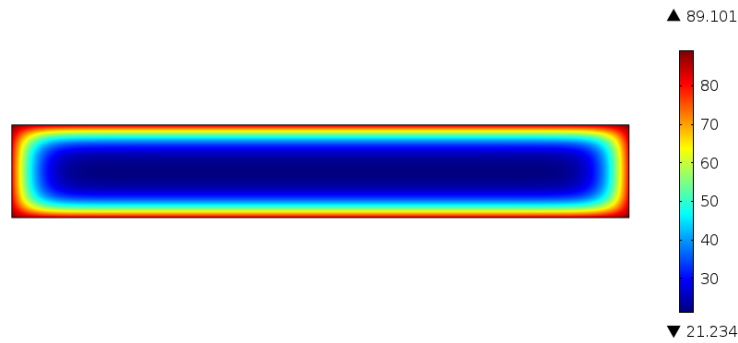
Obr. 16: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Z grafu je patrné, že nejdříve dosáhla teploty 55 °C okrajová vrstva, konkrétně bod T<sub>5</sub>, který byl umístěn 10 cm od okraje prvku. Následoval bod T<sub>4</sub>. Nakonec dosáhly požadované teploty body T<sub>3</sub>, T<sub>2</sub> a T<sub>1</sub>, jejichž hodnoty se v grafu překrývají, protože dosáhly teploty 55 °C v časovém rozmezí 5 minut. Konkrétní časy, kdy dosáhly body T<sub>1</sub> – T<sub>5</sub> požadované teploty:

- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 8 hodin 48 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 8 hodin 48 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 8 hodin 43 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 8 hodin 16 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 6 hodin 38 minut

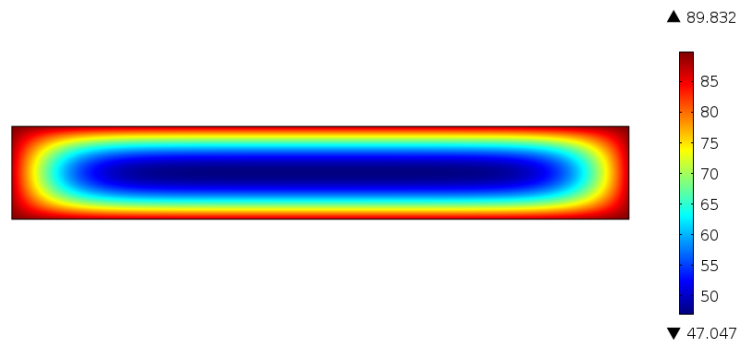
Celkový čas termosanace tohoto prvku po přičtení doby 1 hodiny je **9 hodin a 48 minut**.

**Koeficient přestupu tepla  $\alpha = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$**



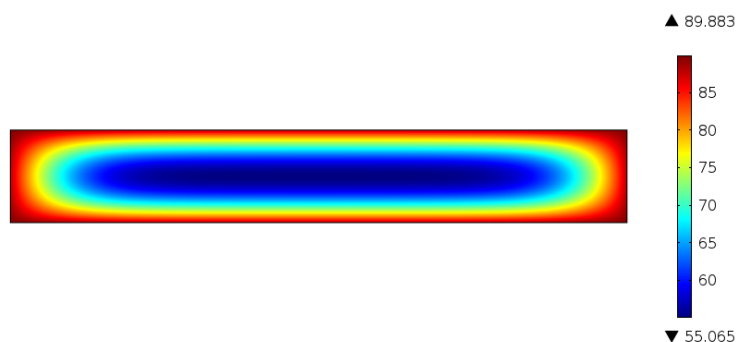
*Obr. 17: Rozložení teploty na průřezu prvku po 1 hodině ohřevu [°C]*

Po hodině ohřevu dosáhly povrchové vrstvy téměř hodnoty vnější teploty. Na rozdíl od předchozího případu je ohřev střední části rychlejší, což je patrné z obrázku. Je to způsobeno vyšší hodnotou koeficientu přestupu tepla.



*Obr. 18: Rozložení teploty na průřezu prvku po 5 hodinách ohřevu [°C]*

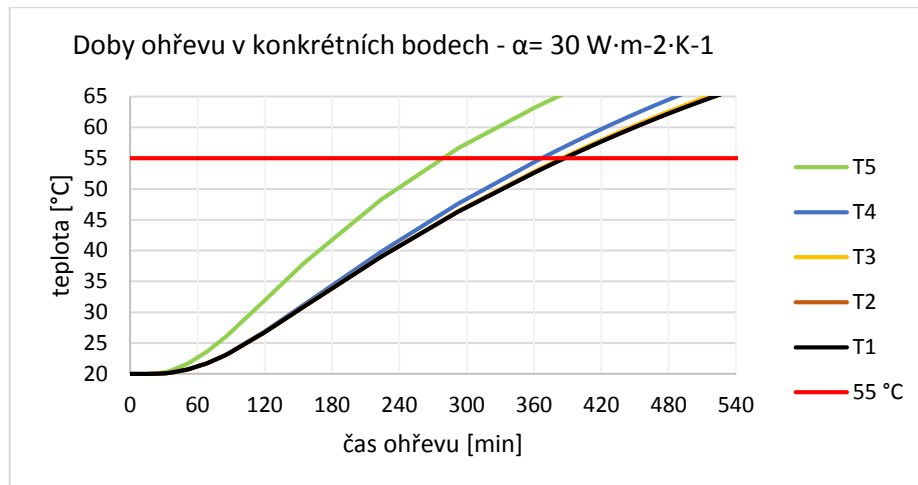
Po 5 hodinách ohřevu je zde, na rozdíl od prvního případu s koeficientem přestupu tepla  $\alpha = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , zřetelné rychlejší prohřívání střední části prvku. Ten již ve svém nejstudenějším bodu dosáhl teploty 47 °C.



*Obr. 19: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení hranice 55 °C*

Při vyšší hodnotě koeficientu přestupu tepla se prvek nejen ohřeje rychleji, ale také má v čase, kdy dosáhne střed průřezu teploty 55 °C, vyšší teploty okrajových vrstev.

## Doba ohřevu prvku



Obr. 20: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Nejdříve dosáhla teploty 55 °C opět okrajová vrstva, konkrétně bod T<sub>5</sub>, který byl umístěn 10 cm od okraje prvku. Následoval bod T<sub>4</sub>. Nakonec dosáhly požadované teploty body T<sub>3</sub>, T<sub>2</sub> a T<sub>1</sub>, jejichž hodnoty se v grafu překrývají, protože dosáhly teploty 55 °C opět s krátkým časovým odstupem, tentokrát pouze 3 minut. Konkrétní časy, kdy dosáhly body T<sub>1</sub> – T<sub>5</sub> požadované teploty:

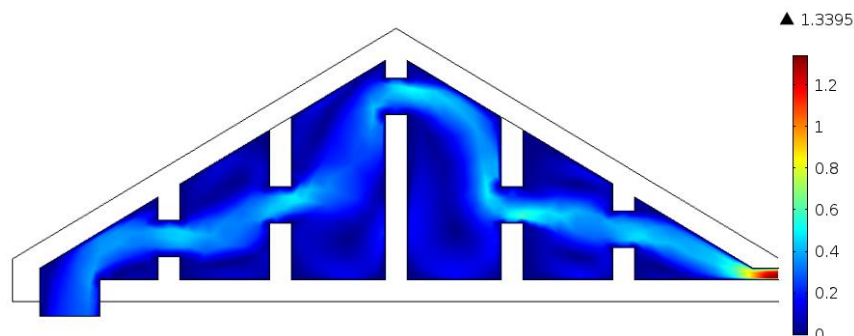
- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 6 hodin 28 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 6 hodin 28 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 6 hodin 25 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 6 hodin 7 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 4 hodiny 38 minut

Celkový čas ohřevu tohoto prvku po přičtení doby 1 hodiny je **7 hodin a 28 minut**.

## 7.1.2 2D simulace termosanace dřevěného krovu

### Geometrie 1

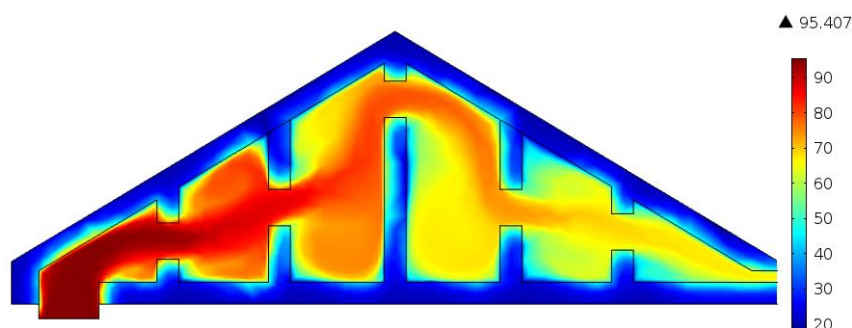
#### Proudění vzduchu



Obr. 21: Proudění vzduchu 2D krovem [ $m \cdot s^{-1}$ ]

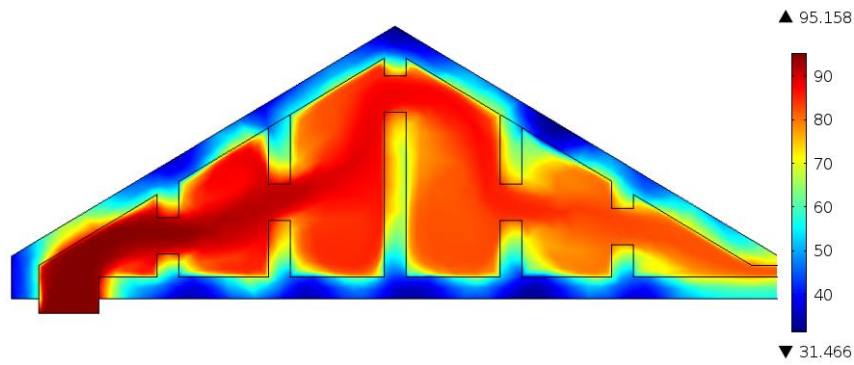
Z obrázku je patrné, jakou trajektorii má vzduch, proudící skrz krovovou konstrukci. Jeho rychlost se v některých místech zvyšuje a na výstupu z konstrukce dosahuje nejvyšší rychlosti. V místech, kde je proudící vzduch rychlejší, bude probíhat rychleji přenos tepla a přilehlé konstrukce proto rychleji dosáhnou požadované teploty.

