

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH A VÝPOČET SUŠICÍHO ZAŘÍZENÍ  
PRO DŘEVOZPRACUJÍCÍ PRŮMYSL  
DESIGN OF A DRYING DEVICE FOR WOOD-PROCESSING INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

TOMÁŠ VACH

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JAN OTÁHAL

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Vach Tomáš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh a výpočet sušícího zařízení pro dřevozpracující průmysl**

v anglickém jazyce:

#### **Design of a drying device for wood-processing industry**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě požadovaných parametrů navrhnout úpravy současného sušícího zařízení pro výrobu dřevovláknitých desek za účelem zvýšení produktivity výrobní linky. Bude proveden zhodnocení energetické náročnosti výrobního procesu, návrh a výpočet vybrané části zařízení. Dále bude provedeno zhodnocení energetické úspory při využití případných konstrukčních úprav zlepšujících účinnost celého zařízení.

Cíle diplomové práce:

Popsat současný stav. Navrhnout vylepšení vybrané části výrobního procesu. Dimenzovat vybranou část zařízení. Zhodnotit energetické nároky zařízení.



*[Handwritten signature]*

doc. RNDr. Miroslav Dopovoz, CSc.  
Děkan fakulty

*[Handwritten signature]*

doc. Ing. Zdeněk Škála, CSc.  
Ředitel ústavu

Seznam odborné literatury:

- [1]Pavelek, M. a kol.: Termomechanika, skripta VUT Brno, 2003.  
[2] Jícha, M.: Přenos tepla, skripta VUT Brno, 2001.  
[3] Hrázský, J. – Král, P. Technologie výroby aglomerovaných materiálu. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student(k)a: Vach Tomáš

Který/ktéř studuje v magisterském studijním programu

Obor: Technická prostředí (2301T024)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se studijním a  
zkoušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a výpočet sušičského zařízení pro dřevoprácní průmysl

v anglickém jazyce:

Design of a drying device for wood-processing industry

Široce charakteristika problematiky úkolu:

Na základě požadovaných parametrů navrhnutí úpravy současněho sušičského zařízení pro výrobu  
dřevovláknitých desek za účelem zvýšení produktivity výrobní linky. Bude proveden  
zjednodušený energetický nárokovací výpočet celého procesu, návrh a výpočet výbrané části zařízení.  
Dále bude provedeno zjednodušené energetické úspory při využití přibližných konstrukčních  
úprav zlepšující účinnost celého zařízení.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Otáhal

Cíle diplomové práce:

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 26.11.2007



*Zdeněk Skála*

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

*Miroslav Doupovec*

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá stabilizací teploty dřevěného vlákna při výrobě středně hustých vláknitých desek (MDF) v dřevozpracujícím průmyslu. Z původního záměru řešit sušící zařízení se z hlediska energetické optimalizace vyvinul podstatně závažnější problém. Ukázalo se, že výrobní proces se potýká s výraznými tepelnými ztrátami, jejichž důsledkem je ztráta velkého množství tepelné energie získané během sušícího procesu. Hlavním cílem této práce je tedy posouzení ochlazovacího účinku okolního prostředí na vybrané části výrobní linky a návrh vhodného opatření k minimalizaci tepelných ztrát a ke zvýšení teploty vlákna na požadovanou hodnotu. Řešení je zaměřeno na úsek výrobní linky mezi sušícím zařízením a lisováním. Součástí práce je popis technologie výroby vláknitých desek, úvod do problematiky přenosu tepla a také základy teorie počítačového modelování proudění a přenosu tepla za pomoci CFD simulací. Výpočtová část obsahuje zhodnocení tepelných ztrát vybraných úseků výrobní linky za současného provozního stavu a jejich porovnání s počítačovými simulacemi. Ověření správnosti výsledků při použití obou přístupů k řešení proudění a přenosu tepla je výchozím krokem k návrhu zlepšení stávající situace. Ověřený výpočetní model lze poté použít v následujícím řešení vlivu konvekčního a radiačního mechanismu na prohřátí vrstvy dřevěného vlákna. Důležitým faktorem v konečné fázi výpočtu je skutečná teplota vláknitého koberce na vstupu do lisu. Čím vyšší vstupní teploty v daném rozmezí je dosaženo, tím se sníží čas potřebný k lisování, a tím se zkrátí čas potřebný pro celý výrobní proces. Řešení daného problému směřuje k dosažení energetické úspory a mělo by se zároveň stát podkladem, ze kterého je možné zhodnotit zlepšení produktivity výroby MDF desek. Závěr diplomové práce obsahuje rozbor poznatků týkajících se ohřevu dřevěného vlákna a jeho efektivity využití v praxi.

## **Klíčová slova**

Dřevozpracující průmysl, výroba MDF, stabilizace teploty vlákna, energetická optimalizace, sušící zařízení, minimalizace tepelných ztrát, energetická úspora, proudění a přenos tepla, počítačové modelování.

## **Abstract**

The thesis considers a stabilization of temperature of a wood fiber during production of medium close fibre boards MDF in a wood-processing industry. The original purpose to solve energetic optimization of a kiln dryer has become a serious problem. It turned out that production suffers with a big heat loss which results in big heat loss gained during a kiln drying. Primary aim of this thesis is an examination of a cooling effect of environment on chosen parts of a production line and suggestion of acceptable proceeding to minimize heat loss and to rise temperature of the wood fiber to required temperature. Solution is aimed on the section of a production line between drying equipment and press. First part of the thesis introduces technology of production of fibre boards, introduction to heat transfer problems and also basics of computer modeling of heat flow and transfer using CFD simulation. The next part includes an evaluation of the heat loss of chosen parts of the production line in a current working condition and its comparison with computer simulations. Verification of accuracy of the results while using both approaches to solution is a first step to the improvement of the current situation. It is possible to use the verified calculation model for the following solution of effects on convective and radiation heating of a wood fiber layer. An important factor in the last period of a calculation is a real

temperature of the fiber board-mat at the entrance to a press. The higher entering temperature in a set temperature range is reached, the lower time needed for pressing will be and simultaneously the whole industrial process will be cut short. The solution of a problem leads to an achievement of an energy saving and should become a solid basis from which it would be possible to evaluate an improvement of production of MDF boards. The conclusion of the thesis includes an analysis of findings which refers to a heating of wood fiber and it's effectiveness for a practical use.

### **Keywords**

Wood-processing industry, production of MDF, stabilization of the fiber temperature, energetic optimalization, minimization of the heat loss, energy saving, heat flow and heat transfer, computer simulation.

### **Bibliografická citace mé práce:**

VACH, T. *Návrh a výpočet sušicího zařízení pro dřevozpracující průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Otáhal.

# OBSAH

ÚVOD .....	9
<b>1. Technologie výroby středně hustých vláknitých desek MDF .....</b>	<b>10</b>
1.1 Suroviny pro výrobu vláknitých desek .....	10
1.2 Skladování suroviny .....	11
1.3 Schéma výroby vláknitých desek .....	11
1.4 Odkorňování dřevní hmoty .....	12
1.5 Výroba štěpek sekáním .....	13
1.6 Třídění štěpek .....	14
1.7 Praní štěpek .....	14
1.8 Rozvlákňování .....	15
1.9 Dávkování chemikálií .....	17
1.10 Sušení vlákna .....	18
1.11 Tvorba vláknitého koberce .....	18
1.12 Lisování desek .....	19
1.13 Chlazení .....	20
1.14 Opracování desek .....	20
1.14.1 Broušení .....	20
1.14.2 Profilování povrchu .....	21
1.15 Dokončování desek .....	21
1.15.1 Nátěrové hmoty .....	21
1.15.2 Olepování dekoračními papíry .....	21
1.16 Produkce MDF desek .....	22
<b>2. Základy přenosu tepla .....</b>	<b>22</b>
2.1 Zachování energie .....	23
2.2 Vedení tepla .....	24
2.3 Konvekce .....	25
2.4 Záření .....	27
<b>3. Počítačové modelování .....</b>	<b>28</b>
3.1 Postup řešení .....	28
3.1.1 Příprava modelu (Preprocessing) .....	28
3.1.2 Řešení (Solving) .....	30
3.1.3 Vyhodnocení výsledků (Postprocessing) .....	31
<b>4. Popis řešeného úseku výrobní linky .....</b>	<b>32</b>
4.1 Sušicí zařízení .....	32
4.1.1 Princip sušení .....	32
4.1.2 Kontrolní a měřicí zařízení .....	33
4.2 Hlavní zásobovací bunkr .....	34
4.2.1 Bunkr chybného vrstvení .....	34
4.3 Šikmý pásový dopravník .....	35
4.4 Kontinuální předlis .....	36
4.5 Zavázeční koš .....	36
4.6 Přístupy k řešení .....	37
4.6.1 Fyzikální vlastnosti materiálů použitých ve výpočtu .....	38
<b>5. Výpočet tepelných ztrát .....</b>	<b>39</b>
5.1 Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku v hale .....	39
5.1.1 Přenos tepla zářením z vrstvy vlákna do plechového zákrytu v hale .....	39

5.1.2	Výpočet povrchové teploty plechového zákrytu v hale .....	41
5.1.3	Výpočet součinitele přestupu tepla plechového zákrytu v hale .....	42
5.1.4	Tepelná ztráta plechového zákrytu v hale přirozenou konvekcí .....	45
5.1.5	Tepelná ztráta plechového zákrytu v hale zářením .....	46
5.1.6	Celková tepelná ztráta plechového zákrytu v hale .....	47
5.2	Tepelná ztráta šikmého dopravníku v kolně .....	47
5.2.1	Přenos tepla zářením z vrstvy vlákna do plechového zákrytu v kolně ...	47
5.2.2	Prostup tepla přes izolovaný plechový zákryt v kolně .....	49
5.2.3	Výpočet součinitele přestupu tepla plechového zákrytu v kolně .....	50
5.2.4	Tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně přirozenou konvekcí .....	53
5.2.5	Tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně zářením .....	54
5.2.6	Celková tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně .....	54
5.2.7	Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku .....	55
5.3	Tepelná ztráta venkovního zásobovacího bunkru .....	55
5.3.1	Výpočet součinitele prostupu tepla .....	55
5.3.2	Tepelná ztráta prostupem tepla .....	56
5.4	Tepelná ztráta předlisovaného koberce .....	56
5.4.1	Výpočet součinitele přestupu tepla předlisovaného koberce .....	57
5.4.2	Tepelná ztráta předlisovaného koberce přirozenou konvekcí .....	59
5.4.3	Tepelná ztráta předlisovaného koberce zářením .....	59
5.4.4	Celková tepelná ztráta předlisovaného koberce .....	59
<b>6.</b>	<b>Výpočet tepelných ztrát pomocí CFD simulací .....</b>	<b>61</b>
6.1	Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku v hale .....	61
6.1.1	Charakteristika výpočtu .....	61
6.1.2	Geometrie modelu .....	61
6.1.3	Výpočtový model a princip řešení .....	61
6.1.4	Model řešení .....	62
6.1.5	Okrajové podmínky .....	62
6.1.6	Teplotní kontury .....	63
6.1.7	Izoplochy (Isosurface) .....	63
6.1.8	Výsledné hodnoty .....	64
6.2	Tepelný tok do okolí z předlisovaného koberce .....	65
6.3	Porovnání výpočtu tepelných ztrát šikmého pásového dopravníku v hale s CFD simulací .....	67
6.4	Zhodnocení výsledků dosažených výpočtem tepelných ztrát .....	68
<b>7.</b>	<b>Vliv radiace na teplotní profil ve vrstvě vlákna .....</b>	<b>69</b>
7.1	Průběh teploty ve vrstvě vlákna .....	70
<b>8.</b>	<b>Optimalizace zařízení pro ohřev vlákna .....</b>	<b>73</b>
8.1	Konstrukční požadavky pro realizaci ohřevu vlákna .....	74
8.2	Optimalizace proudění vzduchu v zákrytu pásového dopravníku .....	76
8.3	Chladnutí koberce v zavážecím koši .....	78
<b>9.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>80</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>81</b>
<b>11.</b>	<b>Seznam použitých jednotek a veličin .....</b>	<b>82</b>

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2008

.....  
podpis



## ÚVOD

Lidé využívají dřevo díky jeho nezaměnitelným vlastnostem jako stavební materiál již několik tisíc let. Poměr nízké objemové hmotnosti a vysoké pevnosti v porovnání s ostatními stavebními materiály zajišťuje dřevu výborné předpoklady pro použití v konstrukcích. Příčinou vedoucí k rozvoji materiálů na bázi dřeva byla snaha o výrobu velkoplošných produktů a potlačení rozměrových deformací vlivem vlhkosti a teploty. Aglomerované materiály do jisté míry řeší problémy dřeva jako jsou heterogenita, anizotropie a rozměrová nestálost. Získávají se spojováním dezintegrovaného rostlinného materiálu na plošné či tvarové výrobky. Díky vzrůstajícímu technickému pokroku se zvyšují možnosti zpracovávání dřeva a výroby technologicky dokonalejších produktů. Na počátku se používal pouze jeden typ univerzálních desek. V současnosti se výroba desek řídí podle účelu použití. Mezi výrobky na bázi dřeva používaných ve stavebnictví patří např. OSB desky (velkoplošný materiál vyráběný z plochých třísek), multifunkční panely (MPF- určené k nosným účelům), kombinované dřevo-plastové desky (WPC), protipožární desky Grenamat apod.

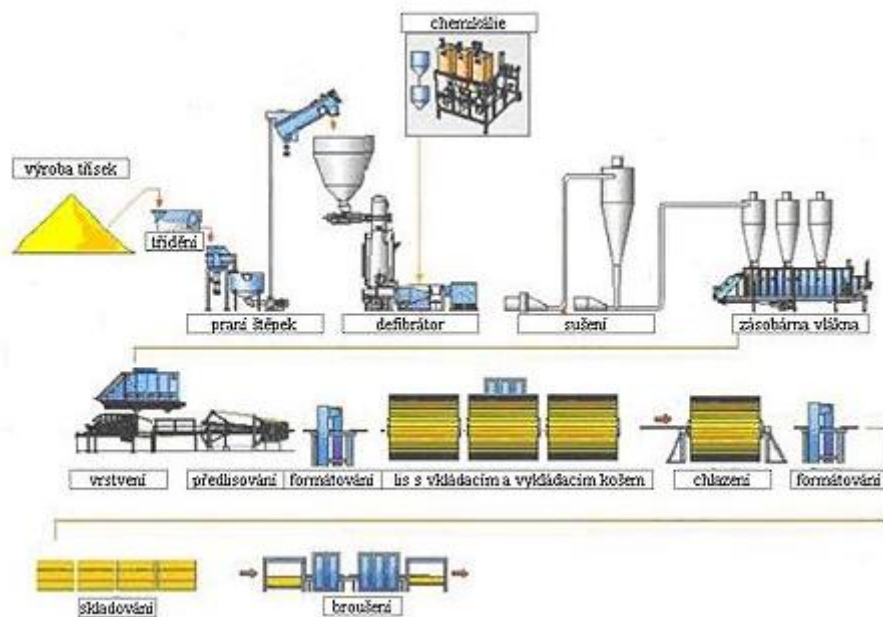
MDF desky se vyrábějí převážně ze smrku, zbytkovou surovinou je buk a borovice. Dřevní hmota do MDF linky vstupuje v podobě štěpky, proto je nejprve sekána na bubnové sekačce. Štěpky jsou skladovány v 5-ti boxech podle druhu a odtud jsou dávkovány do linky dle vyráběné kvality desky. Nadávkovaná štěpka je nejprve vytříděna (nežádoucí frakce pokračuje na dřevotřískovou linku) a poté je čištěna, a to z důvodu odstranění minerálních nečistot. Vypraná štěpka je plastifikována ve vařáku za zvýšené teploty a tlaku a odtud je vynášena do defibrátoru, kde je rozvlákněna na jednotlivá dřevní vlákna. K výrobě MDF desek je také kromě dřeva zapotřebí chemických substancí jako jsou lepidla, močoviny, parafín nebo parafínová emulze. Chemikálie jsou dávkovány tryskami přímo do potrubí v úseku před sušicím zařízením. Po rozvláknění pokračuje vlákno do sušárny, kde je vysušeno na požadovanou vlhkost. Poté je pneumaticky přepraveno do zásobníku před vrstvičkou. Navrstvený koberec je předlisovaný, podélně a příčně ořezaný a zasunutý do vkládacího koše. Po zalisování následuje chlazení a formátování desek, poté pokračují desky do skladu zrání a na broušení.

Název MDF vznikl složením prvních písmen z anglického názvu *Medium Density Fibreboard* (Středně hustá vláknitá deska) a též německého názvu *Mitteldichtefaserplatten*. MDF se vyrábí z dřevěných vláken spojených syntetickým lepidlem, za zvýšené teploty a tlaku. Jsou určeny pro použití pro nenosné účely v nábytkářství, truhlářství, frézarských dílnách a pro další použití v interiéru. Desky se vyznačují stejnorodou strukturou slisovaných vláken v celém svém průřezu umožňující kvalitní zpracování povrchu frézováním a lakováním. Jsou vyráběny převážně jako jednovrstvé, ale mohou být i vícevrstvé. Vysoká mechanická pevnost a rozměrová stabilita je zaručena díky této jemné struktuře. Hladký povrch upravený broušením, pevné hrany, homogennost a výborná obrobitelnost patří k pozitivním vlastnostem těchto desek. Desky MDF jsou plnohodnotnou náhradou masivního dřeva, především do náročnějších aplikací a lze je dále povrchově upravovat laminováním, vysokotlakým laminátem, dýhováním a frézováním v ploše i hraně. Mezi jejich nesporné výhody patří především vysoká odolnost proti tepelnému namáhání a snadná údržba. Hustota desky běžně dosahuje hodnot od 700 do 870 kg·m<sup>-3</sup>.

Výrobní proces je většinou navržen především z hlediska realizovatelnosti, správné funkčnosti životnosti, investičních a provozních nákladů atd. Vhodné úpravy ve výrobním řetězci mohou zlepšit výkonnost celého výrobního procesu. Z hlediska produktivity výroby je potřeba co nejvíce zkoordinovat a zefektivnit jednotlivé výrobní procesy. Stabilizace teploty dřevěného vlákna a jeho optimální teplota na vstupu do lisu je jedním z mnoha faktorů, které mohou být v tomto případě přínosem k celkové prosperitě výroby.

# 1. Technologie výroby středně hustých vláknitých desek MDF

Neustálou modernizací výrobní technologie se dosahuje nejen vyšší kvality výrobku, ale zároveň se přispívá k celkové ochraně životního prostředí. Stávající části výrobních procesů jsou podrobeny nejrůznějším úpravám nebo jsou dokonce nahrazovány novými, vždy podle aktuálních potřeb daných finální podobou výrobku. Trendy ve výrobě se řídí hlavně podle poptávky zákazníků. Vždy se přitom vychází ze základní koncepce výroby, která je dána dlouholetými zkušenostmi a tradicemi. Na obr. 1.1 je velice zjednodušeně znázorněna technologie výroby MDF desek.



Obr. 1.1 Zjednodušené schéma MDF linky [9]

## 1.1. Suroviny pro výrobu vláknitých desek

Vlastnosti dřeviny pro výrobu vláknitých desek se z hlediska vhodnosti pro danou technologii výroby liší od dřevin požadovaných pro výrobu třískových desek. Ve výrobě vláknitých desek jsou nejpodstatnější parametry suroviny jako rozvláknitelnost, délka dřevních vláken, obsah ligninu a hemicelulóz.

Zpočátku se používaly jehličnaté a měkké listnaté dřeviny, které tyto vlastnosti splňovaly. Vyznačují se zejména nižší hustotou a zároveň jsou vhodné pro svou větší délku dřevního vlákna, která zaručuje dostatečné pevnostní vlastnosti desek i bez přidání pojiva. V dnešní době se vzhledem k cenovým úrovním musí přistupovat i ke zpracování tvrdých listnatých dřevin, jako je například buk, dub, jasan nebo habr. Tyto dřeviny jsou vhodné díky vyššímu obsahu hemicelulóz, které přispívají k adhezi vláken a potřebné pevnosti i bez přídavného lepidla.

Volba typu používaných dřevin je nepochybně závislá na možnostech lokality, ve které se výrobní linka nachází. Dnes už je naprostou samozřejmostí, že se nejrůznější druhy dřevin vzájemně promíchávají. Vždy je ale potřeba dodržovat předem stanovené procentuální

zastoupení jednotlivých surovin, které má vliv na množství přídatných chemikálií a tvrdidla k lepicí směsi.

## 1.2. Skladování suroviny

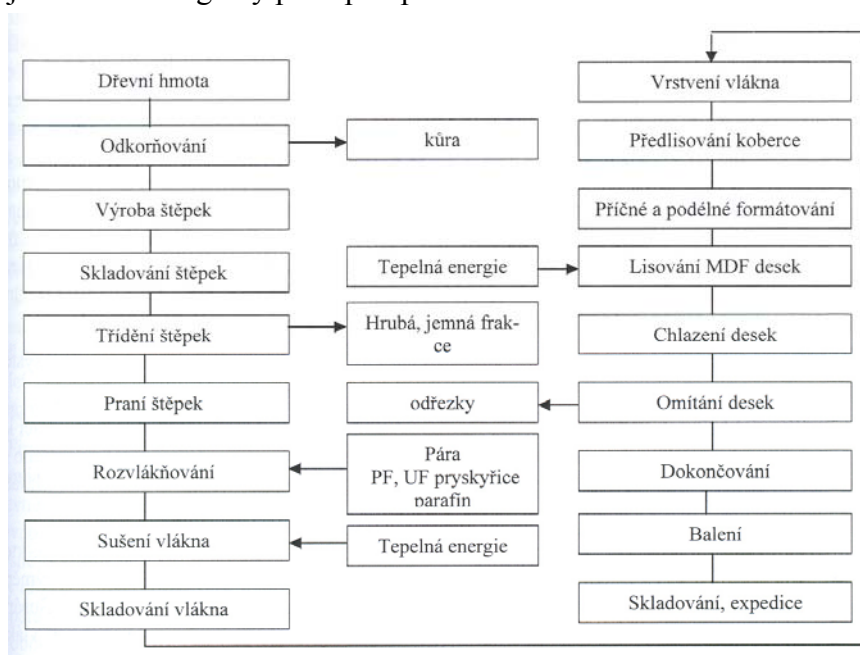
Pro nepřetržitý provoz výrobní linky je zapotřebí zajistit dostatečné zásoby dřevní hmoty na určitou dobu. Jedná se o období zhruba 14 dnů. Uskladňování většího množství suroviny je neekonomické. Dřevní hmota je z lesa dopravována na dřevosklad, kde je skladována odděleně podle dřevních druhů. Tento způsob skladování později umožňuje výběr suroviny a následné vytvoření směsi v libovolném poměru.

Manipulace s dřevní hmotou je zajištěna strojně za pomoci jeřábu, nakladači s chapadly, vysokozdvíhými vozíky nebo pásovými dopravníky. Plocha vyhrazená pro dřevosklad je umístěna na rozlehlém prostranství nejlépe v těsné blízkosti výrobního závodu. Z hlavního úložiště putuje dřevní hmota do meziskladu, který se nachází v blízkosti odkorňovacího a sekacího zařízení. Jeho cílem je pokrytí aktuální poptávky výrobní linky.

## 1.3. Schéma výroby vláknitých desek

Vláknité desky mohou být vyráběny mokrým nebo suchým způsobem. Rozdíl mezi výrobou se projevuje v odlišných technologických postupech a jejich posloupnostech. Nejpodstatnější rozdíl je patrný ze způsobu dávkování chemikálií a tvorby vláknitého koberce. U mokrého způsobu se vlákno udržuje ve vodní suspenzi v tzv. látkových jámách, do kterých jsou chemikálie přimíchávány. Formování vláknitého koberce probíhá rovněž z vodní suspenze odvodněním na síť. U suchého způsobu se dávkuje obdobné chemikálie, ovšem v odlišné formě. Vlákno je dopravováno suchou cestou pneumaticky nebo na dopravnících.

Problematika řešeného úkolu se zabývá suchým způsobem výroby vláknitých desek, jehož technologický postup odpovídá blokovému schématu na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Blokové schéma výroby MDF desek [1]

Základními technologickými uzly výroby vláknitých desek jsou procesy:

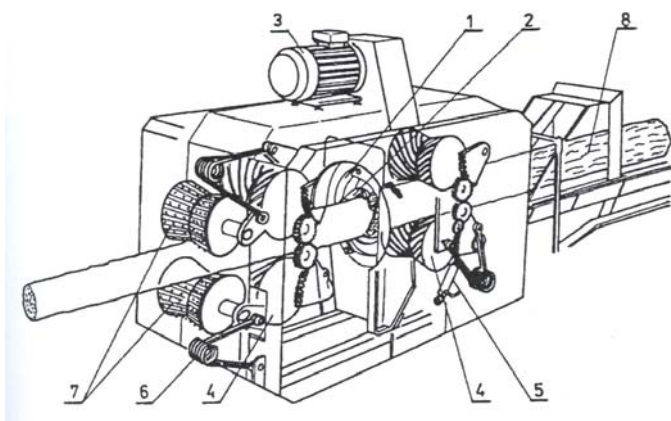
- Odkorňování
- Výroba štěpek sekáním
- Praní štěpek
- Rozvlákňování
- Sušení vlákna
- Tvorba vláknitého koberce
- Lisování desek
- Opracování desek

#### 1.4. Odkorňování dřevní hmoty

Odkorňování dřevin je nutné provádět z mnoha důvodů. Mezi hlavní problémy patří ochrana technologických strojních zařízení před mechanickým poškozením. Přítomnost kůry v surovině způsobuje otupení sekacích a rozvlákňovacích nástrojů, a tím snižuje i jejich celkovou životnost. Dalším zásadním problémem jsou požadavky na kvalitu vyráběných desek. Kůra obsahuje nejružnější organické i anorganické příměsi, které se v ní vyskytují od počátku růstu dřeviny nebo se do ní mohou dostat v průběhu přepravy či skladování. Přítomnost kůry především v horních vrstvách lisovaných desek má za následek zhoršení jejich fyzikálních a mechanických vlastností. V konečné fázi způsobuje značné problémy zejména s nánosem nátěrových hmot, laminováním, foliováním nebo s jinými povrchovými úpravami.

Proto je nezbytné vřazení odkorňovacího zařízení do výrobního procesu. Mezi nejčastěji používané odkorňovače patří stroje rotorové a frézovací. V menší míře se také používají odkorňovače bubnové nebo tryskové.

Použitím **rotorového odkorňovače** dosahujeme horší kvality odkornění oproti strojům pracujícím s řeznými nástroji, neboť je kůra oddělována tupými nástroji (viz obr. 1.2). Výsledná kvalita odkornění hodně závisí na vlhkosti, čím je vlhkost vyšší, tím je odkornění důkladnější. Odkorňovací nástroj je k povrchu dřeva přitlačován



mechanicky pomocí pružin, pneumaticky nebo hydraulicky a zároveň je podle potřeby otáčen kolem své osy. Kůra je odstraňována několikanásobným přejetím řezného nože, od čehož se odvíjí konečná kvalita odkornění. Dřevina je posouvána pomocí podávacích válců a její přímočarý směr je jistěn vodícími válci.

Obr. 1.2 Rotorový odkorňovač [1]

1...odkorňovací rotor, 2...odkorňovací nástroj, 3...elektromotor, 4...podávací válce, 5...přímochařý hydromotor, 6...pružina, 7...vodící válce, 8...výřez

**Frézovací odkorňovače** kůru oddělují ostrými řeznými nástroji, které jsou osazeny v rotujících nožových hlavách. Jsou přitlačovány k otáčejícímu se kmeni a kůru odstraňují v několika vrstvách. **Tryskové odkorňovací zařízení** kůru odstraňuje pomocí vysokého tlaku pracovního média. Používané médium je voda nebo vzduch.

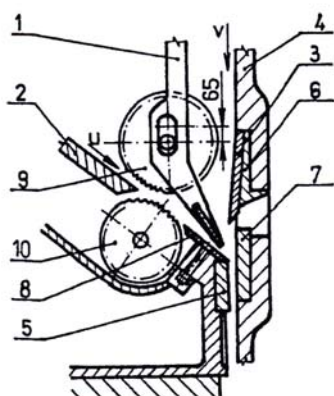
## 1.5. Výroba štěpek sekáním

Štěpka je výchozí polotovár, ze kterého se dalšími technologickými operacemi získává dřevěné vlákno. Vyrábí se sekáním dřevní hmoty na různých typech sekaček. Rozměry dřevní hmoty mají podstatný vliv na velikost štěpek. Čím jsou menší tím horší kvality dosahují, neboť obsahují větší podíl hrubé, ale i jemné frakce. Pro výrobu dřevovláknitých desek je optimální rozměr štěpky 20-30 × 40-50 × 3-5 mm.

Mezi nejpoužívanější patří sekačky diskové (viz obr. 1.3) a bubnové (viz obr. 1.4), které se vyskytují v provedení stacionárním nebo pojízdném. Kromě těchto základních typů existují i jejich různé varianty, jako jsou sekačky spirálové, kuželové, dvojdiskové.

### Disková sekačka

Poloha disku může být vodorovná, svislá nebo šikmá s různým počtem nožů. Průměr disku se pohybuje dosahuje velikosti až 3 m. Nože vyčnívají z boční plochy kotouče a jejich ostří je orientováno po poloměru. Dřevní hmota je k sekačce přiváděna samospádem nebo hnanými podávacími válci.

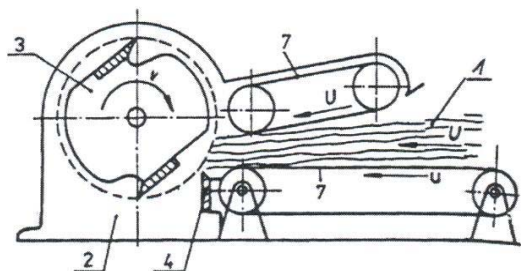


1...přítlačné zařízení, 2...dno žlabu, 3...nůž, 4...kotouč, 5...protinůž, 6...klínová podložka, 7...ochranná vložka, 8...ochranná deska, 9... podávací válce, 10...podávací válce

Obr. 1.3 Disková sekačka na pilařské odřezky [1]

### Bubnová sekačka

Štěpkovací proces je založen na rotačním pohybu řezných klínů upevněných na rotujícím tělese. Podle druhu sekané suroviny se řezný proces uskutečňuje buď ve formě otevřeného cylindrického frézování anebo ve formě kombinace cylindrického frézování s rotačním krájením.



1...dřevní hmota, 2...zákryt, 3...rotující těleso s řezným nástrojem, 4...protinůž, 7...pásový dopravník

Obr. 1.4 Bubnová sekačka na dlouhou vlákninu [1]

Do sekacích zařízení se upevňují nože různých tvarů a velikostí. Jejich masivní konstrukce musí být přizpůsobena velkým silám, které přenášejí. Přisun materiálu do sekačky je zajištěn pomocí pásového dopravníku nebo vibračního žlabu. Vhodné je v této přívodní části osazení detektoru kovu, abychom zabránili případnému poškození sekačky kovovými předměty. Pro konstantní rychlost vstupu dřevní hmoty do sekačky slouží vtažovací válce, kterými jsou některé moderní sekačky opatřeny. Díky jejich použití dosáhneme rovnoměrné kvality a délky štěpek. Nežádoucím jevem je rovněž vznik dlouhých štěpek, které jsou značně delší než je obvyklá délka.

Za pomoci tzv. dezintegrace se dosáhne požadované délky štěpek. Princip spočívá v síťovém efektu, kdy se dlouhé štěpky zachytí na síťovací ploše. Protitraverza zabudovaná v sekacím prostoru působí jako protinůž, který zkracuje délku elementu.

## 1.6. Třídění štěpek

Nasekané štěpky se skladují v dalším stupni zásobování výrobní linky. Většinou se jedná o venkovní oddělené a zastřešené boxy s betonovým nebo asfaltovým podkladem (viz obr. 1.5). Štěpky jsou zde volně sypané z dopravníku na hromadu, jejíž výška by neměla přesáhnout hranici 15 m. Účelem tohoto druhu skladování je oddělení jednotlivých druhů dřevin a zároveň jejich ochrana před přírodními vlivy. Velký problém způsobuje přítomnost mikroorganismů v hromadách štěpky. Jejich biologické procesy mohou být příčinou samovznícení. K nárůstu vnitřní teploty dochází v různých místech v závislosti na tvaru hromady. Mikroorganismy také způsobují chemické změny, které se projevují v hmotnostním úbytku štěpky a ve změnách její vlastností.

Proto je velmi důležité, aby docházelo k její neustálé obměně. Zejména pak ve spodních vrstvách, kde se frekvence obměny štěpky s narůstající hloubkou snižuje.



Obr.1.5 Skladování štěpky

U listnatých dřevin je maximální doba skladování štěpky 2 až 3 měsíce, u jehličnatých 4 až 5 měsíců.

Z boxu jsou štěpky dopravovány na dopravnících buď pro MDF linku na rozvláknění nebo pro výrobu dřevotřískových desek (DTD) na roztřískování.

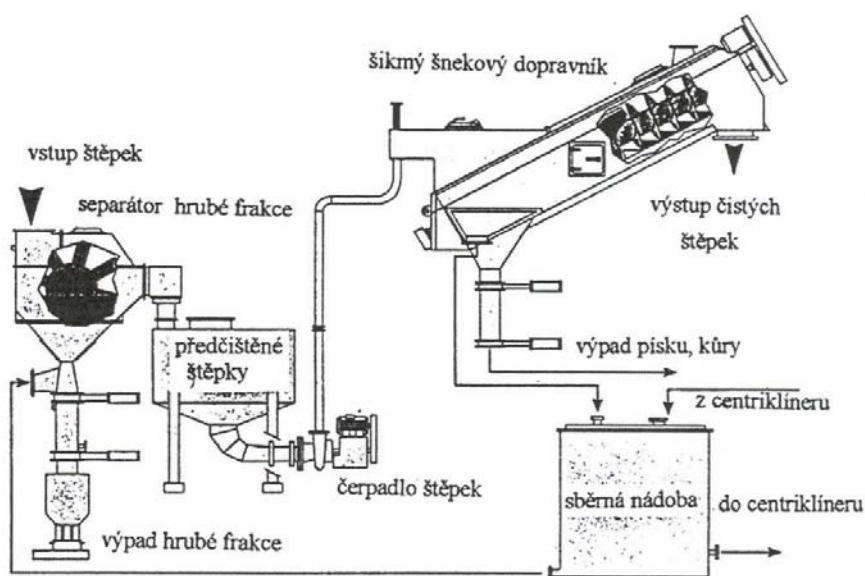
## 1.7. Praní štěpek

Účelem praní štěpky je odstranění nejrůznějších rozměrově variabilních příměsí, které se v této nehomogenní směsi nacházejí. Jedná se zejména o přírodní složky jako jsou zrnka

písku, hlína, zbytky kůry, minerální příměsi popřípadě kovové částice. Některé tyto nežádoucí příměsi se odstraní již na rovinných vibračních síťových třídících. Kovové předměty odhalí zabudované elektromagnety. Ovšem důkladná eliminace zbytkových částic se uskuteční až důkladným praním štěpek.

Při praní dochází zároveň ke zvýšení povrchové vlhkosti a částečnému ohřevu. Zejména v zimním období je tento fakt užitečný, neboť se částečně ušetří čas a energie potřebná na ohřátí dřeviny v sušicím zařízení. Díky důkladnému pročištění štěpky od nežádoucích příměsí prodloužíme životnost ostatním strojním zařízením na výrobní lince. Jedním z nejdůležitějších zařízení je např. defibrátor na rozvlákňování. Životnost jeho rozvlákňovacích segmentů se v důsledku praní štěpky prodlouží ze 600 hodin na 2000 hodin. Prodlouží se doba po kterou jsou segmenty schopny produkovat vlákno požadovaných parametrů.

Princip praní štěpky je patrný ze schématu na obr. 1.6. Surovina obsahující nečistoty je přivedena pásovým dopravníkem k hornímu okraji separátoru hrubé frakce. Jedná se o nádobu s vodou, která je rozmíchávána lopatkovým mechanismem. Na základě rozdílné hustoty se zde oddělují hrubé nečistoty a propadávají otvorem u dna nádoby. Předčištěné štěpky jsou hydraulicky dopravovány pomocí čerpadla na šikmý šnekový dopravník, kde probíhá druhá fáze čištění. Štěpky jsou proplachovány proudem vody, který z nich vymývá zbylé nežádoucí příměsi jako jsou minerální nečistoty nebo zbytky kůry. Vyplavené nečistoty se zachycují v odběrných místech pod šnekovým dopravníkem. Voda se nashromáždí ve sběrné nádobě, nechá se vyčistit a je použita opět pro další proplachování. Jedná se tedy o praní štěpky s uzavřeným okruhem vody.

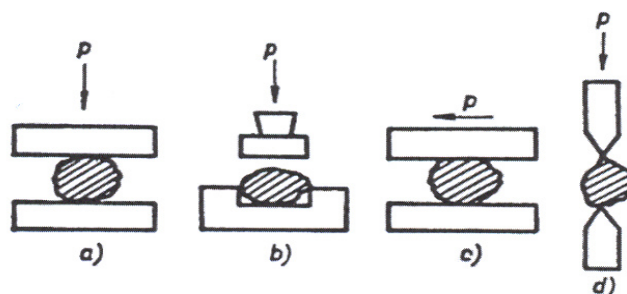


Obr. 1.6 Pračka štěpek [1]

## 1.8. Rozvlákňování

Rozvlákňování spočívá v mechanickém rozvolňování dřeviny na jemnější frakci. Dochází k porušení soudrznosti ve střední lamelle dřeviny za předpokladu celistvosti a štíhlosti vlákna. Pro soudrznost vláken ve vylisované desce je důležitá celistvost a nenarušenost buněčné stěny.

Proces dezintegrace probíhá mletím štěpky v různých typech mlýnů. Pozitivní vliv na průběh rozvláknování má působení tepla, vlhkosti nebo například chemikálií. Při samotném uvolňování vláken se využívá třecích a tlakových sil. Několik základních způsobů je na obr. 1.7.



Obr. 1.7 Způsoby rozvláknování [1]

a) tlakem, b) úderem, c) třením, d) štípáním

Metody rozvláknování se dělí do čtyř základních skupin

- Mechanické
- Chemomechanické
- Termomechanické
- Vystřelovací

U **mechanické metody** se dezintegrace dosahuje za pomoci tření, nejčastěji broušením. Dřevní hmota je přiváděna shora a přitlačována k brusnému kamennému válci, který je z druhé strany smáčen a vlhčen ve vodní lázni. Rotující válec obsahuje na povrchu ostrá zrna, která vyřezávají z dřeviny jednotlivá vlákna popřípadě jejich celé svazky. Vlákno prochází vodní lázní pod válcem, následně se třídí, domílá a vysušuje. Výsledným produktem je dřevovina, která se používá pro výrobu lepenky a novinového papíru. Jelikož se při broušení porušuje celistvost vláken, není vhodná pro výrobu vláknitých desek. Zároveň vzniká i velké procento krátkých a jemných vláken vhodných spíše k výrobě papíru.

Další možností rozvláknění je mletí v Bauerově mlýně. Skládá se ze dvou protiběžných segmentů, které produkují vláknitou suspenzi obdobných vlastností jako dřevovina.

**Chemomechanická metoda** je využita pro případy těžko rozvláknitelné suroviny. V kombinaci s mechanickým způsobem se štěpky vaří s 1 % NaOH při tlaku 5–6 bar. Chemická reakce hydroxidu sodného s dřevní hmotou při těchto podmínkách způsobuje snadnější rozpad střední lamely a následné rozvláknění. Nevýhodou této metody je poměrně velký úbytek dřeviny, který může dosáhnout až 20 %.

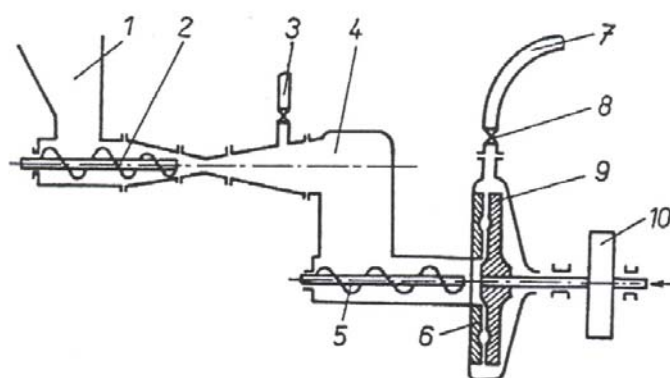
**Vystřelovací metoda** patří mezi nejstarší způsob rozvláknování, který byl používán pro výrobu vláknitých desek. Princip je založen na expanzi štěpky v autoklávu, neboli v tzv. Mansově děle. Autokláv se nejprve naplní štěpkami. V první fázi procesu se dovnitř přivádí pára o tlaku 2-2,4 MPa po dobu 30-40 s. Pára způsobí ohřev štěpky na teplotu 210-220 °C. V druhé fázi se tlak zvýší na 8,5 MPa, doba přívodu této vysokotlaké páry se zkrátí na 2-5 s. Teplota v autoklávu vystoupá k hranici 285 °C. Následuje otevření hydraulicky ovládaného regulačního ventilu a mohutná expanze parou nasycené štěpky, která dosahuje rychlosti



až  $1200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Finální fází je konečný rozpad dřeva průchodem přes roštovou vložku vypouštěcího ventilu.