#### Rozložení teplot v prostoru termosanace



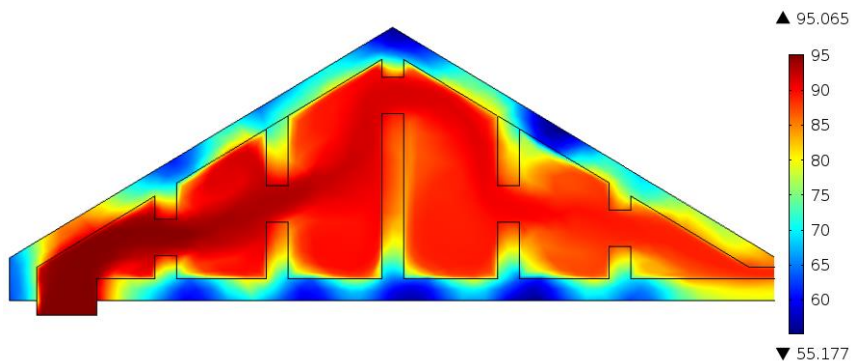
Obr. 22: Rozložení teplot 2D simulace po 2 hodinách [ $^{\circ}C$ ]

Po 2 hodinách od zahájení termosanace je již vzduch uvnitř konstrukce ohřátý na teplotu mezi 60 a 70 °C. Povrchové vrstvy některých konstrukcí, zejména v místech, kde jsou v těsném kontaktu s proudícím vzduchem, se začínají ohřívat na teplotu kolem 50 °C. V hlubších vrstvách konstrukce krovu však zůstává teplota nezměněna, stále na hodnotě 20 °C.



Obr. 23: Rozložení teplot 2D simulace po 10 hodinách [°C]

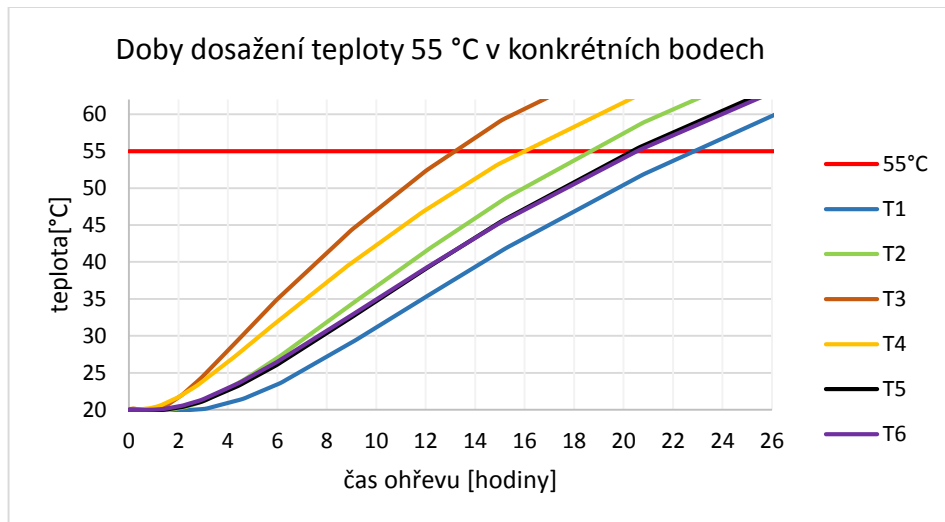
Po 10 hodinách termosanace dosáhly některé části konstrukce již požadované teploty 55 °C, zejména ve střední části krovu. Další části však této teploty ještě nedosáhly a proces tedy musí pokračovat. Při pohledu na legendu teploty je zřejmé, že i nedostupná místa se již ohřívají na teplotu přes 30 °C.



Obr. 24: Rozložení teplot 2D simulace na konci procesu termosanace [°C]

Na konci procesu termosanace je již ve všech prvcích krovu dosažena teplota 55 °C. Rozdíl teplot mezi jednotlivými prvky je sice značný, ale pro zahubení dřevokazného hmyzu postačuje teplota 55° C, která se nyní v konstrukci musí udržovat po dobu jedné hodiny. Celkový čas termosanace krovu bude oproti ohřevu jednoduchého prvku díky jeho složitosti a vlivu proudění vzduchu, kdy se jednotlivé prvky ohřívají nerovnoměrně, mnohem delší.

## Dosažení teploty 55 °C



Obr. 25: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

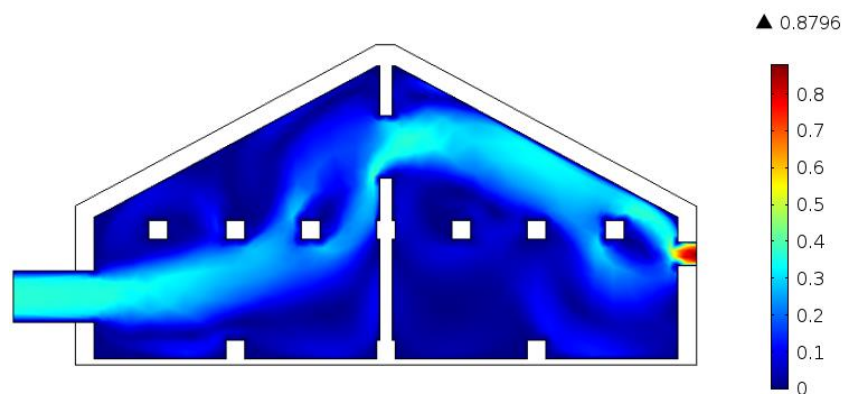
Z grafu je zřejmé, že se časy prohřátí na teplotu 55 °C v různých bodech liší, přestože jsou v konstrukci rozmístěny pravidelně. Nejdříve dosáhl požadované teploty bod T<sub>3</sub>, dále následovaly body T<sub>4</sub>, T<sub>2</sub> a dvojice bodů T<sub>5</sub> a T<sub>6</sub>, jejichž časy prohřevu byly podobné. Jako poslední dosáhl teploty 55 °C bod T<sub>1</sub>. Konkrétní hodnoty pro měřené body jsou:

- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 22 hodin 52 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 18 hodin 42 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 13 hodin 20 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 16 hodin 12 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 20 hodin 24 minut
- T<sub>6</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 20 hodin 36 minut

Celkový čas termosanace krovu po započtení 1 hodiny je **23 hodin 52 minut**.

## Geometrie 2

### Proudění vzduchu

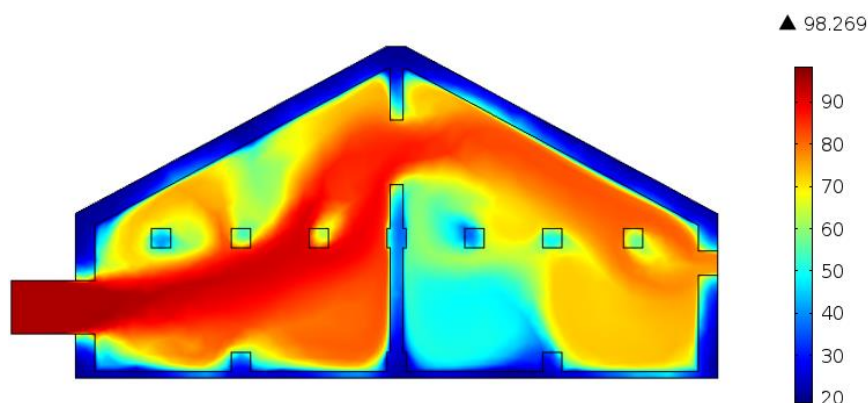


Obr. 26: Proudění vzduchu 2D krovem [ $m \cdot s^{-1}$ ]



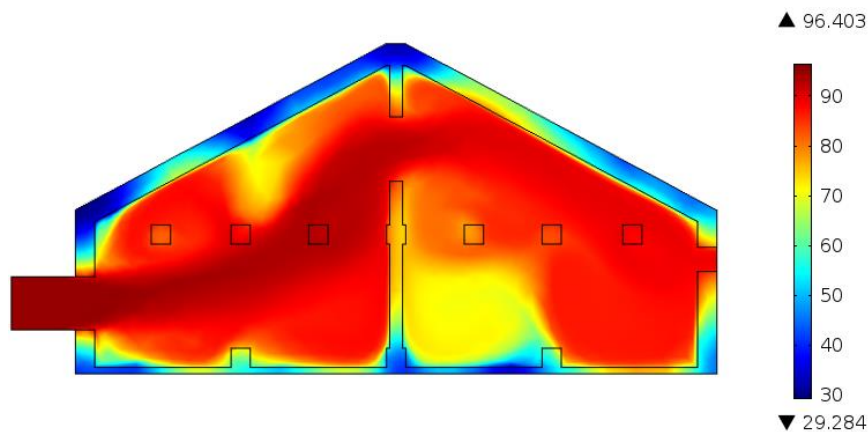
Z obrázku je patrné, jak dřevěné prvky trámového stropu ovlivňují proudění vzduchu mezi vstupem a otvorem, kterým vzduchu opouští prostor krovu. Z pohledu na legendu rychlosti je jasné, kde má proudící vzduch vyšší rychlost. V těchto místech bude opět přenos tepla probíhat rychleji.