Vlákna roztržená vnitřním přetlakem získávají vhodné vlastnosti pro vzájemné slepování při lisování, neboť dochází k výrazné depolymerizaci hemicelulos. Zároveň si zachovávají svoji původní délku. Velkým nedostatkem této metody je úbytek dřevní hmoty pohybující se kolem hodnoty 25 %.

**Termomechanická metoda** rozvlákňování je považována za nejrozšířenější v Evropě. Vychází i z prakticky ověřené teorie poklesu spotřeby energie s rostoucí teplotou dřeviny. U jehličnatého dřeva se výrazný pokles projevuje při  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  a u listnatého při  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ . K tomuto jevu dochází v důsledku plastifikace střední lamely, která zajišťuje soudržnost vlákna ve dřevní hmotě. Na základě tohoto objevu byl tento způsob rozvlákňování pojmenován podle jeho objevitele Asplunda. Princip Asplundova rozvlákňovacího zařízení je znázorněn na obr. 1.8.



- 1...násypka štěpek, 2...šnekové podávací zařízení, 3...přívod páry, 4...svislý předehříváč štěpek, 5...podávací šnek do mlecí komory, 6...pevný rozvlákňovací kotouč, 7...odvod vlákna do cyklonu, 8...výpustný ventil, 9...rotující kotouč, 10...pohon rotujícího kotouče

Obr. 1.8 Asplundovo rozvlákňovací zařízení [1]

Princip termochemické metody vychází z již známého mletí štěpky v Bauerově mlýně. Ovšem štěpky jsou nejprve zahřívány sytou parou o tlaku 8-12 barů v autoklávu na teplotu až  $185 \text{ }^\circ\text{C}$ . Za konstantního tlaku jsou za pomoci podávacího šnekového dopravníku dopravovány do mlecí komory, která se skládá ze stacionárního a rotujícího segmentu.

Zařízení je též známo pod pojmem defibrátor, jenž pochází z názvu švédské firmy, která se jejich výrobou zabývá. Mezi nejdůležitější vlivy na kvalitu vlákna vyráběného defibrováním patří:

- vlhkost dřevní hmoty
- dosažená teplota štěpky předehřátím v autoklávu
- kvalita mlecích segmentů a opotřebení mlecích disků
- rychlost průchodu štěpky přes mlecí segmenty v závislosti na tlaku
- velikost mezery mezi mlecími disky

## 1.9. Dávkování chemikálií

Ve speciálním případě lze vyrábět vláknité desky bez přídavného pojiva. Toto je možné pouze u jehličnaté dřeviny za předpokladu dodržování pečlivého technologického postupu a vynikajícího stavu strojních zařízení. Ve skutečnosti se však bez přidávání pojiva v podobě

formaldehydové pryskyřice nelze obejít. Alkalická pryskyřice musí být mísitelná s vodou a v podobě 10 % roztoku se dávkuje do systému v množství závislejícím na druhu desky a jejich požadovaných vlastnostech. U MDF linky je spotřeba 6-8 % přidávaného fenolformaldehydového lepidla (PF pryskyřice) a 8-10 % močovinoformaldehydového lepidla (UF pryskyřice) na absolutně suché (a.s.) vlákno.

U suchého způsobu výroby vláknitých desek se pryskyřice přivádí pomocí trysek. Trysky jsou umístěny v potrubní trase spojující defibrátor se sušicím zařízením. Někdy jsou současně vstříkávány další chemikálie podporující kvalitu výroby jako jsou (fungicidy, insekticidy, retardéry hoření apod.). Tomuto způsobu dávkování se někdy také říká „Blow-line“, neboli injekční způsob. Dokonalost promíchání chemikálie s vláknem zaručuje turbulentní proudění v potrubí.

Tímto způsobem aplikace se sice zvyšuje množství spotřebované pryskyřice, neboť část lepidla se odpařuje při sušení vlákna, avšak na druhou stranu lze zaznamenat výrazné investiční a provozní úspory v podobě strojních zařízení jako jsou zanášečky, ventilátory nebo např. chladicí systémy.

Působení vlhkosti má za následek objemové změny materiálu, což může vést k jeho nestabilitě popřípadě ke zhroucení struktury vláknitých desek (VD). Aby bylo tomuto jevu zabráněno, přivádí se do látky hydrofobizační prostředek. V případě dřevěných vláken se jedná o parafínovou emulzi. Parafín se přivádí již do svislého předeříváče (autoklávu) nebo do mlecí komory defibrátoru. Množství opět závisí na požadovaných vlastnostech a typu výrobku. Koncentrace parafínu se pohybuje mezi 1-2,5 % na a.s. vlákno.

## **1.10. Sušení vlákna**

Pro sušení vlákna se používají proudové sušárny vertikální nebo horizontální. Vlákno je vysušováno ve vlnosku horkého média. Sušárna může být vyhřívána spaliny zemiho plynu, lehkými topnými oleji (LTO) nebo vodní párou. Vlákno se zde vysušuje na výstupní vlhkost 8-12 %. Tato poměrně vysoká vlhkost vlákna je dána předchozím dávkováním lepidla. S ohledem na vlastnosti lepidla není možné zvýšit úroveň vysoušení. Jelikož se teploty v sušárně pohybují v kritických hodnotách, je zapotřebí opatřit sušicí tunel protipožárním a hasícím zabezpečením s ohledem na zápalnou teplotu dřevěného prachu.

Výstupním zařízením proudové sušárny je odlučovací zařízení (cyklón), v něm odchází vodní pára do ovzduší a vlákno propadá přes turniket na reverzní dopravník, kde je kontrolována jeho vlhkost. V případě, že vlákno nesplňuje předepsaná vlhkostní kritéria, je tímto dopravníkem sypáno do sběrného bunkru odkud je převezeno do kotelny ke spálení. V opačném případě putuje soustavou dopravníků směrem k vrstvicí stanici.

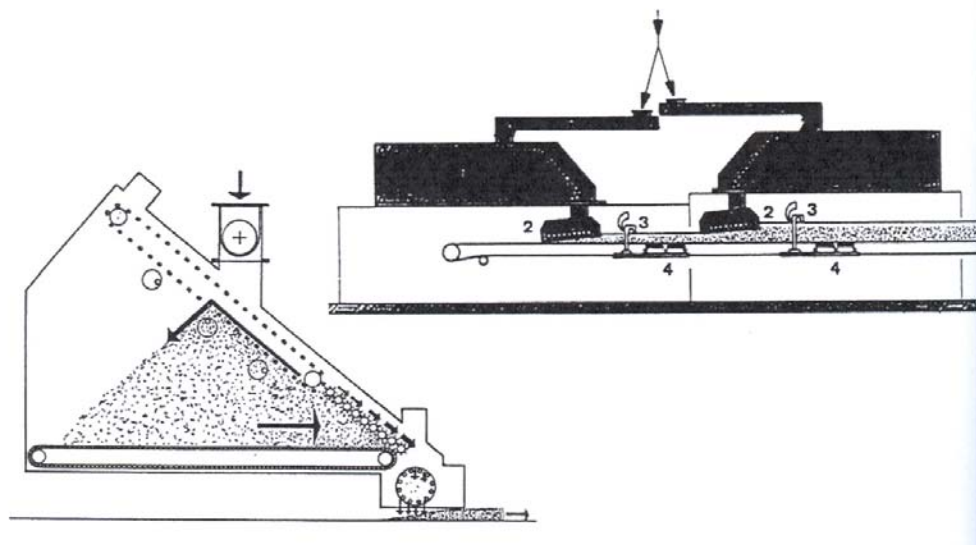
## **1.11. Tvorba vláknitého koberce**

U suchého výrobního procesu je tvorba vláknitého koberce, dále jen (VK), velice důležitý technologický mezistupeň. Důraz je především kladen na správnou plošnou hmotnost VK (navrstvení), od kterého se odvíjí konečné fyzikální a mechanické vlastnosti desek. Na rozdíl od mokrého způsobu kdy se VK formuje z vodní suspenze odvodněním na síť, prochází vlákno v tomto případě přes vrstvicí stanici.

Moderní výrobní linky používají mechanický způsob vrstvení, který zaručuje vysokou přesnost v rozložení vrstvy VK. Díky této metodě probíhá celý proces vrstvení v jedné jednotce pro všechny vyráběné tloušťky MDF desek. Nedochází ke znečišťování okolního ovzduší a tvorby nebezpečné výbušné směsi vlákna se vzduchem. Sníží se tím riziko vzniku exploze a požáru v systému na minimum.

Je důležité si uvědomit, že před samotným vstupem do vrstvičky prochází vlákno spleťovou trasou dopravníků a zásobovacích bunkrů. Ty mají za úkol vytvořit dostatečnou zásobu a zároveň rezervu pro případy krátkodobého nedostatku vlákna. Jelikož jsou ve výrobním programu zahrnuty různé rozměrové řady desek je logické, že s narůstající tloušťkou poroste i požadavek po kvantitě vlákna.

Vlákno je do horní vstupní části vrstvicí stanice (viz obr. 1.9) dopravováno pásovým rozdělovacím dopravníkem. Svým kyvným pohybem vlákno rovnoměrně sype po celé šíři dávkovacího zásobníku vrstvicí stanice. Uvnitř se nachází soustava prohrabovacích a sčesávacích mechanismů, které vlákno urovnávají a zároveň zhutňují. Ve spodní části stanice se již formuje samotný vláknitý koberec o tloušťce odvíjející se od požadované výrobní rozměrové řady. VK poté putuje po výrobní lince směrem ke kontinuálnímu předlisu.



Obr. 1.9 Schéma vrstvičky vlákna [1]

1...horizontální zásobník s posuvným dnem, 2...mechanická vrstvicí hlava s válci pro rovnoměrné rozdělení vlákna, 3...výškově stavitelné egalizační válce, 4...váha pro stanovování plošné hmotnosti vláknitého koberce

## 1.12. Lisování desek

Před samotným lisováním desek je nutné provést redukcí tloušťky VK, neboť volně navrstvený VK má na výstupu z vrstvičky výšku 500-1200 mm a hustotu ( $25-50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Provádí se kontinuální předlis díky němuž snížíme tloušťku VK o 50-70 %. Proces předlisu je rozdělen do dvou navazujících fází. Nejprve se mírným přitlakem vytlačí z meziprostoru vzduch. K tomuto účelu je vhodné použít pásy z porézního materiálu, aby mohl vzduch volně unikat. V druhé fázi dochází za vyššího tlaku k samotnému předlisování. Následuje kontrola plošné hmotnosti. Pokud nevyhovuje, dochází k rozpadu předlisovaného koberce. Vlákna jsou

vedena pneumaticky potrubím zpět do úseku před vrstvicí stanicí. Nejčastěji se využívá návrat vlákna do bunkru chybného vrstvení, který se nachází v blízkosti hlavního zásobovacího bunkru. Odtud je zpátky přimícháno do výrobního procesu. Vhodným řešením je opatření úseku za předlísou detektorem kovu pro zachycení kovových částic, které nebyly dříve zjištěny. V tomto případě je VK veden ke spálení v kotli pro vývin páry do proudové sušárny.

Vlivem působení předlisy se vrstva vlákna rozšiřuje do stran. Tyto okrajové části mají nižší plošnou hmotnost. Proto jsou ořezávány přiměřeně široké okrajové pásy. Odpadlá vláknitá hmota je vrácena opět do úseku před vrstvicí stanicí.

Samotné lisování MDF desek probíhá v kontinuálních jedno nebo více etážových lisech. Rychlost průběhu lisování závisí především na teplotě a vlhkosti přiváděného vlákna. Obecně však vyžaduje kratší čas než lisování VD vyráběných mokřím způsobem. Ovšem lisuje se při vyšších tlacích (6-7 MPa). Lisovací teploty se pohybují v rozmezí 210-220 °C, při vyšších teplotách dochází k tmavému zabarvení desky. Prohřátá vlákna uvnitř vrstvy se stávají plastickými a nechají se snadněji zhustit než vlákna studená. Prohřátí vrstvy se uskutečňuje v čase mezi uzavíráním lisu a dosažením požadované tloušťky. Z toho vyplývá, že čím rovnoměrněji prohřátá vrstva VK do lisu přivedeme, tím výrazněji se zkrátí lisovací čas. Zároveň se zlepšují mechanické vlastnosti desek.

### **1.13. Chlazení**

Po vyjmutí z lisu je potřeba nechat desky zchladit na teplotu okolního prostředí. Chlazení probíhá ve hvězdicových turniketech. Poté následuje příčné a podélné formátování a uskladnění desek do stohů. Následuje samotný proces povrchových úprav.

### **1.14. Opracování desek**

Pro konečné úpravy desky je potřeba polotovary nejprve důkladně opracovat. Tomuto procesu je věnována patřičná pozornost, neboť je velice důležitý pro výslednou kvalitu desky. Opracování desek se provádí většinou strojně, v některých případech je však zapotřebí ručního opracování.

#### **1.14.1 Broušení**

Desky se brousí na širokopásových bruskách za pomoci brusných papírů rozdílné drsnosti. Jako brusivo se používá karbid křemičitý a oxid hlinitý. Rychlost brusného pásu se pohybuje okolo 1500 m·min<sup>-1</sup>. Poslední broušení se většinou provádí brusným pásem o drsnosti 150, avšak je-li požadavek na hrubší povrch z důvodu nanášení krycích a nátěrových hmot, použije se pás o vyšší zrnitosti (200-300). Pro dosažení nejvyšší kvality povrchu jako je vysoký lesk se provádí jemné broušení oscilační nebo ruční bruskou.

Zvlášť důležité je broušení profilovaných úzkých bočních ploch. Je potřeba zbrousit konce přeřezaných vláken, které vznikají při předešlém formátování. Zabráni se tím nepříjemnostem při následných povrchových úpravách jako je např. lakování. V tomto případě se musí přistoupit k ručnímu broušení, někdy je možná kombinace se strojním opracováním. Od způsobu broušení se také odvíjí rychlost posuvu desek. Nezbytnou součástí při broušení je zabezpečení odsávání prachu, nejlépe formou lokálního podtlakového systému.

### 1.14.2 Profilování povrchu

MDF desky jsou velmi vhodné pro výrobu jakýchkoliv profilů. Je to dáno rovnoměrným rozložením vláken v celém průřezu, což zaručuje, že při opracovávání desky nevniknou dutiny. Nejchoulostivější z hlediska opotřebení je vytváření ostrých hran. U některých tvarově náročných profilů je zapotřebí odstranění velkého množství dřevní hmoty. Proto je výhodné vytvořit profil nahrubo a až v konečné fázi profil s požadovanou kvalitou povrchu.

## 1.15. Dokončování desek

Volba povrchové úpravy závisí na účelu použití desky. Při použití ve stavebnictví postačí i hrubé polotovary, ovšem při použití v interiéru jsou požadovány daleko vyšší nároky na povrchové úpravy a design. Proto se vyvíjejí stále nové technologie povrchových úprav za účelem splnění požadavků zákazníků.

### 1.15.1 Nátěrové hmoty

Dle výrobního programu jsou používány nejrůznější systémy povrchových úprav nátěrovými hmotami. Odvíjí se od typu dokončovacího zařízení a požadavků výrobce na kvalitu povrchové úpravy. Nejběžněji používaný pracovní postup se skládá z:

- Přebušování povrchu ( zrnitost 180-240 )
- Impregnace
- Předbroušení ( zrnitost 240-280 )
- Základní nátěr
- Přebroušení ( zrnitost 320 )
- Konečné lakování (může probíhat i v několika vrstvách) [1]

V tabulce 1.1 je přehled několika možností použití nátěrových hmot.

Tab. 1.1 Přehled povrchových úprav [1]

Označení	Výhody	Nevýhody
Nitrolaky	Snadno aplikovatelné, použitelné pro všechny techniky dokončování, dobrá kvalita povrchu	Vysoký obsah rozpouštědel, ekologicky závadný
Vodou ředitelné akryláty	Použitelné na MDF desky se zaplněným povrchem	Náročnější strojně-technologické zařízení, ekologicky závadný
Kyselinou tvrdnoucí akryláty	Vysoká odolnost a pevnost povrchu, Pro MDF velmi vhodné	Náročnější strojně-technologické zařízení, možnost odštěpování formaldehydu
Dvoukomponentní laky (Laky s isokyanátovou pryskyřicí)	Bezproblémové zpracování, nejlepší postup dokončování povrchu, vysoká kvalita	Náročnější strojně-technologické zařízení, vyšší náklady

### 1.15.2 Olepování dekoračními papíry

Využívá se technologických postupů, které jsou běžně používány i u povrchových úprav třískových desek. To znamená, že se jedná především o dýchování, laminování a foliování. Nejrůznější barevné kombinace, dekory a ornamenty vycházející z designérských představ

podle současných trendů moderní společnosti. Pro lepení jsou požita všechna dostupná lepidla ve dřevozpracujícím průmyslu. Mezi nejčastěji používané technologické postupy patří:

### **Dýchování**

- Nános lepidla ...80-120 g·m<sup>-2</sup>
- Lisovací tlak ...0,35-0,62 MPa
- Lisovací teplota ...70-100 °C u více etážových lisů  
...100-130 °C u 1 etážových a průběžných lisů
- Lisovací čas ...2-4 min. u více etážových lisů  
...30-60 s u 1 etážových a průběžných lisů
- Vlhkost ...MDF...8±2 %  
...Dýha...10±2 % [1]

### **Laminování**

- Teplota ...180-200 °C
- Lisovací tlak ...2,5 MPa
- Lisovací doba ...40-60 s
- Vlhkost MDF ...8±2% [1]

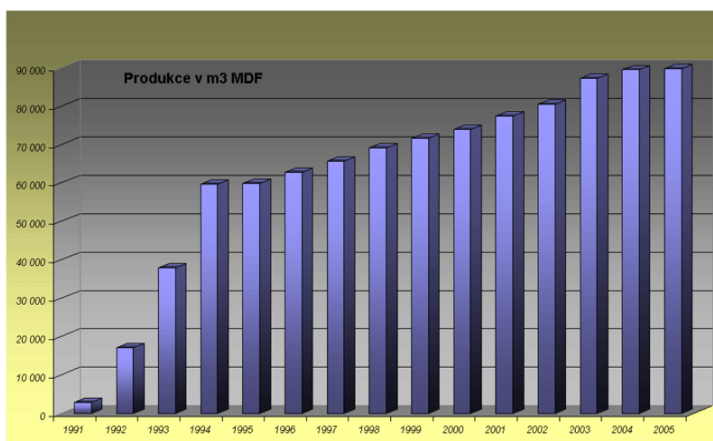
### **Foliování**

Tab. 1.2 Provozní parametry lisů [1]

Typ lisu	Lisovací tlak (N/mm <sup>2</sup> )	Teplota (°C)	Lisovací čas, rychlost
Víceetážový lis	0,5	70 -100	2 - 4 min.
1 etážový lis	0,5	100 - 130	30 - 60 s
Krátkotaktový lis	1,5	120 - 200	5 - 20 s
Válcové kaširování	0	160 - 200	20 – 30 m/min

## **1.16. Produkce MDF desek**

Těžba dřeva v ČR se v posledních letech pohybuje od 12 do 14 mil. m<sup>3</sup> ročně, z čehož 40 až 43 % se využívá na výrobu řeziva, 30 až 32 % na výrobu celulózy, 7 až 15 % na výrobu aglomerovaných desek a 15 až 18 % se vyváží. V současné době, ve které je kladen důraz



na ochranu životního prostředí, vystupují do popředí všechny výhodné vlastnosti aglomerovaných materiálů. Díky celosvětovému trendu, kterým je stoupající zájem o dřevostavby pochopitelně vzrůstá i poptávka po aglomerovaných materiálech. Důkazem toho je zvyšující se produkce výroby MDF desek v ČR (viz obr. 1.10.).

Obr. 1.10 Produkce MDF desek v ČR [9]

## 2. Základy přenosu tepla

K základním principům přenosu tepla patří vedení (kondukce), proudění (konvekce) a záření (radiace). Zákony týkající se přenosu tepla vnímal člověk již v hlubokém dávnověku. Rozpoznával pocity tepla a chladu, sluneční záření a subjektivně dokázal zhodnotit rozdíl mezi teplejšími a chladnějšími tělesy. V průběhu času se stále víc přibližoval ke kvantifikaci tepelné energie. Naučil se využívat oheň jako zdroj tepla a k přípravě pokrmu. Později ho využil i v primitivních technologiích. Osvojil si poznatek, že rozdíl mezi teplejším a chladnějším tělesem se vyrovná na určitou rovnovážnou hodnotu, ale netušil z jakého důvodu. Nerozlišovalo se mezi dnes běžně známými a definovanými pojmy teplo a teplota.