### Rozložení teplot v prostoru termosanace



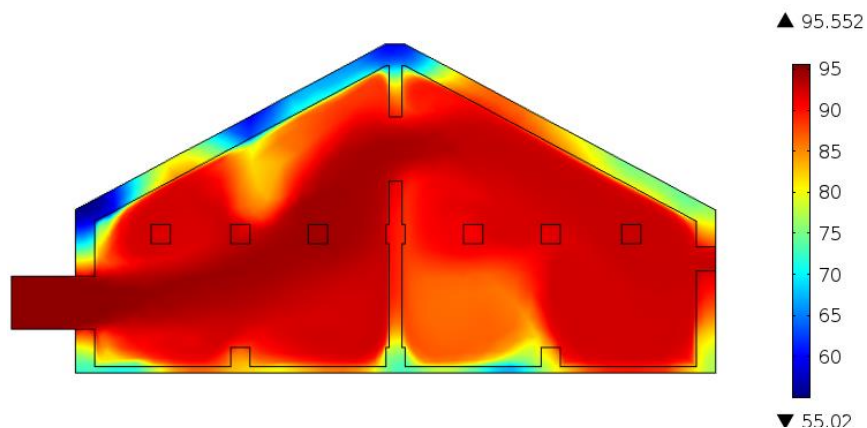
Obr. 27: Rozložení teplot 2D simulace po 2 hodinách [°C]

Po 2 hodinách má vzduch v prostoru nerovnoměrně rozloženou teplotu, kolísající mezi 40 a 80 °C. Některé volné prvky již za tuto dobu dosahují teploty kolem 50 °C. Okrajové prvky se zatím příliš neprohřály a stále mají teplotu kolem 20 °C.



Obr. 28: Rozložení teplot 2D simulace po 10 hodinách [°C]

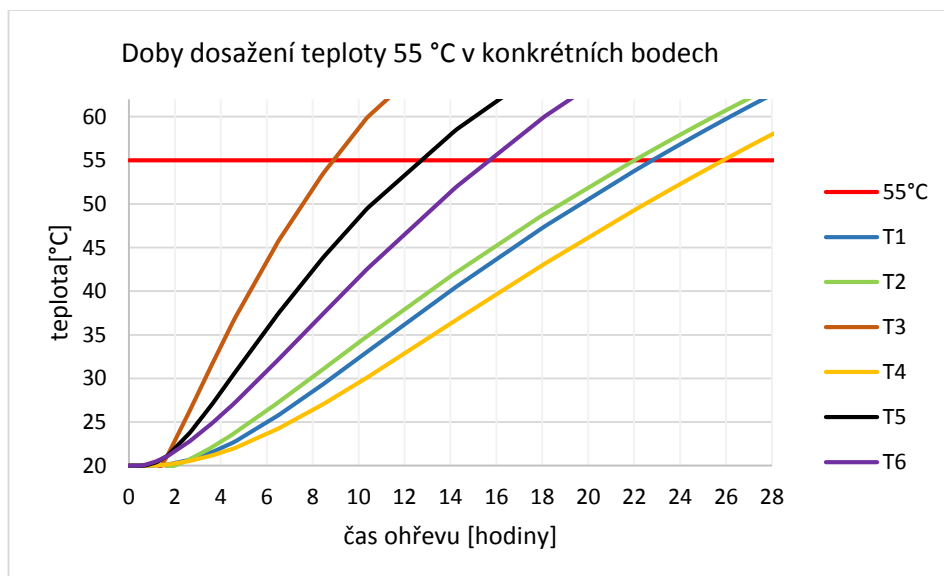
Po 10 hodinách se již teplota vzduchu v prostoru krovu pohybuje kolem 85 °C. Volné prvky stropu, společně se středovým sloupem již bezpečně dosáhly teploty 55 °C a prvky po obvodu konstrukce se již začínají ohřívat na teplotu mezi 40 a 50 °C. Odlehlá místa však dosahují stále teploty pouze 30 °C.



Obr. 29: Rozložení teplot 2D simulace na konci procesu termosanace [°C]

Na konci procesu termosanace je již v celém krovu dosažena teplota 55 °C. Zřetelně jsou vidět místa, která dosáhla požadované teploty jako poslední. V těchto bodech byla měřena teplota v čase. Proces termosanace bude opět pokračovat další hodinu od dosažení teploty 55 °C.

### Dosažení teploty 55 °C



Obr. 30: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Z grafu je zřejmé, že se časy prohřátí na teplotu 55 °C v různých bodech opět liší, přestože jsou v konstrukci rozmístěny pravidelně. Nejdříve dosáhl požadované teploty bod T<sub>3</sub>, dále následovaly body T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub> a dvojice bodů T<sub>2</sub> a T<sub>1</sub>, jejichž časy prohřevu byly podobné. Jako poslední dosáhl teploty 55 °C bod T<sub>4</sub>. Konkrétní hodnoty pro měřené body jsou:

- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 22 hodin 50 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 22 hodin 2 minuty
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 8 hodin 48 minut

- $T_4$  – čas ohřevu na 55 °C: 25 hodin 54 minut
- $T_5$  – čas ohřevu na 55 °C: 12 hodin 28 minut
- $T_6$  – čas ohřevu na 55 °C: 15 hodin 42 minut

Celkový čas termosanace krovu po započtení 1 hodiny je **26 hodin 54 minut**.

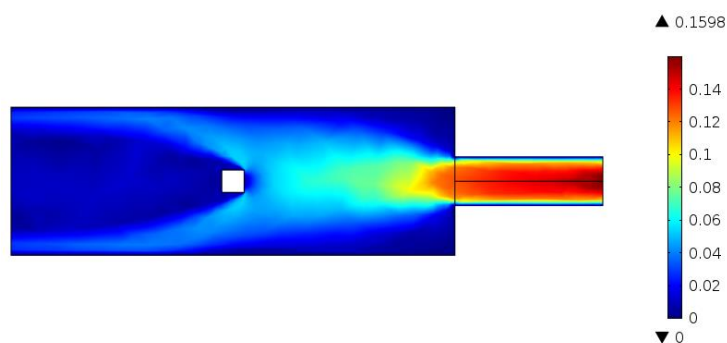
## 7.2 3D simulace

U každé z 3 rozdílných situací uložení stejného dřevěného prvku bylo nejprve vypočítáno proudění vzduchu v prostoru termosanace, které bylo znázorněno graficky a také numericky, pomocí konkrétních hodnot rychlosti v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , v blízkosti prvku. Dále byla graficky interpretována teplota v prostoru termosanace v návaznosti na vypočítané proudění. Změna teploty na průřezu prvků byla znázorněna pomocí několika příčných řezů a pomocí odečtení teplot v bodech  $T_1 - T_5$  (obr. 4) v čase byly stanoveny doby termosanací jednotlivých situací.

### 7.2.1 Situace č. 1

#### Proudění vzduchu

Z grafického znázornění rychlosti proudění vzduchu vidíme, že rychle proudící vzduch se po opuštění roury, kterou byl přiveden, zpomaluje v prostoru termosanace. Při dosažení překážky, kterou je dřevěný prvek, je zřejmé zpomalení téměř na nulovou hodnotu při kontaktu s přední hranou prvku. Proudící vzduch tedy obtéká prvek a dále pokračuje za něj a opouští prostor.

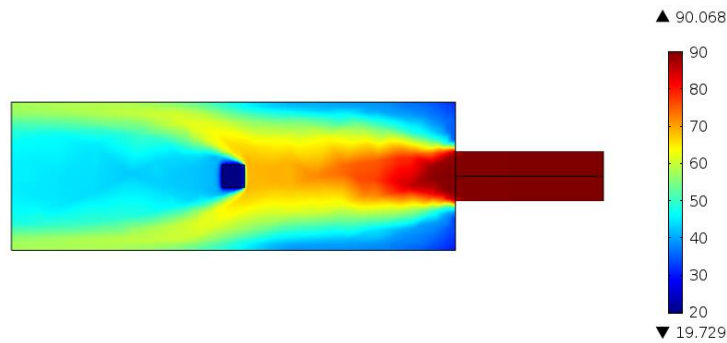


Obr. 31: Znázornění rychlosti proudění na průřezu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Pro přesnější znázornění rychlosti proudícího vzduchu v blízkosti dřevěného prvku byla rychlost proudění měřena ve čtyřech bodech ve vzdálenosti 5 cm od povrchu dřevěného prvku (obr. 7). Výsledné hodnoty:

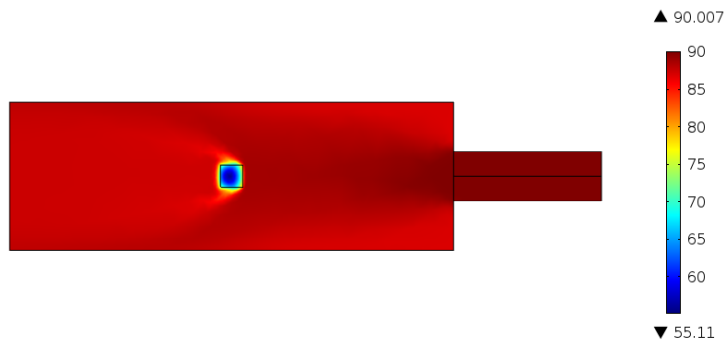
- $v_1 = 0,021 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_2 = 0,030 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_3 = 0,005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_4 = 0,027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## Rozložení teploty v prostoru



Obr. 32: Rozložení teplot po 10 minutách [°C]

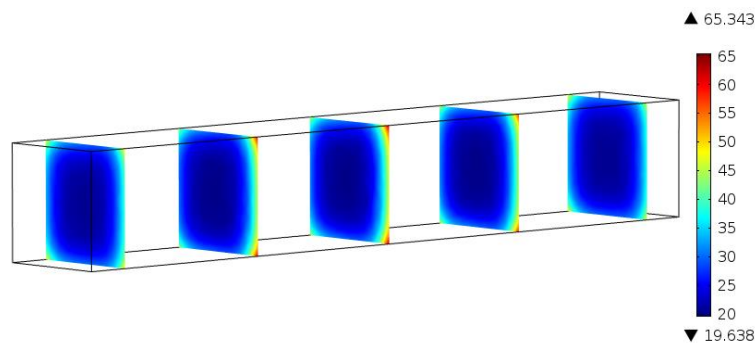
Po 10 minutách od začátku simulace můžeme vidět, že horký vzduch již ohřívá prostor termosanace. Podle legendy teplot je zřejmé, že dřevěný prvek má stále počáteční teplotu 20 °C.