Prvním člověkem, který se pokusil o matematickou definici dějů týkajících se přenosu tepla byl Isaac Newton (1643-1727). Poznatky o sdílení tepla kvantifikoval svým ochlazovacím zákonem. Poté následovala tzv. fluidová teorie, která předpokládá existenci nehmotné a nezničitelné substance zvané caloricum přestupující z teplejšího tělesa na chladnější, dokud se teploty nevyrovnají. Tento objev je připisován francouzskému chemiku Antoinemu Laureátu Lavoisierovi (1743-1794). Jeho fluidová teorie vydržela téměř do poloviny 19. stol. Při svých výzkumech z ní vycházeli i ostatní vědci jako např. S. Carnot (1796-1835) nebo William Thomson (lord Kelvin 1824-1907)

Prvního moderního vědeckého zpracování se dočkala nauka o vedení tepla jejímž zakladatelem je francouzský fyzik a matematik Jean Baptiste Jasech Fourier (1768-1830). Zformuloval rovnici, kterou dnes známe Fourierův zákon a dospěl k parciální diferenciální rovnici vedení tepla v ustáleném prostředí. Fourier však již znal tvar rovnice vedení tepla v pohybujícím se kontinuu. Jeho vědecká práce dosáhla velkého pokroku a stala se základním kamenem pro jeho následovníky. Ovšem vývoj nauky o sdílení tepla byla dlouhodobá a komplikovaná záležitost, neboť se neustále potýkala s nedostatkem informací o proudění. Aktuální potřeby nauky o sdílení tepla téměř vždy předbíhali aktuální možnosti mechaniky tekutin.

### 2.1. Zachování energie

Z hlediska termodynamiky je sdílené teplo podmíněno rozdílem teplot  $T_s$  (K) soustavy a  $T_o$  (K) okolí. Uvnitř soustavy je sdílené teplo jedním z procesů, který je popsán soustavami vzorců a zákony, jako je např. kalorimetrická rovnice

$$dQ = m \cdot c_j \cdot dT \quad (2-1)$$

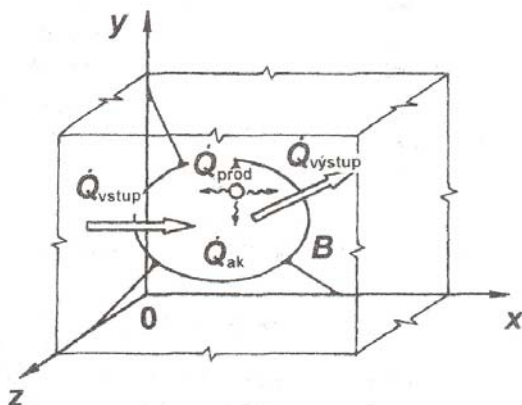
kde  $m$  (kg) je hmotnost soustavy,  $c_j$  ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) měrná tepelná kapacita (index  $j$  určuje druh stavové změny probíhající v soustavě) nebo první zákon termodynamiky pro uzavřené soustavy konající pouze objemovou práci

$$dQ = dU + p \cdot dV \quad (2-2)$$

kde  $U$  (J) představuje vnitřní energii soustavy,  $p$  (Pa) tlak a  $V$  ( $m^3$ ) objem. Protože první zákon termodynamiky musí být splněn v každém časovém okamžiku, je možno ho formulovat pomocí tepelných toků. To znamená, že v každém časovém kroku musí být v kontrolním objemu rovnováha mezi tepelnými toky. Za kontrolní objem (viz obr. 2.1) je považována

oblast prostoru ohraničená kontrolním povrchem, jímž může přecházet látka i energie. Rovnici bilance lze zapsat ve tvaru

$$\dot{Q}_{vstup} + \dot{Q}_{prod} - \dot{Q}_{výstup} = \dot{Q}_{ak} = \frac{dQ_{ak}}{dt} \quad (2-3)$$



kde  $\dot{Q}_{vstup}$  a  $\dot{Q}_{výstup}$  jsou tepelné toky na vstupu a výstupu z kontrolního objemu,  $\dot{Q}_{prod}$  je výkon vnitřních zdrojů, které se mohou transformovat v tepelné formy a  $\dot{Q}_{ak}$  je výkon akumulovaný v soustavě při nestacionárním ději.

Obr. 2.1 Kontrolní objem prostoru [6]

## 2.2. Vedení tepla

K přenosu tepla vedením v tělese dochází pouze v případě kdy mají jednotlivé části tělesa rozdílnou teplotu. Vedení tepla je doprovázeno časoprostorovou změnou jakožto každý jiný fyzikální jev. Jedná se o pohyb mikroskopických částic hmoty ( atomů, molekul ) v prostředí s teplotním gradientem v důsledku šíření mechanických forem energie. Obecně známé je šíření tepla v pevných látkách, avšak existuje i v kapalných i plynných skupenstvích. Zde už se ale nejedná pouze o mikroskopický pohyb, nýbrž zde velmi často převládá makroskopická úroveň šíření tepla prouděním. V případě vedení tepla u plynů nebo kapalin lze pozorovat náhodný pohyb molekul z oblastí s vyšší energií do oblastí s nižší energií. Tomuto jevu se říká difúze energie a proto se také často tento proces označuje jako tepelná difúze. Jelikož mají kapaliny větší hustotu než plyny a částice jsou blíže u sebe, dochází k výraznější interakci volných částic a tudíž i k lepšímu vedení tepla.

Jestliže nastává v tělese vedení tepla, můžeme v libovolném čase určit místa se stejným teplotním spádem, která jsou ohraničena plochami o konstantní teplotě. Těmito plochám spojující body o stejné teplotě se říká izotermy. Žádný bod nemůže mít ve stejném časovém intervalu dvě různé teploty, proto je vyloučené, aby se izotermy mezi sebou navzájem překrývaly. Podél izoterm nemůže docházet v tělese k vedení tepla. Soubor izoterm tvoří v tělese jeho teplotní pole. Izotermické plochy jsou ve stacionárním poli nepohyblivé, v nestacionárním poli se pohybují. Teplotní pole lze znázornit i vektorově za pomoci tepelných proudnic. Jsou to čáry, ke kterým je gradient teploty tečným vektorem.

Teplotní gradient charakterizuje růst teploty ve směru normály k izotermické ploše. Jeho orientace je ve směru vzrůstající teploty

$$gradT = \Delta T = \vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-4)$$



Složky gradientu ve směru os kartézské souřadnicové soustavy jsou rovny odpovídajícím derivacím, z čehož vyplývá následující vztah

$$\text{grad}T = \Delta T = \vec{i} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2-5)$$

kde  $\vec{n}$  je jednotkový vektor normály k izotermické ploše, směřující ve směru vzrůstající teploty.

K odvození rovnice teplotního pole použijeme **Fourierův zákon**, který říká, že plošná hustota tepelného toku je úměrná teplotnímu gradientu a směřuje proti němu. Vychází se přitom ze zjednodušujícího předpokladu, že prostředí vedoucí teplo je homogenní a izotropní. Měrná hmotnost  $\rho$  a měrné teplo  $c$  jsou konstantní. Pro obecné 3D těleso můžeme Fourierův zákon zapsat ve tvaru

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (2-6)$$

kde  $\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) je součinitel tepelné vodivosti. Je to materiálová vlastnost tepelně vodivého prostředí. V homogenním prostředí se často považuje za konstantní hodnotu. Avšak u některých materiálů závisí na teplotě, v nehomogenním prostředí je funkcí polohy a u neizotropního materiálu závisí  $\lambda$  na směru tepelného toku.

Tepelný tok  $\dot{q}$  se potom skládá ze tří složek, které charakterizují jednotlivé směry

$$\dot{q}_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dot{q}_y = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad \dot{q}_z = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2-7)$$

V případě jednorozměrného případu vedení tepla se situace podstatně zlehčuje. Nevznikají problémy s určením směru tepelného toku, neboť na základě předchozích úvah se předpokládá, že směřuje od teplejší části tělesa směrem k chladnější části. Fourierův zákon lze zapsat ve zjednodušeném tvaru

$$\dot{q} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \quad \text{neboli} \quad \dot{Q} = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\delta} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda \cdot S}} \quad (2-8)$$

kde  $\delta$  ... je tloušťka tělesa ve směru tepelného toku,  $\dot{q}, \Delta T$  ... jsou kladné veličiny

$$\frac{\delta}{\lambda \cdot S} = R_\lambda \dots \text{odpor proti vedení tepla}$$

### 2.3. Konvekce

Sdílení tepla konvekcí je způsobeno prouděním tekutiny, která svým makroskopickým pohybem přenáší částice o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě a naopak. Zároveň dochází uvnitř tekutiny k vedení tepla, neboli jak bylo již dříve k tepelné difúzi. Superpozicí obou dvou mechanismů přenosu tepla **KON**dukce (vedení tepla) a **ad**VEKCE (proudění) vzniká výsledný pojem **KOVEKCE**.

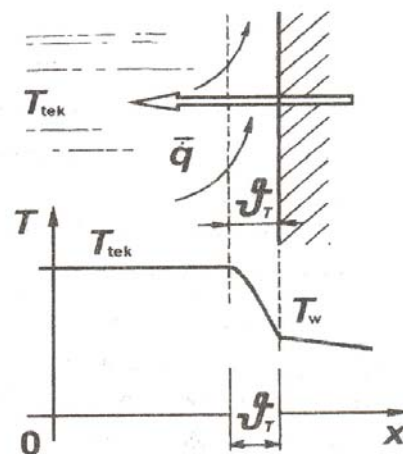
Je-li proudění způsobeno uměle, to znamená za pomoci např. strojních zařízení (ofukováním, čerpáním, přeměnou tlakové energie na kinetickou apod.), jedná se o **konvekci nucenou**. Naopak vznikne-li proudění vzduchu v důsledku teplotního gradientu, jde o **konvekci přirozenou**. Jako příklad lze uvést ohřev tekutiny v těsné blízkosti teplého povrchu. Vlivem Archimédových vztlačových sil začne stoupat a odnášet s sebou získanou energii. Na její místo přitéká chladnější tekutina a tím vzniká konvektivní proudění. Při nižší teplotě povrchu proudí tekutina opačně a ochlazuje se.

Cesta k řešení teoretických úloh o sdílení tepla vede přes úplné soustavy rovnic mechaniky tekutin včetně věty o energii, která zahrnuje vedení tepla v tekutinách. V současnosti je její využitelnost možná pouze ve zjednodušených případech a ve stacionárním režimu proudění je proveditelná pouze pro úzký okruh geometrických tvarů obtékaných povrchů těles. Proto je mnohem použitelnější přístup založený na kombinaci poloempirických rovnic s teorií hydrodynamické a termokinetické podobnosti.

Velmi častou úlohou tepelné konvekce je tzv. přestup tepla na rozhraní mezi pevnou stěnou a tekutinou. Vzniklá situace je znázorněna na obr. 2.2.

Většinou se řeší případ, kdy je teplota povrchu stěny vyšší než teplota okolní tekutiny, ale v tomto případě se uvažuje, že je  $T_w < T_{tek}$ . Pokud by bylo zkoumáno teplotní pole v blízkosti stěny, dospělo by se k závěru, že ve větší vzdálenosti se  $T_{tek}$  příliš nemění. Teprve v relativní blízkosti stěny začne teplota klesat, až se ustálí na hodnotě  $T_w$ . Vrstvu tekutiny s takto velkým teplotním gradientem nazýváme teplotní **mezní vrstva**. Tloušťka mezní vrstvy  $\delta_T$  (m) se stanoví podobně jako u rychlostní mezní vrstvy. Její hranice spadá do míst, kde je

$$(T - T_{tek}) = 0,01 \cdot (T_w - T_{tek}) \quad (2-9)$$



Obr. 2.2 Přestup tepla na rozhraní mezi pevnou stěnou a tekutinou [6]

Plošná hustota tepelného toku se při přestupu tepla vyjadřuje vztahem nazývaným někdy také jako **Newtonův ochlazovací zákon**

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_{tek}) \quad \text{neboli} \quad \dot{Q} = \int_S \dot{q} \cdot dS = (T_w - T_{tek}) \cdot \int_S \alpha \cdot dS = \bar{\alpha} \cdot S \cdot (T_w - T_{tek}) \quad (2-10)$$

kde  $\alpha$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) je součinitel přestupu tepla. Závisí na materiálových vlastnostech tekutiny a jejích stavových veličinách. Při výpočtu přenosu tepla konvekcí je stanovení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  hlavním úkolem.

a  $\bar{\alpha}$  je střední součinitel přestupu tepla pro celý povrch  $S$  je dán vztahem

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \cdot \int_S \alpha \cdot dS \quad (2-11)$$

## 2.4. Záření

V případě přenosu tepla vedením a konvekcí se jedná o dva mechanismy vázané jistým způsobem na přenosové médium. Záření je naprosto odlišné od molekulárního nebo turbulentního přenosu, neboť není vázán na zprostředkující médium. Proto se může na rozdíl od vedení a konvekce objevit i v absolutním vakuu. Přenositeli tepelné energie jsou v tomto případě fotony, jejich vlastnosti jsou popsány elektromagnetickou vlnovou teorií nebo kvantovou teorií.

Podstatou tepelného záření je přeměna části vnitřní energie zahřátého hmotného objektu, ohraničeného objemu tekutiny či disperzního prostředí na elektromagnetické vlny. Elektromagnetické vlnění se šíří rychlostí světla  $c$  a je charakterizováno spektrem vlnových délek  $\gamma$  a frekvencí  $f_\nu$ . Lze je zapsat do vzájemného vztahu

$$c = \gamma \cdot f_\nu \quad (2-12)$$

Maximální rychlost světla ve vakuu je  $c = c_o = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Šíření světla v kapalinách nebo plynech je charakterizováno rychlostí světla

$$c = \frac{c_o}{n} \quad (2-13)$$

kde  $n \geq 1$  je absolutní index lomu.

Při dopadu elektromagnetických vln na jiný hmotný objekt se dopadající energie částečně změní na vnitřní energii tohoto tělesa. Míru pohlcení energie vyjadřuje veličina zvaná absorptance (poměrná pohltivost). Ideální zářič, který je schopen vyzařovat i pohlcovat elektromagnetické vlny v celém spektru vlnových délek se nazývá dokonale **černé těleso**. Maximální tok, který může být z jeho povrchu emitován je dán tzv. **Stefan-Boltzmannovým zákonem**:

$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (2-14)$$

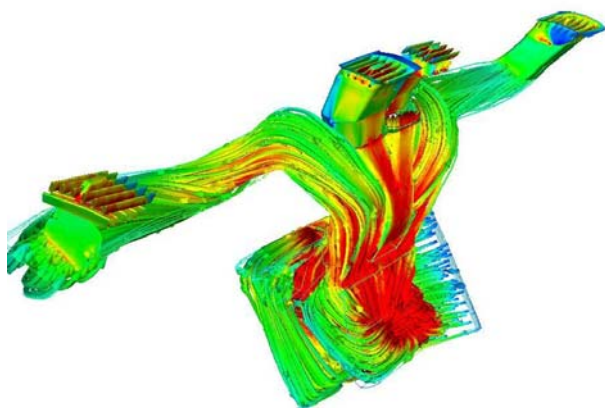
kde  $\sigma = 5,679 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$  je Stefan-Boltzmannova konstanta.

V praxi se s dokonale černým tělesem téměř nelze setkat. Nahrazuje ho **šedé těleso**, které při stejné teplotě emituje méně energie než těleso černé. Hodnota emitované energie závisí na druhu povrchu u šedého tělesa je charakterizována **součinitelem poměrné zářivosti**  $\varepsilon$  (emisivita). Potom je energie vyzařovaná z povrchu tělesa dána vztahem:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2-15)$$

### 3. Počítačové modelování

Počítačové modelování je moderní výpočetní metoda sloužící k numerickému řešení úloh z nejrůznějších odvětví dynamiky proudících částic. Současná výzkumná a vývojová pracoviště na špičkové úrovni mohou jen stěží tento výpočetní nástroj postrádat. Dříve bylo možné za pomoci diferenciálních nebo integrálních rovnic řešení pouze elementárních úloh. Využívalo se k tomu znalostí teoretické fluidní dynamiky, která tyto úlohy dokázala popsat.



Ovšem s nástupem prvních výkonných počítačů v 60. letech 20. století se otevřela cesta k řešení podstatně složitějších úloh za pomoci CFD simulací. Tato zkratka je odvozena z anglického názvu **Computational Fluid Dynamics**. CFD programy umožňují modelovat praktické úlohy z oblasti proudění tekutin, přenosu tepla, mísení směsí, chemické reakce, spalování, vícefázové proudění a mnoho dalších případů. V České republice se v největší míře používá v energetickém průmyslu (výměníky tepla, turbíny, spalování) a automobilovém průmyslu (interní a externí aerodynamika, viz. obr 3.1).

Obr.3.1 Kontury rychlosti vzduchu v předních ofukovačích automobilu

#### 3.1. Postup řešení

Tvorba počítačové simulace je rozdělena do tří základních oblastí. Jedná se o přípravu modelu (preprocessing), řešení (solving) a finální zhodnocení výsledků (postprocessing). Každá z těchto kategorií se navíc skládá z několika dalších dílčích operací.

##### 3.1.1 Příprava modelu (Preprocessing)

Základem je **rozbor řešeného problému**. Je potřeba zhodnotit míru obtížnosti a pouvažovat nad případným zjednodušením, které může v další fázi usnadnit řešení. Tím je myšlen rozbor, zda-li řešit úlohu nestacionárně či se spokojit pouze se stacionárním řešením (v některých případech však nelze nahradit nestacionární řešení úlohy stacionárním). Jedná-li se o symetrickou úlohu, lze pomýšlet nad řešením pouze jedné ze symetrických částí. Popřípadě jestli je možné úlohu zjednodušit z prostorového objektu na 2D případ. Tyto všechny aspekty mají velmi zásadní vliv na délku výpočtu a hlavně na výpočetní kapacitu používaného zařízení, která rozsah úlohy omezuje. Jde především o počet a výkon procesorů a fyzické paměti.

Úplným základem je **tvorba geometrie**. Většina programů se spokojí s CAD-ovským typem geometrie, který může být navíc upraven různými filtry pro zanedbání zbytečných detailů v modelu, které zvyšují nároky na výpočetní techniku. Navíc nejsou pro samotné

řešení vůbec důležité. V ostatních případech se používají různé 3D modelovací programy nebo design studia kompatibilní s CFD softwarem od stejného výrobce.

Mezi nejdůležitější část preprocessingu patří tvorba **výpočetní sítě**. Výpočtová síť diskretizuje prostor na výpočtové objemy ve kterých probíhá samotné řešení. Síť rozdělujeme do tří kategorií:

- strukturované.....kde je počet elementů na protilehlých stranách totožný
- nestrukturované...obsahují větší množství elementů, vhodné pro isotropní chování modelu
- hybridní.....jsou složeny z více typů elementů

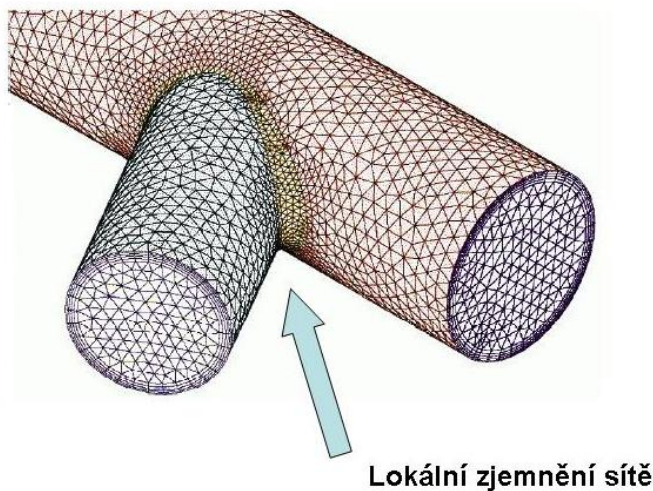
Každá výpočetní síť se skládá z elementárních částí (viz obr. 3.2)[8] neboli výpočetních buněk, rozlišujeme tyto druhy.



Obr. 3.2 Výpočetní buňky

Jako příklad lze uvést např. trojúhelníkovou síť (triangle), která geometrii 2D objektu rozdělí na elementární trojúhelníkové prostory. Ve 3D objektu prorůstá povrchová síť do celého objemu a z trojúhelníkového elementu vzniká trojboký jehlan (tetrahedron), který diskretizuje objekt na kontrolní objemy. Podobné je to i u ostatních typů mnohoúhelníkových elementárních buněk.

Použití jednotlivých typů buněk ve výpočetních sítích závisí na typu řešené úlohy, stejně jako zvolená velikost buňky. Volba velikosti je nejvíce omezena velikostí paměti. Obecně platí, že na 1. milion buněk je zapotřebí 1GB paměti. Proto se velmi často přistupuje k populární metodě lokálního zjemnění. Provádí se na modelu v místech, která jsou ve výpočtu nejvíce zajímavá. Zjemněním sítě se docílí výrazného zpřesnění výpočtu,



neboť je prostor diskretizován na více kontrolních výpočetních objemů než v ostatních částech modelu. Jako příklad lze uvést obtékání různých těles, kde se síť zjemní v jejich těsné blízkosti, neboť je např. zkoumán odporový součinitel tělesa. Tím se docílí jeho přesnější hodnoty, to co se děje ve vzdálenějším okolí není tolik zajímavé, proto se zde ponechává hrubší síť. Při proudění v potrubí je lokální zjemnění důležité pro modelování mezní vrstvy. V tomto případě je ale výhodnější použití prizmatických vrstev s určitým lineárním růstem.

Obr. 3.3 Ukázka tetra sítě s lokálním zjemněním v místě napojení potrubí [8]

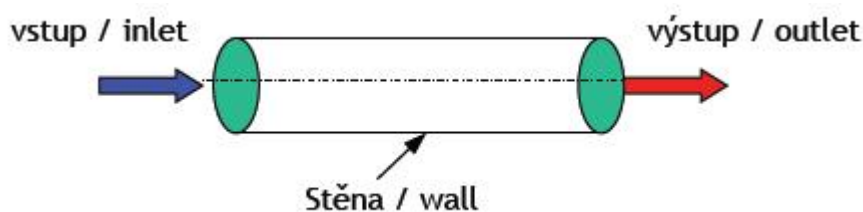
Dalším krokem je nastavení **fyzikálních parametrů** modelu. Definiuje se tím nejen o jaké skupenství se jedná (pevné, kapalně, plynné), ale lze nadefinovat přímo konkrétní látku (voda, vzduch, kyslík, rtuť, glycerin, čpavek, oxid uhličitý, olovo, ocel, hliník..atd.) a jejich fyzikální vlastnosti (tepelná kapacita, tepelná vodivost, hustota atd.). Zároveň se definuje v jakém počátečním stavu do výpočtu vstupují (rychlost a směr proudění, teplota, intenzita turbulence atd.)

Následuje nastavení **okrajových podmínek** („boundary conditions“). Zavádějí se na všech okrajích výpočetní domény. Musí se zadávat tak, aby byly fyzikálně platné, tzn. nesmí jich být nedostatek a naopak nelze úlohu předefinovat. Základní typy okrajových podmínek (OP) jsou:

Obecně....Pressure inlet (tlakový vstup), Pressure outlet (tlakový výstup)

- Incompressible....Velocity inlet (vstup předepsaný rychlostí), Outflow (výstup)
- Compressible.....Mass flow inlet (vstup předepsaný hmotnostním tokem média)  
Pressure-far-field (vzdálené tlakové pole)
- Other..... Wall (stěna-adiabatická, s danou teplotou, tepelným tokem, atd.),  
Symmetry (symetrie), Periodic (periodická OP)

Jako příklad je uvedeno zadání OP na jednoduchém modelu části úseku potrubí na obr.3.4



Obr. 3.4 Okrajové podmínky [7]

Pro získání správného výsledku z modelování je potřeba zvolit vhodný výpočetní model, který co nejdůvěryhodněji popisuje řešený fyzikální problém. Matematický popis výpočetního modelu je značně komplikovaný, proto si lze vystačit pouze s myšlenkou, že se jedná o nejrůznější soustavy diferenciálních rovnic popisující dané fyzikální jevy. V oblasti CFD je velmi rozšířeným diskretizačním konceptem metoda konečných objemů, kde platí zákony zachování i na diskretním elementu. Pojem diskretizace znamená konverzi parciálních diferenciálních rovnic do tvaru diskretních algebraických rovnic.

### 3.1.2 Řešení (Solving)

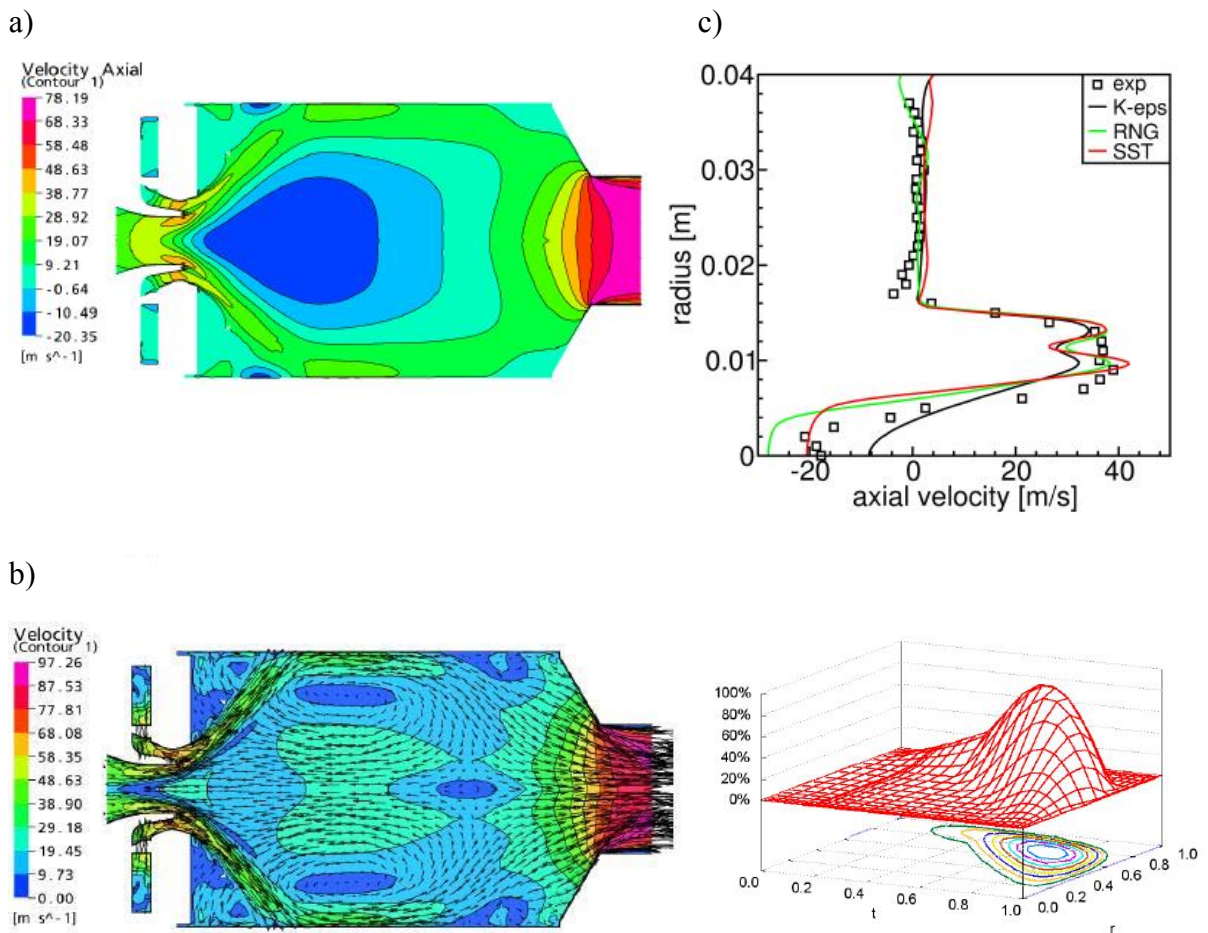
CFD program provede výpočet podle předešlého nastavení za použití řešiče, který může obsahovat tyto modely:

- konvekce, kondukce, radiace
- turbulentní modely
- vícefázové problémy
- reakce látek
- akustika, šíření mechanického vlnění
- posun a deformace těles vlivem tlakového zatížení

Důležité je rozhodnutí, v jakém okamžiku lze výpočet ukončit. Stacionárního řešení je řízeno podle konvergence iterovaných hodnot. Lze se spokojit s přesností kolem  $10^{-3}$  za předpokladu, že se residua ustálí a dále již výrazně nekmitají. U nestacionárního případu se zkoumá konvergence hodnot v jednotlivých časových krocích. Podle potřeby se jejich hodnotu upravuje. V případě divergence řešiče je potřeba přistoupit k opatřením, která vycházejí ze znalostí a zkušeností výpočtáře. V problematických případech může pomoci snížení relaxačního faktoru, zmenšení časového kroku, přepnutí na diferenci prvního řádu, změna inicializační hodnoty, zjemnění výpočetní sítě atd.

### 3.1.3 Vyhodnocení výsledků (Postprocessing)

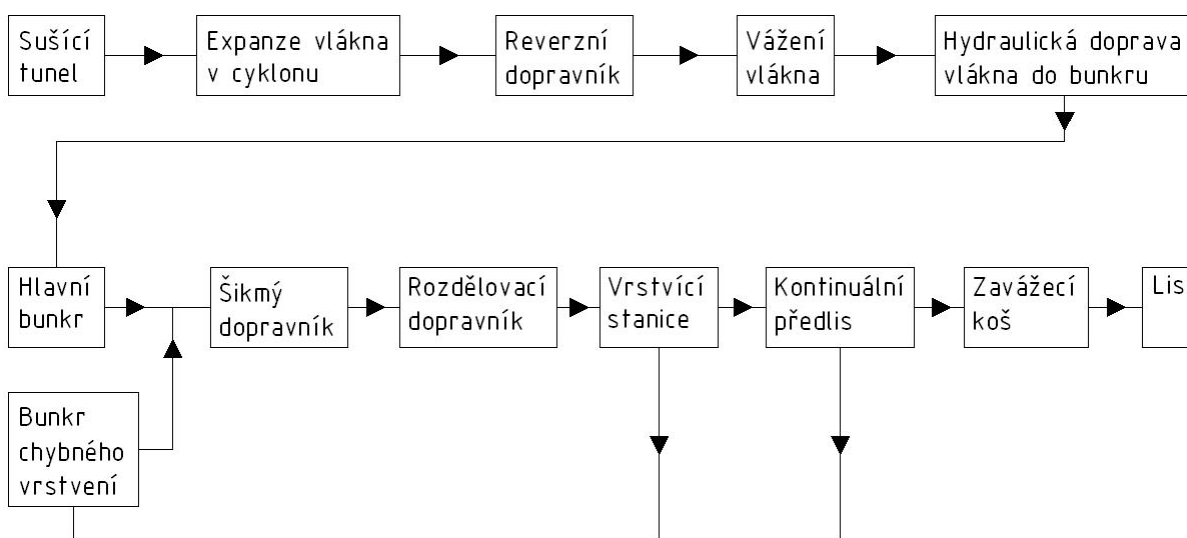
Spočívá ve vyhodnocování získaných informací. Hodnotí se formou grafů a diagramů, skalárních a vektorových scén nebo animací (viz obr. 3.5). Provádí se v samostatných softwarech určených pro tyto účely. Potom už jenom závisí na odbornosti výpočtáře jak se získanými hodnotami naloží. CFD simulace mají tu nevýhodu, že jsou schopny vždy něco namodelovat, ale pouze odborník dokáže posoudit, zda-li výsledky odpovídají realitě, nebo se jedná pouze o zkreslení fikce. Proto je v mnoha případech nutný návrat na samý začátek simulace a provedení obměny geometrie modelu, výpočetní sítě a fyzikálních parametrů.



Obr. 3.5 Prezentace získaných dat pomocí a) kontur, b) vektorů, c) grafů [8]

## 4. Popis řešeného úseku výrobní linky

Princip činnosti řešené části výrobního procesu vychází z teoretických poznatků o technologii výroby MDF desek uvedených v kapitole 1. Před samotným řešením chladnutí dřevěného vlákna vlivem výrazných energetických ztrát je zapotřebí se podrobněji seznámit s charakteristikou a provozními hodnotami jednotlivých technologických zařízení tvořících ucelenou skupinu výrobní linky mezi procesy sušení a lisování vlákna. Především jsou zde popsána vybraná strojní zařízení jejichž vliv na danou problematiku je podstatný. Zároveň je důležité stanovení ostatních provozních a fyzikálních parametrů vyplývajících z měření ve výrobě nebo odvozených z tabulek. Veškeré uvedené hodnoty budou použity v následujícím výpočtu tepelných ztrát. Posloupnost výrobních operací za současného stavu je znázorněna na obr. 4.1 pomocí blokového schématu.



Obr. 4.1 Schéma řešeného úseku výrobní linky

### 4.1. Sušící zařízení

Vstupním technologickým procesem řešené části výrobní linky je sušící zařízení, které se skládá z těchto hlavních částí: 1) jednotka ohřevu, 2) ventilátor sušícího vzduchu, 3) sušící kanál, 4) cyklón, 5) turniketová výpusť

#### 4.1.1 Princip sušení

Do jednotky ohřevu se ventilátorem vhání vzduch ohřátý při průchodu topnými tělesy obsahující páru. Poté se vzduch dopravuje vodorovným sušícím kanálem (viz obr. 4.1), do kterého se zároveň přivádějí vlákna. Ta jsou stržena silným proudem vzduchu a dostávají se sušícím kanálem až k cyklonu. Díky vysoké teplotě plynu a dostatečné délce kanálu se z vlákna odpaří potřebné množství vody. Množství přiváděného vzduchu se reguluje motorovým proudem ventilátoru. Pomocí regulátoru se otvírá resp. zavírá šroubovnicový ventil instalovaný před ventilátorem sušícího vzduchu. Vlhkost vystupujících vláken se reguluje pomocí čtyř regulátorů pracujících v kaskádě. Jsou nastaveny na požadovanou hodnotu vlhkosti 10 %. V případě vysoké přívodní teploty vzduchu, která by nepříznivě snížila vlhkost vlákna pod doporučenou hodnotu, je jednotka ohřevu vzduchu vybavena obtokovým zařízením s regulační klapkou.



Směs plynu a vlákna se přivádí do horní části cyklonu tangenciálně. Díky odstředivé síle se vlákna vynášejí na plášť cyklonu a za rotace spadávají do jeho dolní části. Plyn se odvádí přes vypouštěcí kužel do atmosféry. V cyklonu odloučená vlákna se podávají pomocí turniketové výpusti na reverzní pásový dopravník.

#### 4.1.2 Kontrolní a měřicí zařízení sušícího zařízení

Reverzní dopravník je opatřen zařízením pro měření vlhkosti vlákna. Jeho provozní stav se dělí do dvou poloh. Při optimální vlhkosti vlákna pracuje ve standardním režimu a dopravuje vlákno ve směru výrobního procesu. Ovšem při zvýšené vlhkosti vlákna se přepne do reverzního režimu a vlákno putuje opačným směrem, na jehož konci padá do sběrné nádrže. Odtud je odváženo ke spálení do kotelny. Vysoký obsah vody ve vláknech je nepřijatelný z důvodu destrukce desky v průběhu lisování, kdy dochází k nepřijatelnému zvýšení parciálního tlaku nasycených par.

Za reverzním dopravníkem je umístěna váha pro kontrolu hmotnostního toku vlákna. Dále je vlákno dopravováno pneumatickým způsobem venkovním prostorem do hlavního zásobovacího bunkru.

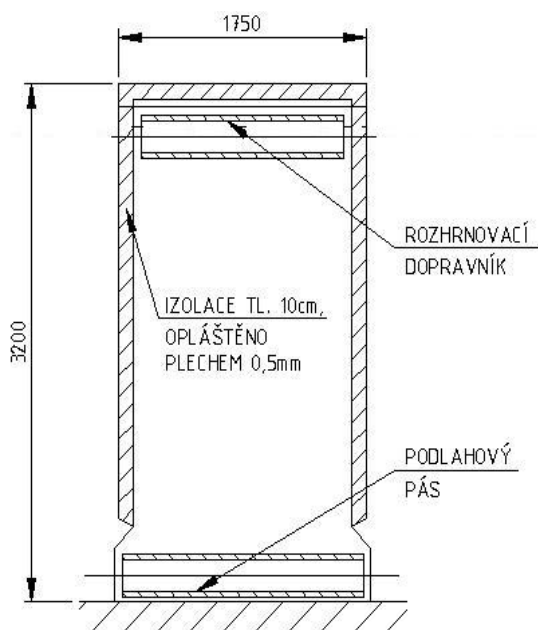


Tab. 4.1 Technické parametry sušícího zařízení [9]

Přívod média		
Voda	kg/h	6920
Pára	kg/h	5370
Vlákna	kg/h	8310
Sušička		
Teplota horkého vzduchu	°C	170
Teplota vzduchu na výstupu	°C	70
Teplota vlhkého teploměru na výstupu	°C	52
Hmotnostní tok suchého vzduchu	kg/s	35,4
Objemový tok vzduchu v kanálu	m <sup>3</sup> /s	165 300
Vlhkost vláken na výstupu	%	0,10
Teplota vláken na výstupu	°C	56
Délka sušícího kanálu	m	120
Průměr sušícího kanálu	mm	1400
Průměr cyklonu	mm	5100
Počet cyklonů	-	1

## 4.2 Hlavní zásobovací bunkr

Hlavní zásobovací bunkr (viz obr. 4.3) je spolu s bunkrem chybného vrstvení umístěn ve venkovním prostředí v těsné blízkosti výrobní haly. V horní části do bunkru vyúsťuje kontinuální cyklón spolu s cyklonem dopravujícím poměrné množství vratného vlákna. Jeho činnost spočívá ve vytvoření dostatečné zásoby vlákna pro aktuální požadavek vrstvicí stanice. Dodávka vlákna je řízena automatickou regulací, která podle hmotnostního toku vlákna řídí rychlost posuvu podlahového pásu. Rovnoměrnému pohybu vlákna v bunkru také napomáhá horní rozhrnovací dopravník (viz obr. 4.2). Vynášení vlákna z bunkru je tvořeno šikmo položenou soustavou vynášecích válců na jejíž středové hřídeli jsou střídavě umístěny distanční a rozmetací kroužky. Nosná konstrukce je sestavena z rámu vyrobených z hraněných plechových profilů uspořádaných do sekcí a ty pak jsou jako stavebnice skládány na potřebnou velikost bunkru.



Obr. 4.2 Řez hlavním zásobovacím bunkrem



Obr. 4.3 Pohled na hlavní zásobovací bunkr

### 4.2.1 Bunkr chybného vrstvení

Skladovanou hmotou je vlákno vrácené z výrobního procesu. Jedná se buď o vlákno z úseku vrstvení koberce nebo kontinuálního předlisu. Důvodem pro znehodnocení vláknitého koberce může být špatné rozložení plošné hmotnosti při vrstvení, nebo např. přítomnost kovové části zjištěné detektorem kovu umístěným za předlisem. Vlákno je nasáváno ze sběrné nádrže umístěné pod výrobní linkou a hydraulicky dopravováno cyklónu, ze kterého propadává do bunkru. Bunkr slouží jako zásobník vlákna pro hlavní bunkr se kterým je propojen žlabovými dopravníky. Zároveň s funkcí zásobníku je využit jako skladovací prostor výstupu vlákna ze sušárny. Jeho konstrukce je totožná s hlavním bunkrem, ovšem co se týče kapacity, je zhruba třetinová.