Obr. 33: Rozložení teploty na konci procesu [°C]

Po několika hodinách dosahuje teplota v prostoru termosanace 90 °C. Takový stav trvá až do konce procesu, kdy je již na celém průřezu prvku dosažena teplota 55 °C. Od tohoto okamžiku bude proces termosanace pokračovat dalších 60 minut.

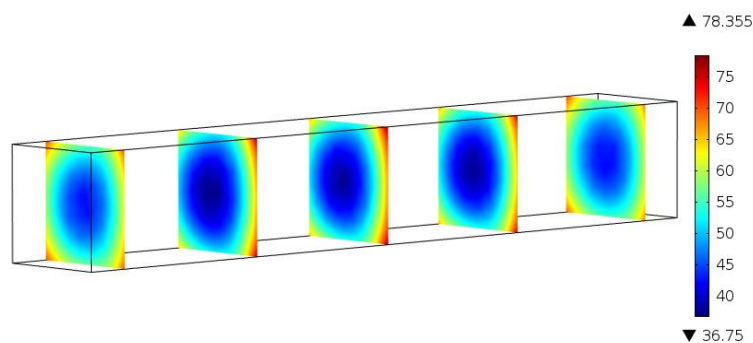
## Rozložení teploty na průřezu prvku



Obr. 34: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [°C]

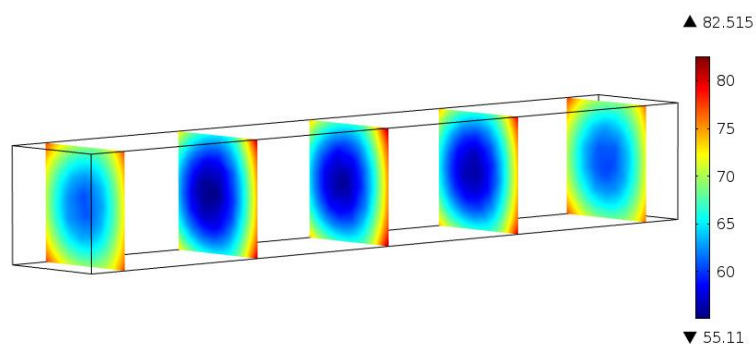
Po 1 hodině ohřevu prvku se již začínají ohřívát okrajové vrstvy dřeva. Nejintenzivněji probíhá ohřev přední hrany dřevěného prvku, která je přímo vystavena

ohřátému vzduchu, proudícímu z přívodní roury. Naproti tomu středové vrstvy si stále drží počáteční teplotu 20 °C.



Obr. 35: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [°C]

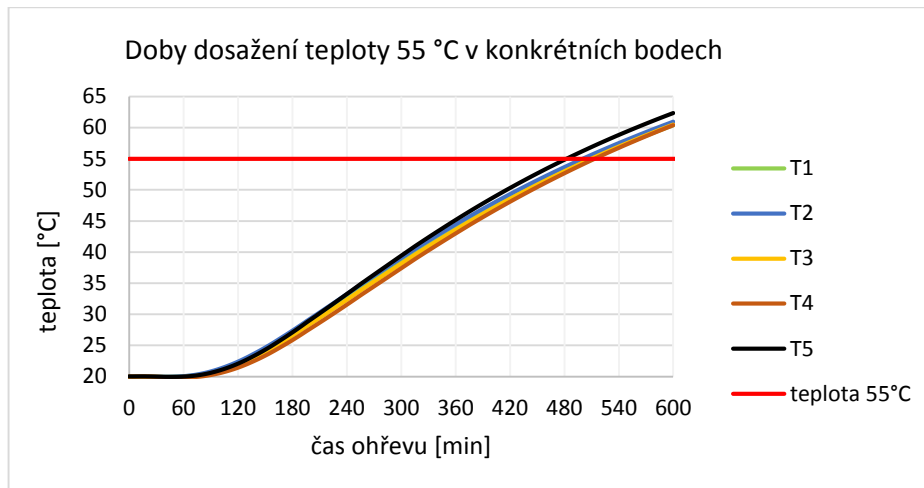
Po 5 hodinách se již dřevo prohřívá i ve středu svého průřezu, kde jeho teplota již přesáhla 36 °C. Opět lze pozorovat rychlejší prohřátí přední hrany a rozdíl mezi okrajovými a středovými řezy, kde u okrajových je patrné rychlejší prohřátí středových částí prvku.



Obr. 36: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení 55 °C

Na konci procesu termosanace je z legendy teplot patrné, že dřevěný prvek na celém svém průřezu dosáhl teploty 55 °C. Samotná termosanace bude trvat ještě další 1 hodinu.

## Doba ohřevu



Obr. 37: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Z grafu je zřejmé, že v tomto případě se časy prohřátí prvku na teplotu 55 °C v různých bodech příliš neliší. Konkrétní hodnoty pro měřené body jsou:

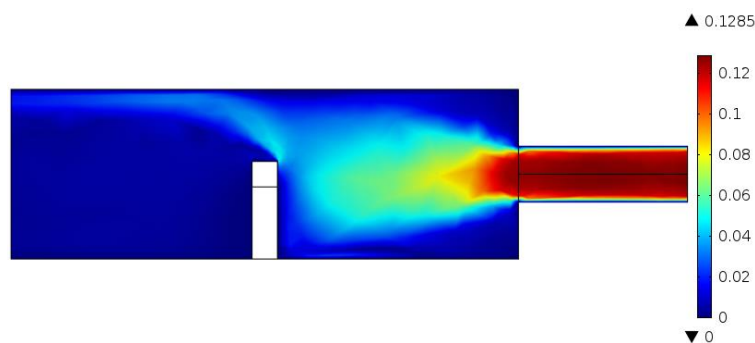
- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 510 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 501 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 510 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 514 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 483 minut

Celkový čas termosanace tohoto prvku po započtení doby 1 hodiny je **574 minut**.

### 7.2.2 Situace č. 2

#### Proudění vzduchu

Vzduch, přiváděný do prostoru termosanace, se opět po opuštění přívodní roury zpomaluje a proudí až k překážce, kterou je dřevěný prvek, pod kterým se nachází další konstrukce, bránící proudění vzduchu kolem jeho spodní plochy. Proudící vzduch tedy pokračuje jedinou možnou cestou okolo horní části prvku a následně opouští prostor.



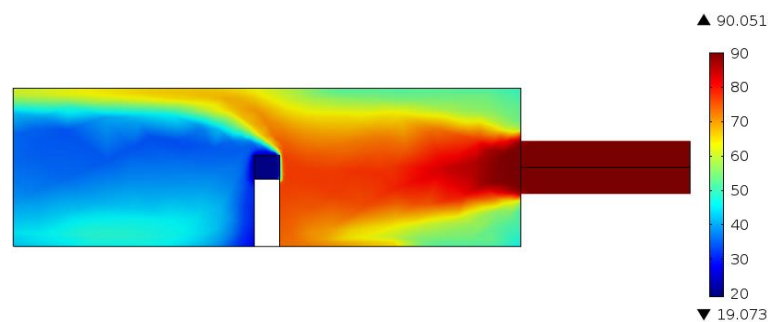
Obr. 38: Rychlost proudění vzduchu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

V blízkosti prvku byla opět číselně vyjádřena rychlost proudění vzduchu. Tentokrát pouze ve 3 bodech  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  podle obr. 7. Výsledné hodnoty v těchto bodech jsou:

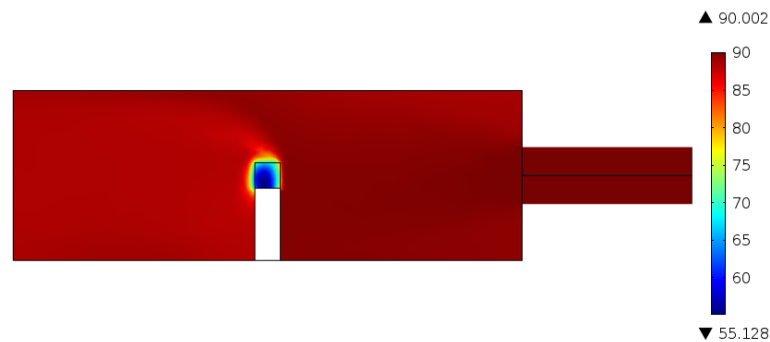
- $v_1 = 0,023 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_2 = 0,006 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_3 = 0,003 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### Rozložení teploty v prostoru

Po 10 minutách se opět pouze začíná ohřívat okolí dřevěného prvku a prvek samotný má stále původní teplotu 20 °C. Z obrázku je zřejmé, že tentokrát bude prvek ohříván nejvíce z přední a horní hrany a díky překážce pod ním nebude ze spodní strany ohříván vůbec a ze zadní strany velmi málo.



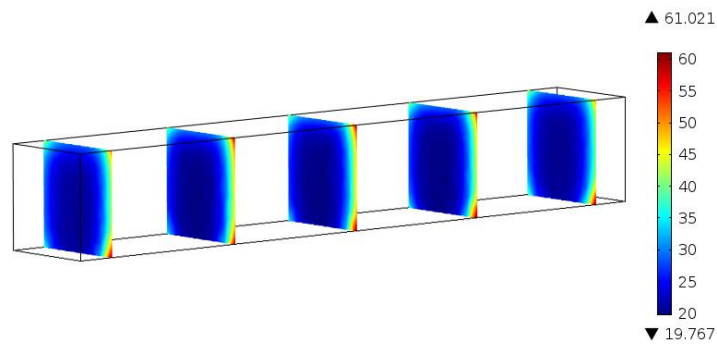
Obr. 39: Rozložení teploty v prostoru termosanace v čase 10 minut [°C]



Obr. 40: Rozložení teploty v prostoru na konci procesu

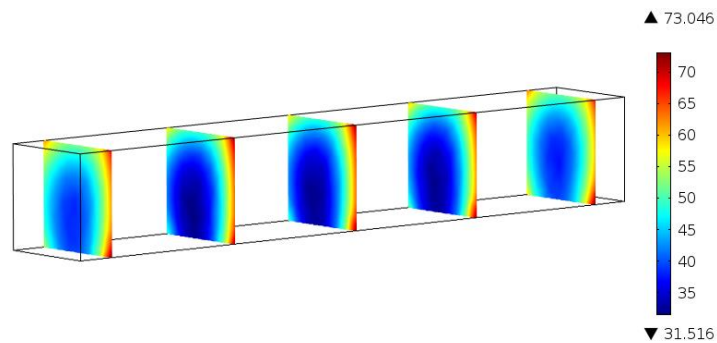
Po několika hodinách je teplota v přední části prostoru termosanace 90 °C a díky horší možnosti proudění vzduchu je v zadní části teplota řádově o několik stupňů nižší. Na konci procesu termosanace má již dřevěný prvek na celém svém průřezu teplotu 55 °C.

## Rozložení teploty na průřezu prvku



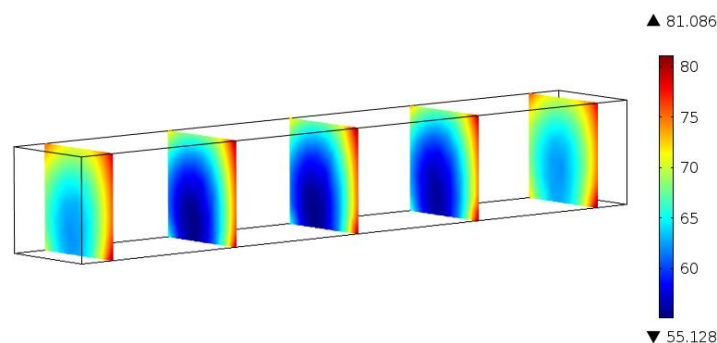
Obr. 41: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [°C]

Po 1 hodině ohřevu je vidět nepatrný rozdíl mezi touto situací a situací č. 1. Na spodní ploše prvku totiž zůstává kvůli konstrukci pod ním stále stejná teplota, která je uvnitř prvku stále 20 °C a povrchové vrstvy se opět začínají ohřívat nejvíce v přední ploše.



Obr. 42: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [°C]

Po 5 hodinách si lze již všimnout rozdílů. Zatímco v situaci č. 1 se prvek ohříval rovnoměrně a jeho nejchladnější body byly ve středu průřezu, zde se tato část posouvá dolů směrem ke konstrukci pod dřevěným prvkem. Zřetelně pomalejší je také ohřev ze zadní strany, jak již bylo uvedeno výše.

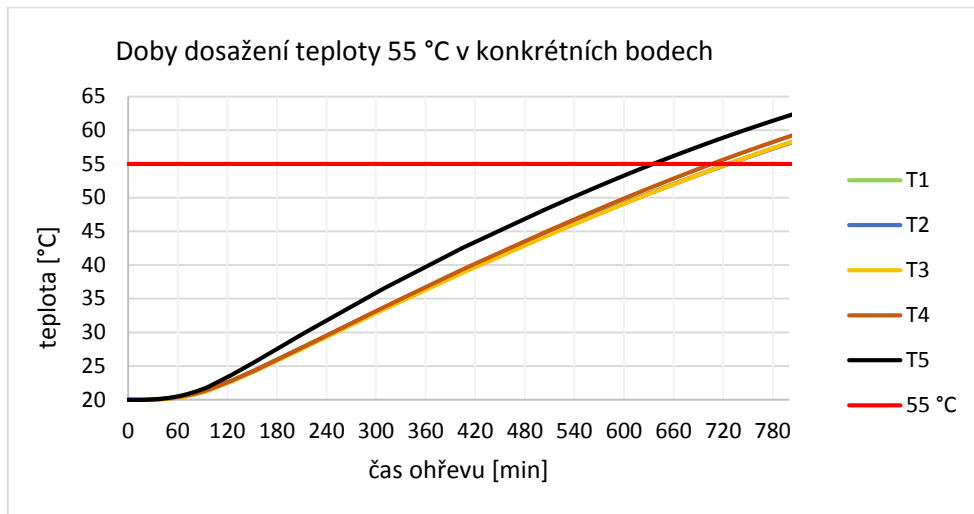


Obr. 43: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení teploty 55 °C

Na konci procesu je opět dosaženo teploty 55 °C na celém průřezu. Proces termosanace tedy bude opět pokračovat další hodinu.



## Doba ohřevu



Obr. 44: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Z grafu je zřejmé, že v tomto případě se časy prohřátí prvku na 55 °C v bodech T<sub>1</sub> – T<sub>4</sub> příliš neliší. V bodě T<sub>5</sub> byla dosažena požadovaná teplota nejdříve. Konkrétní hodnoty pro měřené body jsou:

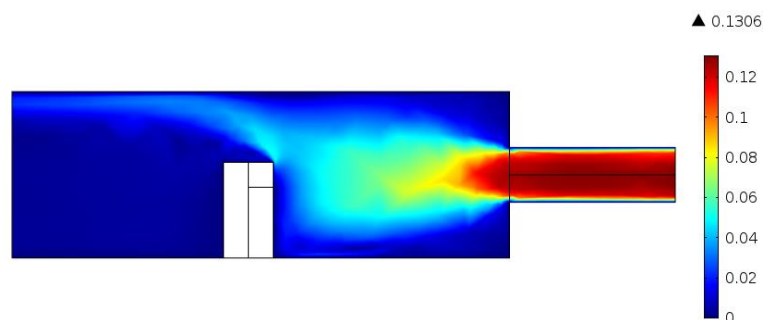
- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 726 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 728 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 728 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 708 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 636 minut

Celkový čas termosanace tohoto prvku po započtení doby 1 hodiny je **788 minut**.

### 7.2.3 Situace č. 3

#### Proudění vzduchu

Znázornění proudícího vzduchu je v této situaci podobné jako v té předchozí. Jediným rozdílem je další konstrukce za dřevěným prvkem, která sice má vliv na proudící vzduch, ale daleko důležitější bude pro dobu ohřevu prvku, ke kterému nebude mít ohřátý proudící vzduch přístup z tolika stran.

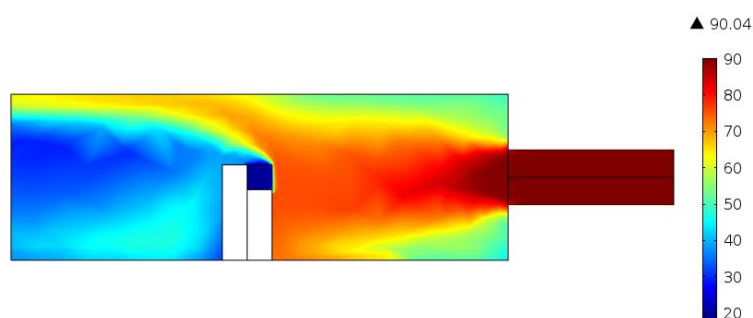


Obr. 45: Rychlost proudění vzduchu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

V tomto případě byla měřena rychlost proudění pouze nad dvěma hranami, protože další dvě boční hrany prvku jsou zakryty jinou konstrukcí. Hodnoty rychlosti proudění v těchto bodech jsou:

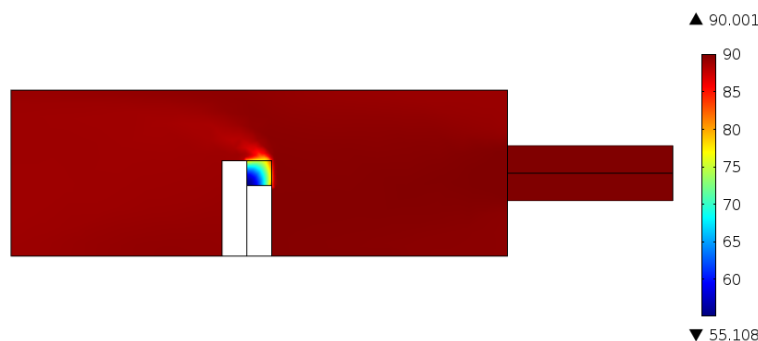
- $v_1 = 0,021 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_2 = 0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### Rozložení teploty v prostoru



Obr. 46: Rozložení teploty v prostoru po 10 minutách [°C]

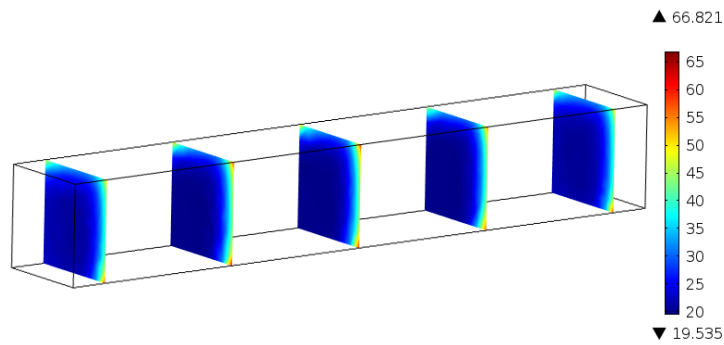
Po 10 minutách je opět ohřátý pouze vzduch v prostoru termosanace. Dřevěný prvek má stejně jako ve dvou předchozích případech stále původní teplotu 20 °C.