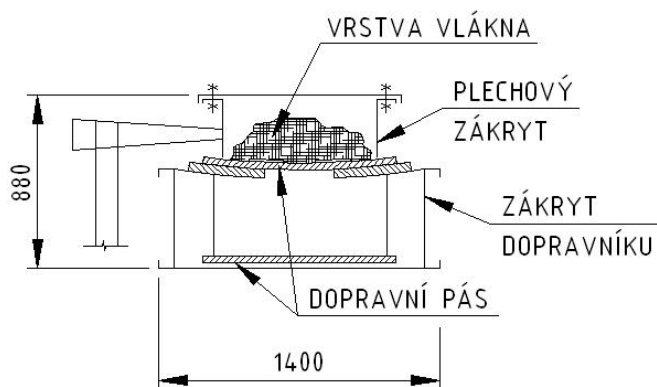
Tab. 4.2 Parametry bunkrů [9]

	Objem	
	[m <sup>3</sup> ]	Objemový tok vlákna [m <sup>3</sup> /h]
<b>Hlavní zásobovací bunkr</b>	70	450
<b>Bunkr chybného vrstvení</b>	20	85

### 4.3 Šikmý pásový dopravník

Pomocí šikmého pásového dopravníku (viz. obr. 4.5) je zajišťována bezprašná přeprava vlákna z hlavního bunkru a bunkru chybného vrstvení na rozdělovací dopravník. Uzavřený pásový dopravník se skládá z následujících částí:

- pohon pásového dopravníku je pomocí převodového motoru přímo nasazeného na hřídel bubnu a uchycen pomocí kyvné páky
- napínací stanice je součástí uložení vratného bubnu, který je sestaven tak, že jeho středová hřídel je uchycena přes šroub na vřeteno napínání
- mezikostry jsou stavebnicové svařence s kluznou podložkou, po které je unášen transportní pás včetně horních a spodních krytů
- čistič pásu je samostatně poháněný kartáč, který ometá vnější stranu transportního pásu na horní – výsypané stanici pásového dopravníku [9]



Obr. 4.4 Řez šikmým pásovým dopravníkem

Obr. 4.5 Pohled na šikmý pásový dopravník

Tab. 4.3 Technické údaje [9]

Typ	Šířka pásu	Volný průřez nad pásem	Délka dopravníku	Konstrukce z plechu tl.	Rychlost pásu	Dopravované množství vlákna	Průměrná výška vrstvy vlákna na pásu
MG 1000x22,5m	[mm] 1000	[mm] 800x320	[m] 22,5	[mm] 3	[m/s] 0,64	[t/h] 6	[mm] 200

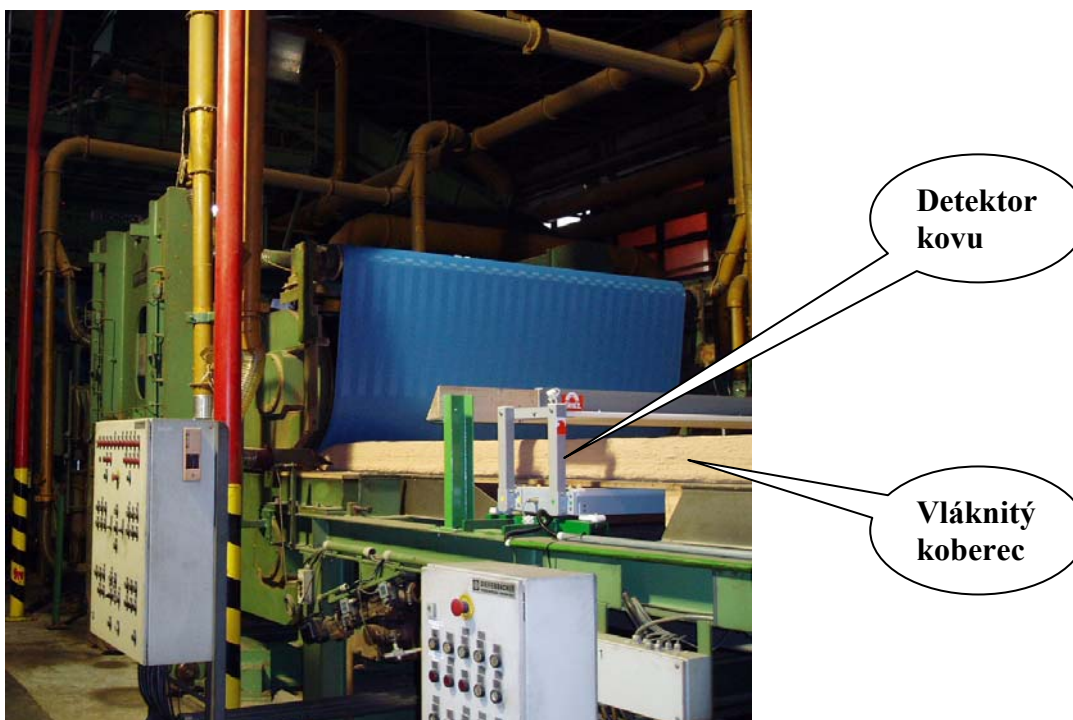
Dopravník se z hlediska umístění dělí na část procházející tzv. kolnou (9,5 m) a úsek nacházející se v samotné hale (13 m). Kolna je samostatná místnost, ve které se vlákno sype z bunkrů na dopravní pás. Vzhledem k nižší teplotě okolního vzduchu je konstrukce dopravníku z plechu tl. 5 mm a zaizolována minerální vatou tl. 70 mm.

Ze šikmého dopravníku přechází vlákno na kyvný rozdělovací dopravník, který vlákno rovnoměrně rozsypává po celé šíři dávkovacího zásobníku vrstvicí stanice. Délka kyvného dopravníku je 9 m, konstrukce je totožná se šikmým dopravníkem.

## 4.4 Kontinuální předlis

Z vrstvicí stanice vychází vláknitý koberec s téměř konstantním rozložením plošné hmotnosti. Hustota vláken v koberci se pohybuje v rozmezí 20-25 kg·m<sup>-3</sup>. Výška koberce za vrstvičkou je 500-1200 mm.

Před samotným lisováním je nutná redukce tloušťky koberce a to i z důvodu vytlačení přebytečného vzduchu. Provádí se v kontinuálním předlisu (viz obr. 4.6), který sníží původní tloušťku na hodnotu 80-240 mm. Šířka koberce zůstává již od navrstvení stejná (2800 mm). Za předlisem je umístěn detektor kovu, jehož funkcí je v případě přítomnosti kovové příměsi dát signál k destrukci koberce. Vlákno propadává pod výrobní linku stejně jako v případě chybného navrstvení a je dopravováno zpět do bunkru.



Obr. 4.6 Kontinuální předlis

## 4.5 Zavážecí koš

Úkolem čtyřetážového zavážecího koše (viz obr. 4.7) je přejímat dělené rohože, které přicházejí od zrychlovacího pásu, skládat je na jednotlivé etáže, zavézt je do lisu a tam je složit. Vláknové rohože se umísťují přesně nad sebou. Jakmile je zavážecí koš kompletně plný, zajedou při otevřeném lisu tablety s pásy dovnitř lisu. Při jízdě zpět se současně odvíjejí pásy tablet, a tím ukládají vláknové rohože na etáže vytápěného lisu. Vláknové rohože se v lisu ukládají s absolutní přesností. Při zajíždění koše do lisu dochází současně jeho přední částí k vytlačování slisovaných desek do vyvážecího koše.

Zavážecí koš se skládá z následujících hlavních prvků:

- konstrukce stojanu koše je vyrobena z masivních ocelových profilů, stejně jako zdvihový koš.

- zdvižného koše jehož součástí jsou 4 tablety s nekonečnými pásy ze speciálního materiálu. Tablety mají plechovou podlahu, která je opatřena masivními bočnicemi kluznými lištami. Na obou koncích podlahy jsou válce, přes které je natažen pás.
- pojezdového pohonu, který je zajišťován po kolejkách přes pojezdové vozíky ozubenými tyčemi a hřebeny.
- pohonu pásů zajišťovaného digitálně regulovanými trojfázovými motory.
- pohonu zdvihu zavážecího koše pomocí dvou elektromotorů, přes hřídele a řetěz. [9]



Vstup  
do lisu

Obr. 4.7 Zavážecí koš

Lisovací čas ve vytápěném lisu se pohybuje od 240–750 s podle tloušťky vláknitého koberce. Při uzavírání lisu dochází nejprve k prohřívání vrstvy vlákna na požadovanou lisovací teplotu a následně za působení tlaku k vytvrzování lepidla. Kapacita vylisovaného materiálu je 260 m<sup>3</sup>/den, což představuje cca 90 000 m<sup>3</sup>/rok. Vyráběné tloušťky desek jsou 8-40 mm. Po vylisování se desky nechají zchladit na teplotu okolního vzduchu.

#### 4.6 Přístupy k řešení

Cílem této práce je posouzení vhodných opatření pro stabilizaci teploty vlákna z důvodu velkého teplotního rozdílu na výstupu ze sušárny a vstupu do lisu. V jednotlivých úsecích výrobního procesu dochází za současného stavu ke značným energetickým ztrátám. To se projevuje zvýšenou potřebou energie k opětovnému prohřátí vrstvy vlákna při lisování. Souvisejícím nepříznivým důsledkem je delší čas potřebný k lisování. Tím se do jisté míry znehodnocuje výrobní kapacita MDF linky. Snahou je nalezení optimálního řešení pro urychlení lisovacího procesu v podobě přívodu vlákna o vyšší teplotě. Výrazného zlepšení by se dosáhlo v případě, kdy by se podařilo docílit teploty vlákna na vstupu u lisu o 5 až 10 °C vyšší než při stávajícím stavu. Úkolem tedy není pouze zabránění tepelným ztrátám, nýbrž spočívá i v návrhu efektivního systému ohřevu.

Zásadním problémem je zvolení vhodného přístupu k řešení. V případě komplexního pohledu na daný problém se lze snadno dostat do velmi složité situace. Řešení zahrnuje zhodnocení vybraného úseku z hlediska energetické náročnosti, což by mohlo vést v konečném důsledku k velmi náročným a nákladným opatřením na realizaci projektu. Výsledky získané řešením dané problematiky by byly navíc velmi obtížně prokazatelné a snadno by mohlo dojít k jejich zpochybnění.

Schůdnější metodou se proto jeví řešení vhodně vybraných energetických celků se zaměřením na jejich tepelné ztráty. V případě vyhodnocování potřeb konkrétních technologických zařízení lze také přímo navrhnout odpovídající opatření vedoucím k potlačení tepelných toků do okolí. Vhodně zvolenou výpočetní metodou lze docílit odpovídajících výsledků. Nejvýhodnějším způsobem řešení je i možnost následného ověření výpočtu za pomoci alternativní metody, jako jsou např. experimentální metody.

V následující kapitole je proveden výpočet tepelných ztrát vycházející ze znalostí o přenosu tepla a proudění. Výpočet zahrnuje energetickou bilanci hlavního zásobovacího bunkru, šikmého pásového dopravníku a vláknitého koberce v zimním období. Numerický výpočet je v potřebných případech podpořen počítačovým modelováním pro zhodnocení dosažených výsledků.

#### 4.6.1 Fyzikální vlastnosti materiálů použitých ve výpočtu

Ve výpočtech se vychází z hodnot naměřených za provozu nebo zjištěných z fyzikálních tabulek. Většinou se jedná o materiálové vlastnosti vzduchu, dřevěného vlákna, kovových materiálů, popř. jiných látek. Jejich hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.4 Fyzikální vlastnosti materiálů [9], [4]

<b>Průměrná teplota venkovního vzduchu</b>	-5	°C
<b>Teplota vzduchu v kolně</b>	17	°C
<b>Teplota vzduchu v hale</b>	26	°C
<b>Teplota vzduchu v okolí lisu</b>	28	°C
<b>Průměrná teplota vlákna v zásobovacím bunkru</b>	33	°C
<b>Průměrná teplota vlákna na šikmém pásového dopravníku</b>	30	°C
<b>Průměrná teplota vlákna v koberci za kontinuálním předlisem</b>	29	°C
<b>Sypná hustota vlákna</b>	26	kg·m <sup>-3</sup>
<b>Tepelná kapacita vlákna</b>	1670	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Součinitel tepelné vodivosti vlákna</b>	0,35	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Poměrná zářivost vlákna</b>	0,82	-
<b>Součinitel tepelné vodivosti plechového zákrytu</b>	45,4	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Poměrná zářivost plechového zákrytu</b>	0,1	-
<b>Hustota vzduchu</b>	1,18	kg·m <sup>-3</sup>
<b>Tepelná kapacita vzduchu</b>	1003,62	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Tepelná vodivost vzduchu</b>	0,026	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Teplota vzplanutí usazeného dřevěného prachu</b>	222	°C
<b>Teplota žhnutí usazeného dřevěného prachu</b>	237	°C
<b>Teplota vzplanutí usazeného dřevěného prachu</b>	498	°C

## 5. Výpočet tepelných ztrát

Výpočet rozděluje řešení daného problému výrobní linky na úsek nacházející se ve vnitřním prostředí (šikmý pásový dopravník, vláknitý koberec) a úsek ve venkovním prostředí (hlavní zásobovací bunkr). Šikmý pásový dopravník navíc prochází dvěma oddělenými místnostmi s rozdílnou teplotou vzduchu, proto je výpočet rozdělen do dvou samostatných částí. V případě hlavního zásobovacího bunkru je zvolen výpočet prostupu tepla vícevrstvou stěnou, u šikmého pásového dopravníku a vláknitého koberce se jedná o kombinaci tepelného toku zářením a přirozené konvekce.

### 5.1 Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku v hale

Ve výpočtu je zahrnuta část šikmého dopravníku, která se nachází ve výrobní hale. Délka této části dopravníku je 13 m. Jedná se o dopravní pás, který v daném úseku přepravuje vlákno ze spodní části vedlejší místnosti, tzv. kolny na kyvný rozdělovací dopravník, ze kterého přechází vlákno do vstupní části vrstvicí stanice v horní úrovni haly viz. kapitola 4.3. Celá konstrukce dopravníku je podepřena profilovými nosníky, které zároveň podpírají přístupové schodiště. Tyto konstrukce se do výpočtu nezapočítávají, neboť jejich vliv na řešenou problematiku je nepodstatný. Řešení je omezeno pouze na přenos tepla z vrstvy vlákna přes plechový zákryt do okolního prostředí.

#### 5.1.1 Přenos tepla zářením z vrstvy vlákna do plechového zákrytu v hale

Nejprve se zjistí tepelný tok z povrchu vlákna do jednotlivých částí plechového zákrytu. Předpokladem je přenos tepla zářením mezi šedými povrchy, které odrážejí difuzně, tj. tepelná energie je odrazena rovnoměrně do všech směrů a reflektance  $r$  a poměrná zářivost (emisivita)  $\varepsilon$  jsou konstantní pro celý povrch.

##### a) horní část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:	$\varepsilon_1 = 0,82$ [-] .....	poměrná zářivost (emisivita) dřevěného vlákna
	$\varepsilon_2 = 0,1$ [-] .....	poměrná zářivost (emisivita) pozinkovaného plechu
	$F_{1-2} = 1$ [-] .....	úhlový součinitel horního plechového zákrytu
	$a_{1,h} = 0,8$ [m] .....	šířka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$b_{1,h} = 13$ [m] .....	délka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$a_{2,h} = 1$ [m] .....	šířka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$b_{2,h} = 13$ [m] .....	délka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$T_{1,h} = 303$ [K] .....	průměrná teplota vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$T_{2,h} = 299$ [K] .....	výchozí teplota horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale

Horní plocha vrstvy vlákna  $S_{1,h}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$S_{1,h} = a_{1,h} \cdot b_{1,h} = 0,8 \cdot 13 = 10,4 m^2 \quad (5-1)$$

Horní plocha plechového zákrytu  $S_{2,h}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$S_{2,h} = a_{2,h} \cdot b_{2,h} = 1 \cdot 13 = 13 m^2 \quad (5-2)$$

Energie, která se vyměňuje mezi dvěma povrchy, je dána rozdílem celkových potenciálů dělených celkovým odporem

$$\dot{Q}_{1-2,h} = \frac{E_{0,1h} - E_{0,2h}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{1,h}} + \frac{1}{S_{1,h} \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{2,h}}} = \frac{\sigma \cdot (T_{1,h}^4 - T_{2,h}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{1,h}} + \frac{1}{S_{1,h} \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{2,h}}} \quad (5-3)$$

$$\dot{Q}_{1-2,h} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (303^4 - 299^4)}{\frac{1 - 0,82}{0,82 \cdot 10,4} + \frac{1}{10,4 \cdot 1} + \frac{1 - 0,1}{0,1 \cdot 13}} = 96,72 W$$

kde  $\dot{Q}_{1-2,h}$  je tepelný tok do horní části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale a  $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$  je Stefan-Boltzmannova konstanta.

#### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:	$c_{1,h} = 0,2$ [m] .....	výška vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$b_{1,h} = 13$ [m] .....	délka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$c_{2,h} = 0,32$ [m] .....	výška bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$b_{2,h} = 13$ [m] .....	délka bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale
	$F_{3-4} = 1$ [-] .....	úhlový součinitel bočního plechového zákrytu

Boční plocha vrstvy vlákna  $S_{3,h}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$S_{3,h} = b_{1,h} \cdot c_{1,h} = 0,2 \cdot 13 = 2,6 m^2 \quad (5-4)$$

Horní plocha plechového zákrytu  $S_{4,h}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$S_{4,h} = c_{2,h} \cdot b_{2,h} = 0,32 \cdot 13 = 4,16 m^2 \quad (5-5)$$

Výpočet tepelného toku  $Q_{3-4,h}$  ( $W$ ) do boční části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale



$$\dot{Q}_{3-4,h} = \frac{E_{0,3h} - E_{0,4h}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{3,h}} + \frac{1}{S_{3,h} \cdot F_{3-4}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{4,h}}} = \frac{\sigma \cdot (T_{1,h}^4 - T_{2,h}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{3,h}} + \frac{1}{S_{3,h} \cdot F_{3-4}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{4,h}}} \quad (5-6)$$

$$\dot{Q}_{3-4,h} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (303^4 - 299^4)}{\frac{1 - 0,82}{0,82 \cdot 2,6} + \frac{1}{2,6 \cdot 1} + \frac{1 - 0,1}{0,1 \cdot 4,16}} = 48,52W$$

### 5.1.2 Výpočet povrchové teploty plechového zákrytu v hale

Za předpokladu, že zákrytem prochází tepelný tok, který jsem byl stanoven v předchozím výpočtu, lze určit jeho povrchovou teplotu. U plechové konstrukce tl. 3 mm je zřejmé, že teplotní gradient bude téměř zanedbatelný, ale i přesto bude tento předpoklad ověřen za pomoci Fourierova zákona o vedení tepla.

V případě přenosu tepla vedením je tepelný tok, který teče z části tělesa o vyšší teplotě k části o teplotě nižší, vektorová veličina a pro 3D těleso lze vycházet ze tvaru

$$\vec{q} = -\lambda \times \Delta T = -\lambda \times |\text{grad}T| \quad (5-7)$$

#### a) horní část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $\lambda_{pl} = 45,4 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  ..... součinitel tepelné vodivosti plechového zákrytu  
 $\delta_{pl,h} = 0,003 [m]$  ..... tloušťka plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale  
 $\dot{Q}_{v1,h} = \dot{Q}_{1-2,h} [W]$  ..... tepelný tok vedením horní plochou plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$\dot{Q}_{v1,h} = S_{2,h} \cdot \lambda_{pl} \cdot \left( \frac{\Delta T_{1,h}}{\delta_{pl}} \right) \Rightarrow \Delta T_{1,h} = \frac{\dot{Q}_{v1,h} \cdot \delta_{pl,h}}{S_{2,h} \cdot \lambda_{pl}} = \frac{96,72 \cdot 0,003}{13 \cdot 45,4} = 1,011 \cdot 10^{-3} K \quad (5-8)$$

kde  $\Delta T_{1,h} (K)$  je teplotní gradient horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

#### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $\dot{Q}_{v2,h} = \dot{Q}_{3-4,h} [W]$  ... tepelný tok vedením boční plochou plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale

$$\dot{Q}_{v2,h} = S_{4,h} \cdot \lambda_{pl} \cdot \left( \frac{\Delta T_{2,h}}{\delta_{pl}} \right) \Rightarrow \Delta T_{2,h} = \frac{\dot{Q}_{v2,h} \cdot \delta_{pl,h}}{S_{4,h} \cdot \lambda_{pl}} = \frac{48,52 \cdot 0,003}{5,2 \cdot 45,4} = 6,166 \cdot 10^{-4} K \quad (5-9)$$

kde  $\Delta T_{2,h} (K)$  je teplotní gradient boční plochy plechového zákrytu.

Vzhledem k velmi nízkým hodnotám  $\Delta T_{1,h}$  a  $\Delta T_{2,h}$  bude pro další výpočty uvažována povrchová teplota  $T_{w1,h} = 303 K$ .

### 5.1.3 Výpočet součinitele přestupu tepla plechového zákrytu v hale

Pro zjištění tepelné ztráty konvekcí bude nejprve určen součinitel přestupu tepla  $\alpha (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ . V tomto případě se jedná o přirozenou konvekci, kde na základě gradientů teploty vzniká vztlaková síla, která vyvolá volný konvektivní pohyb vzduchu. Obtékané těleso je tímto způsobem ochlazováno a tepelný tok směřuje do okolního prostředí.

#### a) horní část plechového zákrytu

Pro zjištění vlastností vzduchu je určující teplota filmu  $T_f (K)$ , která je aritmetickým průměrem teploty povrchu tělesa  $T_{w1,h}$  a teploty okolí  $T_{\infty,h}$

Zadané hodnoty:  $T_{w1,h} = 303 [K]$  .....povrchová teplota horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale  
 $T_{\infty,h} = 299 [K]$  .....teplota vzduchu v hale

$$T_{f1,h} = \frac{T_{w1,h} + T_{\infty,h}}{2} = \frac{303 + 299}{2} = 301 K \quad (5-10)$$

kde  $T_{f1,h}$  je teplota filmu horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Pro teplotu  $T_{f1,h}$  jsou v tabulkách fyzikálních vlastností plynů nalezeny tyto hodnoty:

$$\nu_{1,h} = 15,68 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}, \lambda_{1,h} = 0,02624 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}, Pr_{1,h} = 0,708$$

$$\beta_{1,h} = \frac{1}{T_{f1,h}} = \frac{1}{301} = 3,322 \times 10^{-3} K^{-1} \quad (5-11)$$

kde  $\nu_{1,h}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $Pr_{1,h}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{1,h}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{1,h}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr (-)$  pro přirozenou konvekci

$$Gr_{1,h} = \frac{g \cdot \beta_{1,h} \cdot (T_{w1,h} - T_{\infty,h}) \cdot (L_{1,h})^3}{(\nu_{1,h})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,322 \cdot 10^{-3} \cdot (303 - 299) \cdot (0,46)^3}{(15,68 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-12)$$

$$Gr_{1,h} = 5,307 \cdot 10^7$$

kde  $L_{1,h} (m)$  je charakteristický rozměr horního povrchu, na němž dochází k pohybu tekutiny,  $Gr_{1,h}$  je Grashofovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale a  $g (m \cdot s^{-2})$  je tíhové zrychlení.

$$L_{1,h} = \frac{S_{2,h}}{O_{1,h}} = \frac{13}{28} = 0,46m \quad (5-13)$$

kde  $O_{1,h}(m)$  je obvod horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$O_{1,h} = 2 \cdot (a_{2,h} + b_{2,h}) = 2 \cdot (1 + 13) = 28m \quad (5-14)$$

Rayleighovo kritérium  $Ra$  (-) slouží pro určení zda jde o laminární nebo turbulentní režim

Kritická hodnota Rayleighova čísla pro proudění v horizontální kavitě vyhřívané odspodu je rovna  $Ra_{,L} = 1708$ , pod touto hodnotou je vztahová síla malá a nepřekoná vazké síly. Nedochozí k žádnému pohybu tekutiny (advekcii) uvnitř kavity a přenos tepla napříč kavitou se realizuje pouze vedením tepla.

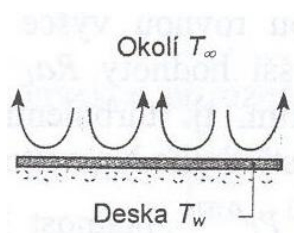
Jakmile zvýšíme Rayleighovo číslo nad hodnotu  $1708$ , tepelné podmínky v kavitě se stávají nestabilní a tekutina začne proudit, nastává advekce. V kavitě se vytváří sada uzavřených rotujících buněk (tzv. Benardovy buňky). Tyto buňky se udrží pro rozsah  $(1708 < Ra_{,L} < 5 \cdot 10^4)$ . Pro vyšší hodnoty  $Ra_{,L}$  buňky zaniknou a pohyb v kavitě se stává turbulentní.

$$Ra_{1,h} = Gr_{1,h} \cdot Pr_{1,h} = 5,307 \cdot 10^7 \cdot 0,708 = 3,757 \cdot 10^7 \quad (5-15)$$

$$Ra_{1,h} > 5 \cdot 10^4 \Rightarrow \text{turbulentní režim}$$

kde  $Ra_{1,h}$  je Rayleighovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Pro případ horizontálního povrchu dle (obr.5.1) je použit vztah pro Nusseltovo číslo  $Nu$  (-)



$$Nu_{1,h} = 0,15 \cdot (Ra_{1,h})^{\frac{1}{3}} = 0,15 \cdot (3,757 \cdot 10^7)^{\frac{1}{3}} = 50,239 \quad (5-16)$$

$$\text{platí pro } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$$

Obr. 5.1 Horní kavita vyhřívána odspodu [5]

kde  $Nu_{1,h}$  je Nusseltovo číslo pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Z Nusseltova čísla je určen součinitel přestupu tepla  $\alpha(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

$$\alpha_{1,h} = \frac{Nu_{1,h} \cdot \lambda_{1,h}}{L_{1,h}} = \frac{50,239 \cdot 0,02624}{0,46} = 2,839W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-17)$$

kde  $\alpha_{1,h}$  je součinitel přestupu tepla pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $T_{w2,h} = 303$  [K].....povrchová teplota boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale

Teplota filmu  $T_f$  (K)

$$T_{f2,h} = \frac{T_{w2,h} + T_{\infty,h}}{2} = \frac{303 + 299}{2} = 301K \quad (5-18)$$

kde  $T_{f2,h}$  je teplota filmu boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Fyzikální vlastnosti plynu dané teplotou  $T_{f2,h}$  (K)

$$\nu_{2,h} = 15,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \lambda_{2,h} = 0,02624 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{Pr}_{2,h} = 0,708$$

$$\beta_{2,h} = \frac{1}{T_{f2,h}} = \frac{1}{301} = 3,322 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (5-19)$$

kde  $\nu_{2,h}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $\text{Pr}_{2,h}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{2,h}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{2,h}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr$  (-) pro přirozenou konvekci

$$Gr_{2,h} = \frac{g \cdot \beta_{2,h} \cdot (T_{w2,h} - T_{\infty,h}) \cdot (L_{2,h})^3}{(\nu_{2,h})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,322 \cdot 10^{-3} \cdot (303 - 299) \cdot (0,19)^3}{(15,68 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-20)$$

$$Gr_{2,h} = 3,873 \cdot 10^6$$

kde  $L_{2,h}(m)$  je charakteristický rozměr bočního povrchu, ne němž dochází k pohybu tekutiny,  $Gr_{2,h}$  je Grashofovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$L_{2,h} = \frac{S_{4,h}}{O_{2,h}} = \frac{5,2}{26,6} = 0,19m \quad (5-21)$$

kde  $O_{2,h}(m)$  je obvod boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$O_{2,h} = 2 \cdot (c_{2,h} + b_{2,h}) = 2 \cdot (0,32 + 13) = 26,6m \quad (5-22)$$

Rayleighovo kritérium  $Ra$  (-) pro určení zda jde o laminární nebo turbulentní režim

Pokud je Rayleighovo číslo nízké,  $Ra_L < 10^3$ , nenastane ve vertikální kavitě téměř žádná advekce a tepelný tok se podobně jako u horizontální kavity přenáší vedením. Pro Nusseltovo číslo platí  $Nu_L = 1$ . Pro vyšší Rayleighova čísla se vytváří v kavitě cirkulační oblast. Podél teplé stěny tekutina proudí vzhůru. Pro vertikální povrch platí, že pokud je  $Ra_x > 10^9$ , jde o režim turbulentní, pokud je  $Ra_x < 10^9$ , jde o režim laminární.

$$Ra_{2,h} = Gr_{2,h} \cdot Pr_{2,h} = 3,873 \cdot 10^6 \cdot 0,708 = 2,74 \cdot 10^6 \Rightarrow \text{laminární režim} \quad (5-23)$$

kde  $Ra_{2,h}$  je Rayleighovo kritérium pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Pro případ vertikálního povrchu použijeme vztah pro Nusseltovo číslo  $Nu$  (-)

$$Nu_{2,h} = 0,13 \cdot (Gr_{2,h} \cdot Pr_{2,h})^{\frac{1}{3}} = 0,13 \cdot (3,873 \cdot 10^6 \cdot 0,708)^{\frac{1}{3}} = 18,196 \quad (5-24)$$

platí pro  $10^4 \leq Ra \leq 10^7$

kde  $Nu_{2,h}$  je Nusseltovo číslo pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

Z Nusseltova čísla je určen součinitel přestupu tepla  $\alpha$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$$\alpha_{2,h} = \frac{Nu_{2,h} \cdot \lambda_{2,h}}{L_{2,h}} = \frac{18,196 \cdot 0,02624}{0,19} = 2,461 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-25)$$

kde  $\alpha_{2,h}$  je součinitel přestupu tepla pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale

#### 5.1.4 Tepelná ztráta plechového zákrytu v hale přirozenou konvekcí

Pro výpočet tepelné ztráty přirozenou konvekcí jsou použity hodnoty součinitele přestupu tepla, které jsou určeny z rovnic (5-17) a (5-25). Bez ohledu na povahu konvekce platí pro přenášený měrný tepelný tok vztah nazývaný někdy také Newtonův ochlazovací zákon.

$$\dot{q} = \alpha \times (T_w - T_\infty) \quad (5-26)$$

##### a) horní část plechového zákrytu

$$\dot{q}_{k1,h} = \alpha_{1,h} \cdot (T_{w1,h} - T_{\infty,h}) = 2,84 \cdot (303 - 299) = 11,36 W \cdot m^{-2} \quad (5-27)$$

kde  $q_{k1,h}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$\dot{Q}_{k1,h} = S_{2,h} \cdot \dot{q}_{k1,h} = 13 \cdot 11,36 = 148 W \quad (5-28)$$

kde  $\dot{Q}_{k1,h}$  je tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

**b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu**

$$\dot{q}_{k2,h} = \alpha_{2,h} \cdot (T_{w2,h} - T_{\infty,h}) = 2,46 \cdot (303 - 299) = 9,84 W \cdot m^{-2} \quad (5-29)$$

kde  $\dot{q}_{k1,h}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$\dot{Q}_{k2,h} = S_{4,h} \cdot \dot{q}_{k2,h} = 5,2 \cdot 9,84 = 52 W \quad (5-30)$$

kde  $\dot{Q}_{k2,h}$  je tepelný tok přirozenou konvekcí pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

**5.1.5 Tepelná ztráta plechového zákrytu v hale zářením**

Součástí tepelného toku do okolí je také přenos tepla radiací (zářením). Přestože dominantním mechanismem přenosu tepla je přirozená konvekce, vliv radiace také není zanedbatelný. V tomto případě se bude vycházet ze Stefan-Boltzmannova zákona, který charakterizuje maximální tok, který může být z povrchu emitován.

$$\dot{q}_z = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_w - T_\infty)^4 \quad (5-31)$$

**a) horní část plechového zákrytu**

$$\dot{q}_{z1,h} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_{w1,h}^4 - T_{\infty,h}^4) = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot (303^4 - 299^4) = 2,47 W \cdot m^{-2} \quad (5-32)$$

kde  $\dot{q}_{z1,h}$  je měrný tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$\dot{Q}_{z1,h} = S_{2,h} \cdot \dot{q}_{z1,h} = 13 \cdot 2,47 = 32 W \quad (5-33)$$

kde  $\dot{Q}_{z1,h}$  je tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

**b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu**

$$\dot{q}_{z2,h} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_{w2,h}^4 - T_{\infty,h}^4) = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot (303^4 - 299^4) = 2,47 W \cdot m^{-2} \quad (5-34)$$

kde  $\dot{q}_{z2,h}$  je měrný tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

$$\dot{Q}_{z2,h} = S_{4,h} \cdot \dot{q}_{z2,h} = 5,2 \cdot 2,47 = 13 W \quad (5-35)$$

kde  $\dot{Q}_{z2,h}$  je tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

### 5.1.6 Celková tepelná ztráta plechového zákrytu v hale

Celková tepelná ztráta je určena jako součet tepelné ztráty přirozenou konvekcí a radiací horní a bočními částmi plechového zákrytu.

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_k + \dot{Q}_z \quad (5-36)$$

kde hodnota tepelného toku v důsledku přirozené konvekce je rovna

$$\dot{Q}_{k,1} = \dot{Q}_{k1,h} + (2 \cdot \dot{Q}_{k2,h}) = 148 + (2 \cdot 52) = 252W \quad (5-37)$$

kde  $\dot{Q}_{k,1}$  je celkový tepelný tok konvekcí plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

a hodnota tepelného toku v důsledku radiace je dána vztahem

$$\dot{Q}_{z,1} = \dot{Q}_{z1,h} + (2 \cdot \dot{Q}_{z2,h}) = 32 + (2 \cdot 13) = 58W \quad (5-38)$$

kde  $\dot{Q}_{z,1}$  je celkový tepelný tok radiací plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v hale.

potom je získána výsledná tepelná ztráta

$$\dot{Q}_{c,1} = \dot{Q}_{k,1} + \dot{Q}_{z,1} = 252 + 58 = 310W$$

## 5.2 Tepelná ztráta šikmého dopravníku v kolně

Tato část výpočtu je zaměřena na výpočet tepelné ztráty pro úsek šikmého dopravníku, který prochází prostorem odděleným od samotné haly, tzv. kolnou. Vlákno se zde nasypává na začátek dopravního pásu z venkovního bunkru.

Celý postup výpočtu bude prakticky totožný s předchozím případem, proto již nebude nezbytný tak podrobný komentář. Rozdíl se objeví pouze v důsledku použité izolace tloušťky 70 mm na horní a bočních stranách oplechování, které je v tomto případě o tloušťce 5 mm. Proto lze očekávat snížený celkový tepelný tok do okolního prostředí. Je však třeba připomenout, že se zároveň snížila teplota okolního vzduchu, tudíž se zvýšil celkový teplotní spád.

### 5.2.1 Přenos tepla zářením z vrstvy vlákna do plechového zákrytu v kolně

#### a) horní část plechového zákrytu

*Zadané hodnoty:*

$a_{1,k} = 0,8$ [m]	.....	šířka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v kolně
$b_{1,k} = 9,5$ [m]	.....	délka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v kolně
$a_{2,k} = 1$ [m]	.....	šířka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

- $b_{2,k} = 9,5$  [m] ..... délka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně  
 $T_{1,k} = 303$  [K] ..... průměrná teplota vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v kolně  
 $T_{2,k} = 290$  [K] ..... výchozí teplota horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

Horní plocha vrstvy vlákna  $S_{1k}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$$S_{1,k} = a_{1,k} \cdot b_{1,k} = 0,8 \cdot 9,5 = 7,6 m^2 \quad (5-39)$$

Plocha horního plechového zákrytu  $S_{2k}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$$S_{2,k} = a_{2,k} \cdot b_{2,k} = 1 \cdot 9,5 = 9,5 m^2 \quad (5-40)$$

Energie vyzářená mezi dvěma povrchy je dána vztahem

$$\dot{Q}_{1-2,k} = \frac{\sigma \cdot (T_{1,k}^4 - T_{2,k}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{1,k}} + \frac{1}{S_{1,k} \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{2,k}}} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (303^4 - 290^4)}{\frac{1 - 0,82}{0,82 \cdot 7,6} + \frac{1}{7,6 \cdot 1} + \frac{1 - 0,1}{0,1 \cdot 9,5}} = 69,39 W \quad (5-41)$$

kde  $\dot{Q}_{1-2,k}$  je tepelný tok do horní části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

#### **b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu**

- Zadané hodnoty:*
- $c_{1,k} = 0,2$  [m] ..... výška vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v kolně
  - $b_{1,k} = 9,5$  [m] ..... délka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku v kolně
  - $c_{2,k} = 0,32$  [m] ..... výška bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně
  - $b_{2,k} = 9,5$  [m] ..... délka bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

Plocha vrstvy vlákna  $S_{3,k}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$$S_{3,k} = c_{1,k} \cdot b_{1,k} = 0,2 \cdot 9,5 = 1,9 m^2 \quad (5-42)$$

Plocha horního plechového zákrytu  $S_{4k}$  ( $m^2$ ) na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$$S_{4,k} = c_{2,k} \cdot b_{2,k} = 0,32 \cdot 9,5 = 3,1 m^2 \quad (5-43)$$

Energie vyzářená mezi dvěma povrchy

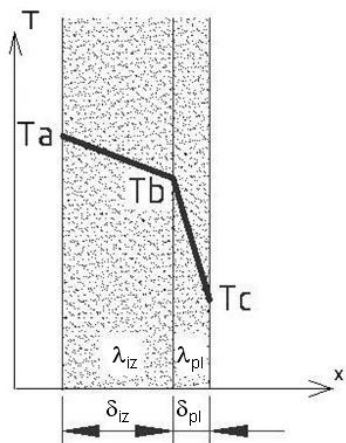
$$Q_{3-4,k} = \frac{\sigma \cdot (T_{1,k}^4 - T_{2,k}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_{3,k}} + \frac{1}{S_{3,k} \cdot F_{3-4}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_{4,k}}} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (303^4 - 290^4)}{\frac{1 - 0,82}{0,82 \cdot 1,9} + \frac{1}{1,9 \cdot 1} + \frac{1 - 0,1}{0,1 \cdot 3,1}} = 26,69 W \quad (5-44)$$



kde  $\dot{Q}_{3-4,k}$  je tepelný tok do boční části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

### 5.2.2 Prostup tepla přes izolovaný plechový zákryt v kolně

Lze předpokládat, že plechovým zákrytem prochází tepelná energie, která byla určena v předchozím bodě. Avšak v tomto případě je odpor kladený do cesty tepelnému toku složený ze dvou vrstev (viz obr. 5.2) o různých tloušťkách a tepelných vodivostech ( tepelná izolace + plech ).



Obr. 5.2 Složená stěna

K řešení je přistoupeno opět za pomoci Fourierova zákona, tentokrát v podobě pro řešení složených rovinných vrstev, kde teplotní rozdíl ve vrstvách považujeme za jakýsi rozdíl teplotního potenciálu, neboli

$$\text{tepelný tok} = \frac{\text{diference teplotního potenciálu}}{\text{tepelný odpor}}$$

což je vztah analogický k Ohmovu zákonu. V tomto případě tedy platí rovnost tepelných toků, které musí projít v ustáleném stavu beze změny každou vrstvou, neboli

$$\dot{Q} = -\lambda_{iz} \times S \times \frac{T_b - T_a}{\delta_{iz}} = -\lambda_{pl} \times S \times \frac{T_c - T_b}{\delta_{pl}} \quad (5-45)$$

po vyjádření teplotních diferencí a sečení těchto rovnic je dosaženo výsledného vztahu

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_c}{\frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \times S} + \frac{\delta_{pl}}{\lambda_{pl} \times S}} \quad (5-46)$$

kde  $T_a, T_b, T_c$  (K) jsou povrchové teploty na protilehlých stranách

#### a) horní část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $\delta_{pl,k} = 0,005$  [m] ..... tloušťka plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$\dot{Q}_{v1,k} = \dot{Q}_{1-2,k}$  [W] ..... tepelný tok vedením horní izolovanou částí plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$\delta_{iz} = 0,07$  [m] ..... tloušťka tepelné izolace

$\lambda_{iz} = 0,046$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] ..... součinitel tepelné vodivosti izolace

$$\dot{Q}_{v1k} = \frac{\Delta T_{1k}}{\frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{2k}} + \frac{\delta_{plk}}{\lambda_{pl} \cdot S_{2k}}} \Rightarrow \Delta T_{1k} = \dot{Q}_{v1k} \cdot \left( \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{2k}} + \frac{\delta_{plk}}{\lambda_{pl} \cdot S_{2k}} \right) = \quad (5-47)$$

$$69,4 \cdot \left( \frac{0,07}{0,046 \cdot 9,5} + \frac{0,005}{45,4 \cdot 9,5} \right) = 11,12 K$$

kde  $\Delta T_{1,k} (K)$  je teplotní gradient horní izolované části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Z teplotního rozdílu vyplývá, že povrchová teplota horního plechového zákrytu (neboli  $T_{c,1}$ ) bude rovna

$$T_{c,1} = T_{1,k} - \Delta T_{1,k} = 303 - 11,1 = 291,9 K \quad (5-48)$$

### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $\dot{Q}_{v2,k} = \dot{Q}_{3-4,k} [W]$  ..... tepelný tok vedením boční izolovanou částí plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

$$Q_{v2,k} = \frac{\Delta T_{2,k}}{\frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{4,k}} + \frac{\delta_{pl,k}}{\lambda_{pl} \cdot S_{4,k}}} \Rightarrow \Delta T_{2,k} = Q_{v2,k} \cdot \left( \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{4,k}} + \frac{\delta_{pl,k}}{\lambda_{pl} \cdot S_{4,k}} \right) = \quad (5-49)$$

$$= 26,7 \cdot \left( \frac{0,07}{0,046 \cdot 3,8} + \frac{0,005}{45,4 \cdot 3,8} \right) = 10,7 K$$

kde  $\Delta T_{2,k} (K)$  je teplotní gradient boční izolované části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Povrchová teplota bočního plechového zákrytu (neboli  $T_{c,2}$ ) bude rovna

$$T_{c,2} = T_{1,k} - \Delta T_{2,k} = 303 - 10,7 = 292,3 K \quad (5-50)$$

kde  $\Delta T_{2,k} (K)$  je teplotní gradient boční izolované části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