Obr. 47: Rozložení teploty v prostoru po dosažení 55 °C

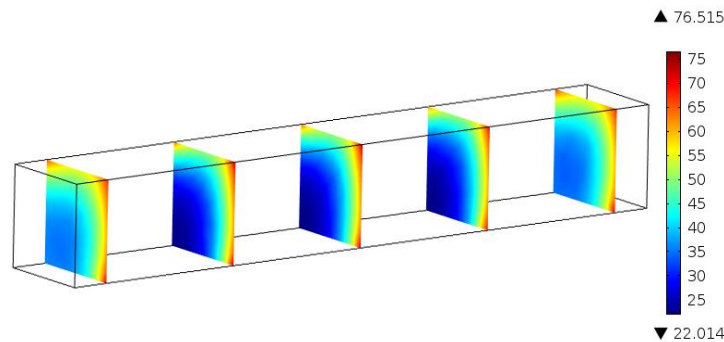
Po několika hodinách je teplota vzduchu uvnitř prostoru ve všech místech 90 °C. Oproti situaci č. 2 probíhala termosanace v tomto případě déle a vzduch v celém prostoru se za tu dobu stačil ohřát. Už podle geometrie je jasné, že přenos tepla z proudícího vzduchu probíhal nejvíce z přední a horní plochy prvku. Konkrétní rozložení teploty na průřezu jsou uvedeny níže.

## Rozložení teploty na průřezu dřevěného prvku



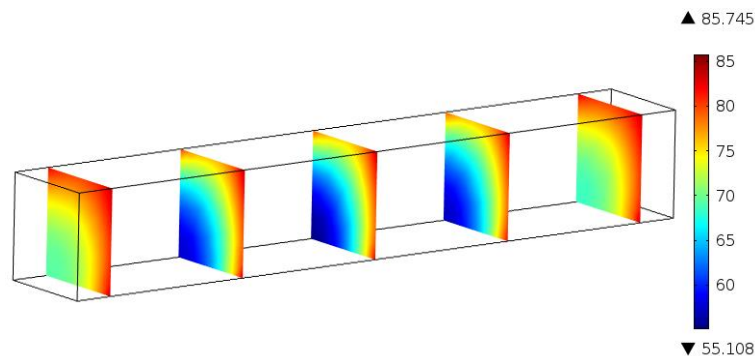
Obr. 48: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [°C]

Po jedné hodině ohřevu je situace velice podobná dvěma předchozím. Povrchové vrstvy se ohřívají a střed prvku má stále původní teplotu 20 °C. Rozdílem je, že tentokrát se neohřívá prvek ani ze spodní plochy, ani ze zadní.



Obr. 49: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [°C]

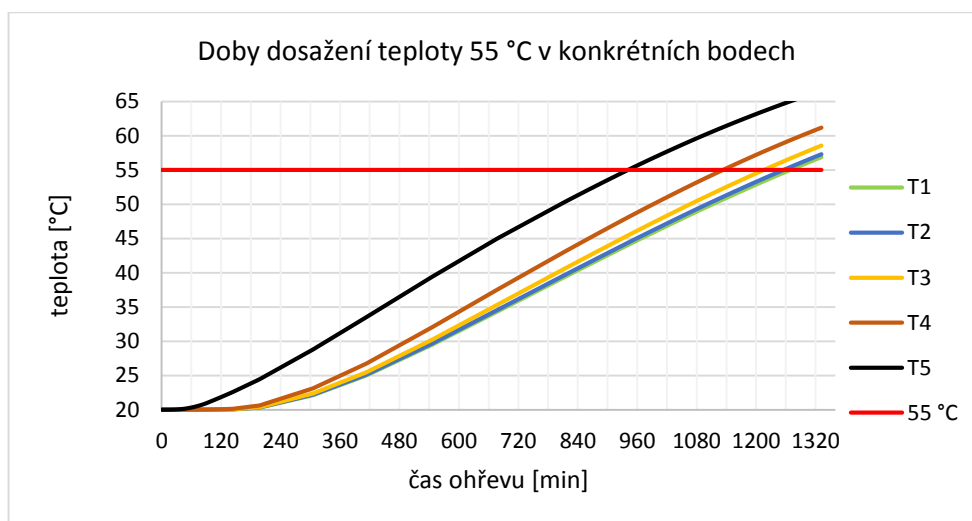
Po 5 hodinách je již rozdíl mezi všemi třemi situacemi zřetelný. Zatímco z přední a spodní plochy se prvek ohřívá, ze zadní a spodní ne. Proto se nejchladnější místo průřezu nyní nachází na společné hraně zadní a spodní plochy. Při pohledu na legendu teploty je zřejmé, že takto umístěný prvek se ohřívá nejpomaleji a doba jeho ohřevu bude delší, než v obou předchozích případech.



Obr. 50: Rozložení teploty na průřezu po dosažení 55 °C

Po dosažení požadované teploty 55 °C bude proces termosanace trvat stejně jako ve všech předchozích případech další hodinu.

## Doba ohřevu



Obr. 51: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu

Z grafu je zřejmé, že v tomto případě se časy prohřátí prvku na teplotu 55 °C v měřených bodech liší. Jako první dosáhl požadované teploty bod T<sub>5</sub>, poté bod T<sub>4</sub> a T<sub>3</sub>, nakonec body T<sub>2</sub> a T<sub>1</sub>, jejichž časy se nelišily tolik, jako časy ostatních bodů. Konkrétní hodnoty

pro měřené body jsou:

- T<sub>1</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 1272 minut
- T<sub>2</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 1258 minut
- T<sub>3</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 1217 minut
- T<sub>4</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 1134 minut
- T<sub>5</sub> – čas ohřevu na 55 °C: 942 minut

Celkový čas termosanace tohoto prvku po započtení 1 hodiny je **1332 minut**.

### Porovnání doby termosanace všech 3 příkladů umístění 3D prvku

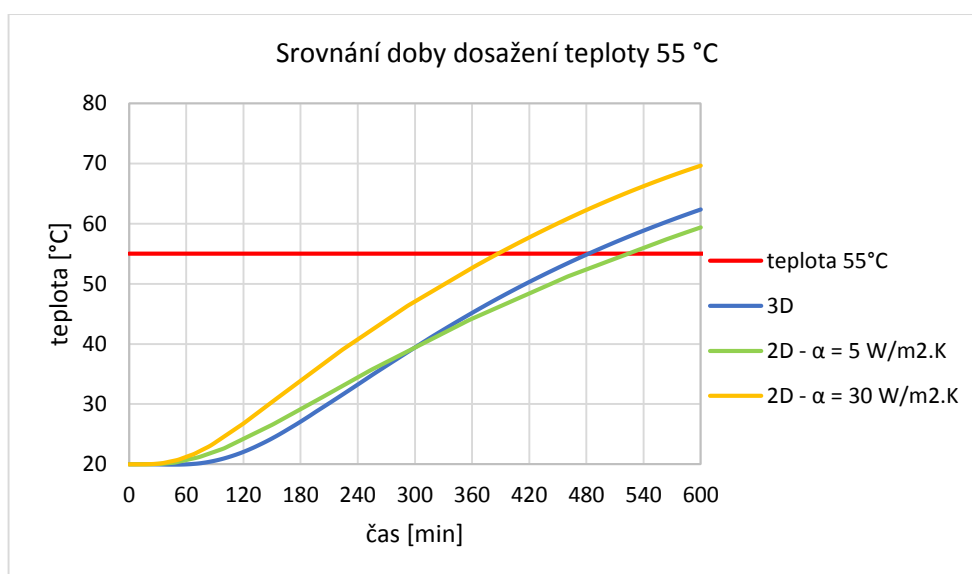
Doby termosanace jednotlivých umístění prvků se lišily. Pro porovnání jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 10: Porovnání dob termosanace všech 3D prvků

	Doba ohřevu na 55 °C	Celková doba termosanace
Situace č. 1	514 min	574 min
Situace č. 2	728 min	788 min
Situace č. 3	1272 min	1332 min

## Porovnání doby termosanace jednoduchého prvku ve 2D a 3D

Výše uvedené výsledky stanovují doby termosanace pro různé prvky a různé geometrie. Jelikož 2D simulace termosanace jednoduchého prvku a 3D simulace znázorňovaly prvek o stejných rozměrech, můžeme srovnat časy, za které se tyto prvky ohřály na požadovanou teplotu. 2D simulace byla definována jako ohřev ze všech stran, proto bude porovnána se situací č. 1, jejíž geometrie znázorňuje prvek volně v prostoru, u něhož také dochází k přenosu tepla ze všech jeho ploch. Teplota byla měřena v geometrickém středu prvku (obr. 4).



Obr. 52: Porovnání doby ohřevu 2D a 3D prvku

Z grafu, srovnávajícího ohřev jednoduchého 2D prvku, kde nebylo počítáno proudění vzduchu a 3D prvku, je zřejmé, že při zvoleném koeficientu přestupu tepla  $\alpha = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  se dřevěný prvek ohřeje na požadovanou teplotu dříve, než ve dvou dalších případech. Pokud srovnáme 2D případ, kde je definován koeficient přestupu tepla  $\alpha = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a 3D případ, zjistíme, že rozdíly mezi těmito dvěma jsou již menší. Lze si také všimnout rozdílných průběhů ohřevu u 2D a 3D řešení, kdy u 3D řešení narůstá teplota strměji a 2D řešení má lineárnější průběh.

## 8 Diskuse

Hlavním cílem této bakalářské práce byla numerická simulace procesu termosanace různých dvojrozměrných a trojrozměrných modelových příkladů dřevěných prvků či složitějších konstrukcí.

První jednoduchý 2D prvek, u kterého byl simulován ohřev na teplotu 55 °C, sloužil spíše jako porovnání se složitějšími 3D simulacemi, protože v tomto případě vůbec nebylo uvažováno proudění vzduchu kolem prvku. První simulovaný 2D prvek, který měl definován koeficient přestupu tepla  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , se odchyloval od výsledků 3D simulace, protože jeho ohřev byl příliš rychlý. Mnohem blíže ke 3D simulaci byl prvek, který měl definován koeficient přestupu tepla  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Doba ohřevu byla podobná jako u 3D simulace, ale průběh se u obou lišil. Zatímco na začátku ohřevu, zhruba do 1 hodiny trvání, se oba prvky ohřívaly podobně, s narůstajícím časem se průběhy měnily (Obr. 52) a zatímco 3D prvek se ohříval pomaleji a kolem času 5 hodin se ohřev zrychlil, 2D prvek od začátku až do konce procesu zaznamenával velice podobnou rychlost ohřevu. Rozdíl v těchto průbězích je způsoben rovnoměrným ohřevem 2D prvku a méně lineárním ohřevem u 3D prvku, které jsou způsobeny tím, že 2D prvek má definovány koeficienty tepelné vodivosti jen ve 2 směrech (Tab. 4), 3D prvek ve 3 směrech (Tab. 8) a především je u 2D prvku vypuštěno proudění vzduchu, které samotný proces velmi ovlivňuje. V rámci úspory výpočetního výkonu u některých jednoduchých geometrií by bylo možné proudění vzduchu nepočítat a při vhodně zvoleném koeficientu přestupu tepla počítat tyto případy dvojrozměrně.

Druhou 2D simulací byl zjednodušený řez vazníkovou krovovou soustavou, ve kterém probíhal proces termosanace. V této situaci byla reálná 3D vazníková soustava nahrazena jednodušší idealizovanou 2D geometrií, z důvodu vysoké výpočetní náročnosti na dobu výpočtu a kapacitu paměti počítače. V této situaci již bylo počítáno s prouděním vzduchu, které bylo simulováno stacionárně, jednak z důvodu zmiňované vysoké výpočetní náročnosti, ale také proto, že se proudění v krátkém časovém úseku ustálí a není proto nutné ho počítat po celou dobu procesu termosanace. Přestože tato zjednodušení vedla k jistým nepřesnostem, pro potřeby této bakalářské práce jsou výsledky dostačující. Samotný ohřev probíhal v obou simulovaných konstrukcích, i přes jejich symetrickou geometrii nerovnoměrně. U geometrie č. 1 je zřejmé, že i dvojice bodů ( $T_2$  a  $T_3$ ,  $T_4$  a  $T_6$ ), ve kterých by se dala očekávat podobná teplota v čase, měly tyto teploty rozdílné (Obr. 25). Vysvětlením je opět proudění vzduchu, neboť kdyby byla tato úloha

řešena bez proudění vzduchu, teploty v těchto bodech by byly stejné. Vzduch totiž proudil kolem jednotlivých prvků různě a v některých místech se při kontaktu s geometrií krovu i zrychloval (Obr. 21). Na těchto místech se dřevěná konstrukce ohřívala rychleji. Pokud srovnáme celkový čas termosanace s hodnotami, naměřenými při reálném provádění termosanace firmou Thermosanace s.r.o., zjistíme, že simulovaný čas 23 hodin a 52 minut se neliší od reálných hodnot, které se pohybují okolo 24 hodin. Lze tedy říci, ačkoliv je tato simulace prováděna pouze ve 2D a její geometrie je zjednodušena a upravena pro její potřeby, že výsledky, získané pomocí numerických simulací se mohou blížit reálným časům termosanace. Pro přímé porovnání by musela geometrie pro simulaci odpovídat reálné konstrukci, což by bylo velice náročné na výpočetní výkon, jak je již uvedeno výše. U geometrie č. 2, je již z proudění vzduchu (Obr. 38) patrné, že ohřev symetrického krovu bude opět probíhat nerovnoměrně. Z časů dosažení teploty 55 °C v jednotlivých bodech je patrné, že ačkoli celý proces termosanace trval v tomto případě téměř 27 hodin, například v bodě  $T_3$  byla tato teplota dosažena již po 8 hodinách a 48 minutách. Tyto rozdíly jen poukazují na variabilitu teplot v krovové konstrukci, která je ovlivněna proudícím vzduchem, který mění svůj směr a rychlost při kontaktu s překážkami, jimiž jsou v tomto případě nosné prvky stropu. Tento příklad také demonstruje rozdíly, které by vznikly, pokud by se takováto konstrukce simulovala bez uvažování proudění vzduchu, kdy by celý proces trval mnohem kratší dobu a nemusel by tolik korespondovat s reálnou dobou termosanace takového krovu.

Třetí 3D simulace se zabývala srovnáním ohřevu jednoduchého 3D prvku, který je umístěn v prostoru, simulujícím proces termosanace různých prvků střešního krovu. Stejný prvek byl umístěn třemi různými způsoby vzhledem k proudícímu vzduchu a jeho přístupu k povrchu dřevěného prvku, přičemž proudění vzduchu bylo počítáno opět stacionárně ze stejných důvodů jako při 2D simulaci. První způsob, prvek volně umístěný v prostoru, byl použit ve srovnání s jednoduchým 2D prvkem, kde bylo vypuštěno proudění. Ve druhém způsobu umístění byl omezen přístup proudícího vzduchu ke spodní ploše prvku a ve třetím způsobu ke spodní a zadní ploše. Při srovnání těchto tří způsobů byl jejich společným znakem rychlejší prohřev prvku ve směru podélném, než ve směru radiálním a tangenciálním, což je dáno tepelnou vodivostí dřeva, která je v podélném směru nejvyšší. Nejrychleji dosáhl teploty 55 °C prvek v situaci č. 1, poté prvek v situaci č. 2 a nakonec prvek v situaci č. 3 (Tab. 10). Tyto rozdíly byly způsobeny umístěním prvku. Prvek, který má celou plochu vystavenou proudění, bude ohřátý dříve, než prvek, k jehož povrchu je přístup proudícího vzduchu omezen, a proto nemůže mezi

vzduchem a povrchem prvku probíhat přenos tepla v takové míře. Přenos tepla také souvisí i s rychlostí proudění kolem prvku, protože s větší rychlostí proudění se zvyšuje množství přeneseného tepla. Z rozložení teplot na řezech jednotlivých prvků lze odvodit, v jakém bodě prvku bude teplota nejnižší a kam tedy v praxi umístit termočlánek pro měření teploty v prvku a také vytipovat problémové prvky v konstrukci.

Numerické simulace procesu termosanace mohou být velkým přínosem pro společnosti, zabývající se termosanací v praxi. Vhodně vytvořené a definované 2D simulace mohou posloužit pro plánování rozložení měřících termočlánků v jednotlivých částech krovu, kdy není potřeba mít komplexní simulaci celého krovu. Stačí vědět, kde se například v dané plné vazbě krovu vyskytuje místo, kde proběhne ohřev konstrukce nejpomaleji. Pokud ovšem vznikne potřeba mít přehled o průběhu teplotního pole v konkrétním prvku, není problém jej namodelovat a získat příslušné hodnoty. Takovým prvkem mohou být například některé nezvykle umístěné nebo tvarované prvky, kterých zejména ve starších objektech bývá mnoho. V neposlední řadě může být vhodná numerická simulace procesu termosanace, společně se simulací proudění vzduchu, použita i k optimalizaci technologie termosanace v praxi nebo pro přesnější kalkulace nákladů při praktickém provedení.



## 9 Závěr

Tato práce se zabývala simulací procesu termosanace pomocí softwaru pracujícího metodou konečných prvků (MKP). V teoretické části byly rozebrány zákony přenosu tepla, především Fourierův zákon a dále Navier-Stokesův zákon pro proudění tekutin. Následovala část simulační, která byla provedena pomocí software COMSOL Multiphysics.

V simulační části bylo pomocí vhodně zvolených vlastností materiálu (smrkové dřevo) a okrajových podmínek simulováno proudění vzduchu a přenos tepla ze vzduchu na dřevěné krovové prvky ve zvolených 2D a 3D geometriích. Modelové situace byly zjednodušeny tím způsobem, že 3D krovová konstrukce byla nahrazena idealizovanou 2D konstrukcí a navíc bylo proudění vzduchu počítáno stacionárně. Důvodem těchto zjednodušení byla vysoká výpočetní náročnost simulací.

Výstupem bylo grafické znázornění proudění a teplot vzduchu v oblasti sanované konstrukce a teplotního pole na průřezech prvků. Dále byly ve vybraných částech dřevěných konstrukcí měřeny v čase teploty v místech, kde se jednotlivé konstrukce či prvky ohřály na požadovanou teplotu jako poslední. Z těchto teplot byly poté připočtením času 1 hoiny stanoveny doby termosanace.

## **10 Summary**

In this thesis, simulations with use of a software based on the finite-element method were performed. In the theoretical part of this thesis, laws of heat transfer, mainly Fourier law and Navier-Stokes law for fluid flow were discussed. The consequent simulation part was elaborated utilizing the COMSOL Multiphysics.

In the simulation part, with the use of appropriately chosen material properties of spruce wood and boundary conditions, simulations of the air-flow and heat-transfer from the air to the wooden truss elements on chosen 2D and 3D geometries were executed. Simulated cases were simplified in a way that 3D truss construction was replaced by idealised 2D construction and moreover air-flow has been calculated as stationary. These simplifications were implemented due to the high computational demands.

Gained outputs are graphical depiction of the temperature distribution in cross-sections of analysed elements, their surroundings and the air-flow. Also temperatures in selected parts of the wooden constructions were measured in points where they were heated to the desired temperature as the last. Required hot-air treatment durations were therefore derived from this temperatures with addition of 60 minutes.

## 11 Seznam použitých zdrojů

### Literární zdroje

CENGEL, Y. A. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*, 2nd edition. New York: McGraw-Hill, 2007, 880 s, ISBN 0-390-86122-7.

GANDELOVÁ, L. a kolektiv, *Nauka o dřevě*. 3. vyd., Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GU, H., *Structure Based, Two-dimensional, Anisotropic, Transient Heat Conduction model for Wood*. Blacksburg: 2001. Disertační práce. Virginia Polytechnic Institute and State University, Wood Science and Forest Products.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Brno Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008, 124 s ISBN 978-80-7375-169-2.

KRETSCHMANN, D. E., Mechanical Properties of Wood. In: *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*, Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, 508 s, ISBN 978-1484859704.

LEWIS, R. W. a kolektiv, *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. New Jersey: Wiley, 2004, 341 s. ISBN 0470847891.

POŽGAJ, A. a kolektiv, *Štruktúra a vlastnosti dreva*, Bratislava: Príroda, 1997, 488 s, ISBN 80-07-00960-4.

PRZECZEK, J., *CFD analýza vstupního kanálu turbovrtulového motoru*. Brno: 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.

RAO, S. S. *The finite element method in engineering*. 5th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010, 726 s, ISBN 978-185-6176-613.

SIAU, J. F. *Transport processes in wood*. Berlin: Springer-Verlag, 1984, 245 s, ISBN 978-3-642-69215-4.

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. v. 55, no. 17-18, p. 4588-4596. ISSN 0017-9310.

TRUHLÁŘ, M. Vlastnosti dřeva a jejich vliv na stavební praxi. In: *Dřevo & Stavby PROFI speciál 2011*. Praha: PRO VOBIS, 2011, 98 s, ISBN 978-80-903964-6-3.

ŽÁK, J., REINPRECHT, L., *Ochrana dřeva ve stavbě: odborná příručka pro stavebníky, investory, projektanty a architekty*. 1. vyd., Praha: Arch, 1998, 95 s, ISBN 80-86165-00-0.

### **Internetové zdroje**

MEIER, A. Viscous Fluids. In: *Classical Mechanics*. Inside Mines, 2011 [cit. 4. 3. 2015],

Dostupné z:

[http://inside.mines.edu/~tohno/teaching/PH505\\_2011/Amanda\\_ClassicalMechanicsFinalPaper.pdf](http://inside.mines.edu/~tohno/teaching/PH505_2011/Amanda_ClassicalMechanicsFinalPaper.pdf).

MULTIPHYSICS CYCLOPEDIA [online]. COMSOL, Inc. [cit. 12. 2. 2015] Dostupné

z: <http://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>.

SPECIFIC HEAT OF COMMON SUBSTANCES [online]. The Engineering Toolbox

[cit. 28. 12. 2014], Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html).

## Seznam tabulek

Tab. 1: Součinitele tepelné vodivosti některých materiálů při 20 °C .....	8
Tab. 2: Tepelné kapacity vybraných materiálů při 20 °C .....	9
Tab. 3: Teplotní vodivost některých materiálů při 20°C .....	10
Tab. 4: Defínice materiálu pro 2D simulace ohřevu.....	22
Tab. 5: Okrajové podmínky pro 2D simulace ohřevu .....	22
Tab. 6: Defínice dřeva smrku 2D simulace .....	24
Tab. 7: Okrajové podmínky 2D simulace .....	24
Tab. 8: Defínice dřevěných prvků 3D simulace .....	27
Tab. 9: Okrajové podmínky 3D simulace .....	27
Tab. 10: Porovnání dob termosanace všech 3D prvků .....	49

## Seznam obrázků

Obr. 1: Anatomické směry dřeva, zdroj: Wood Handbook 2010 .....	11
Obr. 2: Hustota sítě a body měření teploty jednoduchého 2D prvku .....	22
Obr. 3: Rozdílná hrubost síťování ve složitější 2D geometrii 1 .....	23
Obr. 4: Rozdílná hrubost síťování ve složitější 2D geometrii 2 .....	23
Obr. 5: Body měření teploty ve složitější 2D simulaci 1 .....	25
Obr. 6: Body měření teploty ve složitější 2D simulaci 2 .....	25
Obr. 7: Hrubší a jemnější síť dvou rozdílných geometrií pro 3D simulace.....	26
Obr. 8: Body pro měření teploty ve 3D simulacích .....	28
Obr. 9: Body měření rychlosti proudění vzduchu ve 3D simulacích.....	28
Obr. 10: Geometrie pro situaci č. 1 .....	29
Obr. 11: Geometrie pro situaci č. 2.....	30
Obr. 12: Geometrie pro situaci č. 3.....	30
Obr. 13: Rozložení teploty na průřezu prvku po 1 hodině ohřevu [°C].....	31
Obr. 14: Rozložení teploty na průřezu prvku po 5 hodinách ohřevu [°C].....	31
Obr. 15: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení teploty 55 °C .....	32
Obr. 16: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	32
Obr. 17: Rozložení teploty na průřezu prvku po 1 hodině ohřevu [°C].....	33
Obr. 18: Rozložení teploty na průřezu prvku po 5 hodinách ohřevu [°C].....	33
Obr. 19: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení hranice 55 °C .....	33
Obr. 20: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	34

Obr. 21: Proudění vzduchu 2D krovem [ $m \cdot s^{-1}$ ] .....	35
Obr. 22: Rozložení teplot 2D simulace po 2 hodinách [ $^{\circ}C$ ] .....	35
Obr. 23: Rozložení teplot 2D simulace po 10 hodinách [ $^{\circ}C$ ] .....	36
Obr. 24: Rozložení teplot 2D simulace na konci procesu termosanace [ $^{\circ}C$ ].....	36
Obr. 25: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	37
Obr. 26: Proudění vzduchu 2D krovem [ $m \cdot s^{-1}$ ] .....	37
Obr. 27: Rozložení teplot 2D simulace po 2 hodinách [ $^{\circ}C$ ] .....	38
Obr. 28: Rozložení teplot 2D simulace po 10 hodinách [ $^{\circ}C$ ] .....	38
Obr. 29: Rozložení teplot 2D simulace na konci procesu termosanace [ $^{\circ}C$ ].....	39
Obr. 30: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	39
Obr. 31: Znázornění rychlosti proudění na průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ] .....	40
Obr. 32: Rozložení teplot po 10 minutách [ $^{\circ}C$ ] .....	41
Obr. 33: Rozložení teploty na konci procesu [ $^{\circ}C$ ].....	41
Obr. 34: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [ $^{\circ}C$ ].....	41
Obr. 35: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [ $^{\circ}C$ ].....	42
Obr. 36: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení $55^{\circ}C$ .....	42
Obr. 37: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	43
Obr. 38: Rychlost proudění vzduchu [ $m \cdot s^{-1}$ ].....	43
Obr. 39: Rozložení teploty v prostoru termosanace v čase 10 minut [ $^{\circ}C$ ] .....	44
Obr. 40: Rozložení teploty v prostoru na konci procesu .....	44
Obr. 41: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [ $^{\circ}C$ ].....	45
Obr. 42: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [ $^{\circ}C$ ].....	45
Obr. 43: Rozložení teploty na průřezu prvku po dosažení teploty $55^{\circ}C$ .....	45
Obr. 44: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	46
Obr. 45: Rychlost proudění vzduchu [ $m \cdot s^{-1}$ ].....	46
Obr. 46: Rozložení teploty v prostoru po 10 minutách [ $^{\circ}C$ ].....	47
Obr. 47: Rozložení teploty v prostoru po dosažení $55^{\circ}C$ .....	47
Obr. 48: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 1 hodina [ $^{\circ}C$ ].....	48
Obr. 49: Rozložení teploty na průřezu prvku v čase 5 hodin [ $^{\circ}C$ ].....	48
Obr. 50: Rozložení teploty na průřezu po dosažení teploty $55^{\circ}C$ .....	48
Obr. 51: Graf závislosti teploty v měřených bodech na času ohřevu .....	49
Obr. 52: Porovnání doby ohřevu 2D a 3D prvku.....	50