## 5.2.3 Výpočet součinitele přestupu tepla plechového zákrytu v kolně

### a) horní část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $T_{c,1} = 291,9 [K]$  ..... povrchová teplota horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně  
 $T_{\infty,k} = 290 [K]$  ..... teplota vzduchu v kolně

Teplota filmu

$$T_{f1,k} = \frac{T_{c,1} + T_{\infty,k}}{2} = \frac{291,9 + 290}{2} = 290,95 K \quad (5-51)$$

kde  $T_{f1,k}$  je teplota filmu horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Pro teplotu  $T_{f1,k}$  najdeme v tabulkách fyzikálních vlastností plynů tyto hodnoty:

$$\nu_{1,k} = 14,56 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \lambda_{1,k} = 0,02552 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{Pr}_{1,k} = 0,719$$

$$\beta_{1,k} = \frac{1}{T_{f1,k}} = \frac{1}{290,95} = 3,437 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (5-52)$$

kde  $\nu_{1,k}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $\text{Pr}_{1,k}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{1,k}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{1,k}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro horní plochu plechového zákrytu v kolně.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr$  (-) pro přirozenou konvekci

$$Gr_{1,k} = \frac{g \cdot \beta_{1,k} \cdot (T_{c,1} - T_{\infty,k}) \cdot (L_{1,k})^3}{(\nu_{1,k})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,437 \cdot 10^{-3} \cdot (291,9 - 290) \cdot (0,45)^3}{(14,56 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-53)$$

$$Gr_{1,k} = 2,754 \cdot 10^7$$

kde  $L_{1,k}(m)$  je charakteristický rozměr horního povrchu, na němž dochází k pohybu tekutiny,  $Gr_{1,k}$  je Grashofovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$L_{1,k} = \frac{S_{2,k}}{O_{1,k}} = \frac{9,5}{21} = 0,45 \text{ m} \quad (5-54)$$

kde  $O_{1,k}(m)$  je obvod horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$O_{1,k} = 2 \cdot (a_{2,k} + b_{2,k}) = 2 \cdot (1 + 9,5) = 21 \text{ m} \quad (5-55)$$

Rayleighovo kritérium  $Ra$  (-) pro určení laminárního nebo turbulentního režim v horizontální kavitě vyhříváné odspodu

$$Ra_{1,k} = Gr_{1,k} \cdot \text{Pr}_{1,k} = 2,754 \cdot 10^7 \cdot 0,719 = 1,98 \cdot 10^7 \quad (5-56)$$

$$Ra_{1,k} > 5 \times 10^4 \Rightarrow \text{turbulentní režim}$$

kde  $Ra_{1,k}$  je Rayleighovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Nusseltovo číslo  $Nu$  (-)

$$Nu_{1,k} = 0,15 \cdot (Ra_{1,k})^{\frac{1}{3}} = 0,15 \cdot (1,98 \cdot 10^7)^{\frac{1}{3}} = 40,58 \quad \text{platí pro} \quad 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (5-57)$$

kde  $Nu_{1,k}$  je Nusseltovo číslo pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Z Nusseltova čísla určíme součinitel přestupu tepla  $\alpha(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

$$\alpha_{1,k} \frac{Nu_{1,k} \cdot \lambda_{1,k}}{L_{1,k}} = \frac{40,58 \cdot 0,02552}{0,45} = 2,31 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-58)$$

kde  $\alpha_{1,k}$  je součinitel přestupu tepla pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

Zadané hodnoty:  $T_{c,2} = 291,9 [K]$  .....povrchová teplota boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně

Teplota filmu

$$T_{f,2,k} = \frac{T_{c,2} + T_{\infty,k}}{2} = \frac{292,3 + 290}{2} = 291,15 K \quad (5-59)$$

kde  $T_{f,2,k}$  je teplota filmu boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Pro teplotu  $T_{f,2,k}$  najdeme v tabulkách fyzikálních vlastností plynů tyto hodnoty:

$$\nu_{2,k} = 14,58 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}, \lambda_{2,k} = 0,02553 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}, Pr_{2,k} = 0,72$$

$$\beta_{2,k} = \frac{1}{T_{f,2,k}} = \frac{1}{291,15} = 3,434 \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad (5-60)$$

kde  $\nu_{2,k}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $Pr_{2,k}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{2,k}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{2,k}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr$  (-) pro přirozenou konvekci

$$Gr_{2,k} = \frac{g \cdot \beta_{2,k} \cdot (T_{c,2} - T_{\infty,k}) \cdot (L_{2,k})^3}{(\nu_{2,k})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,434 \cdot 10^{-3} \cdot (292,3 - 290) \cdot (0,19)^3}{(14,58 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-61)$$

$$Gr_{2,k} = 2,5 \cdot 10^6$$

kde  $L_{2,k}(m)$  je charakteristický rozměr bočního povrchu, na němž dochází k pohybu tekutiny,  $Gr_{2,k}$  je Grashofovo kritérium pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$L_{2,k} = \frac{S_{4,k}}{O_{2,k}} = \frac{3,8}{19,8} = 0,19 m \quad (5-62)$$

kde  $O_{2,k}(m)$  je obvod boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$O_{2,k} = 2 \cdot (a_4 + b_4) = 2 \cdot (0,4 + 9,5) = 19,8m \quad (5-63)$$

Rayleighovo kritérium  $Ra$  (-) pro určení zda jde o laminární nebo turbulentní režim

$$Ra_{2,k} = Gr_{2,k} \cdot Pr_{2,k} = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,72 = 1,8 \cdot 10^6 \quad Ra_{2,k} < 10^9 \Rightarrow \text{laminární režim} \quad (5-64)$$

kde  $Ra_{2,k}$  je Rayleighovo kritérium pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$\text{Nusseltovo číslo } Nu_{2,k} = 0,13 \cdot (Gr_{2,k} \cdot Pr_{2,k})^{\frac{1}{3}} = 0,13 \cdot (2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,72)^{\frac{1}{3}} = 15,814 \quad (5-65)$$

platí pro  $10^4 \leq Ra \leq 10^7$

kde  $Nu_{2,k}$  je Nusseltovo číslo pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

Z Nusseltova čísla určíme součinitel přestupu tepla  $\alpha(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

$$\alpha_{2,k} \frac{Nu_{2,k} \cdot \lambda_{2,k}}{L_{2,k}} = \frac{15,814 \cdot 0,02553}{0,19} = 2,12W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-66)$$

kde  $\alpha_{2,k}$  je součinitel přestupu tepla pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

#### 5.2.4 Tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně přirozenou konvekcí

Hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha$  získané ze vztahu (5-58) a (5-66) jsou použity pro výpočet tepelné ztráty přirozenou konvekcí.

##### a) horní část plechového zákrytu

$$\dot{q}_{k1,k} = \alpha_{1,k} \cdot (T_{c,1} - T_{\infty,k}) = 2,31 \cdot (291,9 - 290) = 4,39W \cdot m^{-2} \quad (5-67)$$

kde  $\dot{q}_{k1,k}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$\dot{Q}_{k1,k} = S_{2,k} \cdot \dot{q}_{k1,k} = 9,5 \cdot 4,39 = 42W \quad (5-68)$$

kde  $\dot{Q}_{k1,k}$  je tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

##### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

$$\dot{q}_{k2,k} = \alpha_{2k} \cdot (T_{c,2} - T_{\infty,k}) = 2,12 \cdot (292,3 - 290) = 4,88W \cdot m^{-2} \quad (5-69)$$

kde  $\dot{q}_{k2,k}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$\dot{Q}_{k2,k} = S_{4,k} \cdot q_{k2,k} = 3,8 \cdot 4,88 = 19W \quad (5-70)$$

kde  $\dot{Q}_{z1,k}$  je tepelný tok přirozenou konvekcí pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

### 5.2.5 Tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně zářením

#### a) horní část plechového zákrytu

$$\dot{q}_{z1,k} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_{c,1}^4 - T_{\infty,k}^4) = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot (291,9^4 - 290^4) = 1,06W \cdot m^{-2} \quad (5-71)$$

kde  $\dot{q}_{z1,k}$  je měrný tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$\dot{Q}_{z1,k} = S_{2,k} \cdot \dot{q}_{z1,k} = 9,5 \cdot 1,06 = 10W \quad (5-72)$$

kde  $\dot{Q}_{z1,k}$  je tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

#### b) levá ( resp. pravá ) část plechového zákrytu

$$\dot{q}_{z2,k} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_{c,2}^4 - T_{\infty,k}^4) = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot (292,3^4 - 290^4) = 1,29W \cdot m^{-2} \quad (5-73)$$

kde  $\dot{q}_{z2,k}$  je měrný tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

$$\dot{Q}_{z2,k} = S_{4,k} \cdot q_{z2,k} = 3,8 \cdot 1,29 = 5W \quad (5-74)$$

kde  $\dot{Q}_{z2,k}$  je tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

### 5.2.6 Celková tepelná ztráta plechového zákrytu v kolně

přirozenou konvekcí 
$$\dot{Q}_{k,2} = \dot{Q}_{k1,k} + (2 \cdot \dot{Q}_{k2,k}) = 42 + (2 \cdot 19) = 80W \quad (5-75)$$

kde  $\dot{Q}_{k,2}$  je celkový tepelný tok konvekcí plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

zářením 
$$\dot{Q}_{z,2} = \dot{Q}_{z1,k} + (2 \cdot \dot{Q}_{z2,k}) = 10 + (2 \cdot 5) = 20W \quad (5-76)$$

kde  $\dot{Q}_{z,2}$  je celkový tepelný tok radiací plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku v kolně.

celková tepelná ztráta 
$$\dot{Q}_{c,2} = \dot{Q}_{k,2} + \dot{Q}_{z,2} = 80 + 20 = 100W \quad (5-78)$$

### 5.2.7 Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku

Je součtem tepelných ztrát úseku dopravníku nacházejícího se v hale a v kolně.

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{c,1} + \dot{Q}_{c,2} = 310 + 100 = 410W$$

Tepelná ztráta části dopravníku v kolně =  $\frac{1}{3}$  tepelné ztráty části dopravníku v hale.

### 5.3 Tepelná ztráta venkovního zásobovacího bunkru

V případě venkovního zásobovacího bunkru je přistoupeno k řešení za pomoci tepelné ztráty prostupem tepla  $Q_p$  (W), který je obecně známý z výpočtu tepelných ztrát ve vytápění.

$$Q_p = k \cdot S \cdot \Delta T \quad (5-79)$$

kde  $k$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) je součinitel prostupu tepla

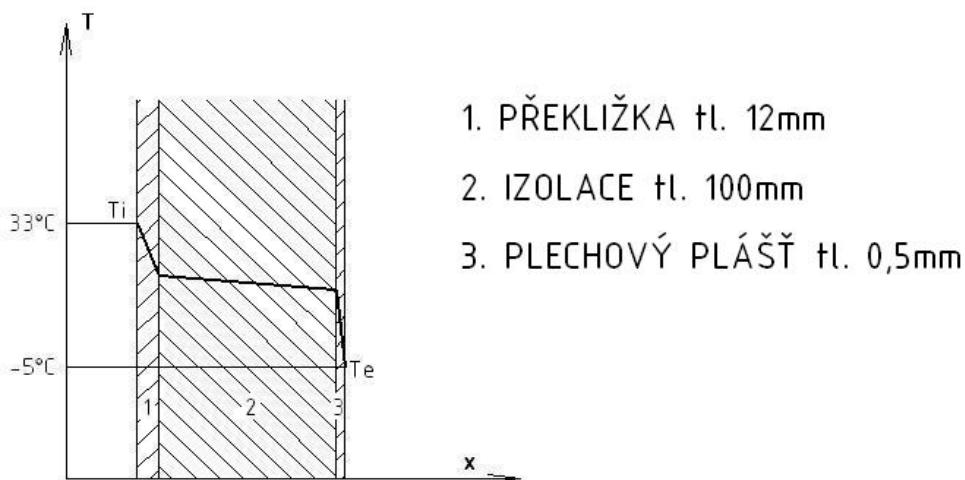
Hodnotu venkovní teploty je zvolena jako nejnižší teplotu při které bylo provedeno měření v jednotlivých úsecích trasy, tedy  $-5^\circ C$ . Ve výpočtu se neuvažuje s tepelnou ztrátou podlahou, neboť se zde nachází podlahový pás.

#### 5.3.1 Výpočet součinitele prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla  $k$  je určen pro konstrukci znázorněnou na obr. 7.1 dle následujícího vztahu

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \left( \frac{\delta}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (5-80)$$

kde  $\alpha_i$  a  $\alpha_e$  jsou součinitele přestupu tepla na vnitřní a venkovní straně. Jejich hodnoty jsou ( $\alpha_i = 8 W/m^2/K$ ) a ( $\alpha_e = 23 W/m^2/K$ )



Obr. 7.1 Teplotní spád v konstrukci pláště

<i>Zadané hodnoty:</i>	$T_e = 268$ [K] .....	teplota venkovního vzduchu
	$T_i = 306$ [K] .....	teplota vzduchu uvnitř bunkru
	$\delta_{př} = 0,012$ [m] .....	tloušťka překližky
	$\lambda_{př} = 0,11$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] .....	součinitel tepelné vodivosti překližky
	$\delta_{iz,b} = 0,1$ [m] .....	tloušťka tepelné izolace
	$\lambda_{iz,b} = 0,056$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] .....	součinitel tepelné vodivosti izolace
	$\delta_{pl,b} = 0,005$ [m] .....	tloušťka plechového pláště
	$\lambda_{pl,b} = 45,6$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] .....	součinitel tepelné plechového pláště
	$\alpha_i = 8$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] .....	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
	$\alpha_e = 23$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] .....	součinitel přestupu tepla na vnější straně

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \left( \frac{\delta_{př}}{\lambda_{př}} + \frac{\delta_{iz,b}}{\lambda_{iz,b}} + \frac{\delta_{pl,b}}{\lambda_{pl,b}} \right) + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \sum \left( \frac{0,012}{0,11} + \frac{0,1}{0,056} + \frac{0,005}{45,4} \right) + \frac{1}{23}} \quad (5-81)$$

$$k = 0,48 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Z rozměrů bunkru ve tvaru ( šířka x výška x hloubka ) je vypočten povrch pláště  $S_b$  [m<sup>2</sup>], který se podílí na tepelné ztrátě

<i>Zadané hodnoty:</i>	$s = 1,75$ [m] .....	šířka bunkru
	$v = 3,2$ [m] .....	výška bunkru
	$h = 16,1$ [m] .....	hloubka bunkru

$$S_b = [2 \cdot (s \cdot v) + 2 \cdot (h \cdot v) + (s \cdot h)] = [2 \cdot (1,75 \cdot 3,2) + 2 \cdot (16,1 \cdot 3,2) + (1,75 \cdot 16,1)] \quad (5-82)$$

$$S_b = 142,4 m^2$$

### 5.3.2 Tepelná ztráta prostupem tepla

Nyní již jsou k dispozici všechny potřebné hodnoty k výpočtu tepelné ztráty  $Q_p$  [W], která je určena dle vztahu (5-79).

$$Q_p = k \cdot S_b \cdot (T_i - T_e) = 0,48 \cdot 142,4 \cdot (306 - 268) = 2600 W = 2,6 kW$$

## 5.4 Tepelná ztráta předlisovaného koberce

Na úseku dopravní linky mezi kontinuálním před lisem a samotným lisovacím zařízením není dřevovláknitý koberec chráněn žádným způsobem od okolního prostředí. Dochází zde k tepelným ztrátám přirozenou konvekcí a díky vysoké emisivitě dřevěného vlákna má značný podíl i záření. Vliv ochlazování je i v tomto případě nežádoucí, proto je opět provedeno zhodnocení tepelných toků. V tomto případě lze očekávat největší ztráty přes horní vrstvy koberce. Tepelný tok přes dopravní pás do konstrukce výrobní linky je zanedbán.



### 5.4.1 Výpočet součinitele přestupu tepla předlisovaného koberce

#### a) horní strana koberce

Zadané hodnoty:  $T_v = 302$  [K] ..... Teplota vlákna v koberci  
 $T_{\infty,v} = 299$  [K] ..... Teplota okolního vzduchu

$$\text{Teplota filmu} \quad T_{f1,v} = \frac{T_v + T_{\infty,v}}{2} = \frac{302 + 299}{2} = 300,5K \quad (5-83)$$

kde  $T_{f1,v}$  je teplota filmu horní plochy vláknitého koberce

Pro teplotu  $T_{f1,v}$  jsou nalezeny v tabulkách fyzikálních vlastností plynů tyto hodnoty:

$$\nu_{1,v} = 15,71 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \quad \lambda_{1,v} = 0,02631 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad \text{Pr}_{1,v} = 0,707$$

$$\beta_{1,v} = \frac{1}{T_{f1,v}} = \frac{1}{300,5} = 3,328 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (5-84)$$

kde  $\nu_{1,v}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $\text{Pr}_{1,v}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{1,v}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{1,v}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro horní plochu vláknitého koberce.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr$  (-) pro přirozenou konvekci

$$Gr_{1,v} = \frac{g \beta_{1,v} \cdot (T_v - T_{\infty,v}) \cdot (L_{1,v})^3}{(\nu_{1,v})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,328 \cdot 10^{-3} \cdot (302 - 299) \cdot (2,8)^3}{(15,71 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-85)$$

$$Gr_{1,v} = 8,712 \cdot 10^9$$

kde  $L_{1,v}$  (m) je charakteristický rozměr horního povrchu, na němž dochází k pohybu tekutiny,  $Gr_{1,v}$  je Grashofovo kritérium pro horní plochu vláknitého koberce.

Rayleighovo kritérium  $Ra$  (-) pro určení laminárního nebo turbulentního režim v horizontální kavitě vyhřívané odspodu

$$Ra_{1,v} = Gr_{1,v} \cdot \text{Pr}_{1,v} = 8,712 \cdot 10^9 \cdot 0,707 = 6,16 \cdot 10^9 \quad (5-86)$$

$$Ra_{1,v} > 5 \cdot 10^4 \Rightarrow \text{turbulentní režim}$$

kde  $Ra_{1,v}$  je Rayleighovo kritérium pro horní plochu vláknitého koberce.

Nusseltovo číslo  $Nu$  (-)

$$Nu_{1,v} = 0,15 \cdot (Ra_{1,v})^{\frac{1}{3}} = 0,15 \cdot (6,16 \cdot 10^9)^{\frac{1}{3}} = 274,97 \quad \text{platí pro} \quad 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (5-87)$$

kde  $Nu_{1,v}$  je Nusseltovo číslo pro horní plochu vláknitého koberce.

Součinitel přestupu tepla  $\alpha(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

$$\alpha_{1,v} = \frac{Nu_{1,v} \cdot \lambda_{1,v}}{L_{1,v}} = \frac{274,97 \cdot 0,02631}{2,8} = 2,58 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-88)$$

kde  $\alpha_{1,v}$  je součinitel přestupu tepla pro horní plochu vláknitého koberce.

### b) boční strana koberce

Teplota filmu  $T_{f2,v} = \frac{T_v + T_{\infty,v}}{2} = \frac{302 + 299}{2} = 300,5 K$  (5-89)

kde  $T_{f2,v}$  je teplota filmu boční plochy vláknitého koberce

Pro teplotu  $T_{f2,v}$  jsou nalezeny v tabulkách fyzikálních vlastností plynů tyto hodnoty:

$$\nu_{2,v} = 15,71 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}, \lambda_{2,v} = 0,02631 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}, Pr_{2,v} = 0,707$$

$$\beta_{2,v} = \frac{1}{T_{f2,v}} = \frac{1}{300,5} = 3,328 \times 10^{-3} \frac{1}{K} \quad (5-90)$$

kde  $\nu_{2,v}$  je kinematická viskozita vzduchu,  $Pr_{2,v}$  Prandtlovo číslo,  $\lambda_{2,v}$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\beta_{2,v}$  je součinitel objemové roztažnosti vzduchu pro horní plochu vláknitého koberce.

Grashofovo kritérium podobnosti  $Gr(-)$  pro přirozenou konvekci

$$Gr_{2,v} = \frac{g \cdot \beta_{2,v} (T_v - T_{\infty,v}) \cdot (L_2)^3}{(\nu_{2,v})^2} = \frac{9,81 \cdot 3,328 \cdot 10^{-3} \cdot (302 - 299) \cdot (0,24)^3}{(15,71 \cdot 10^{-6})^2} \quad (5-91)$$

$$Gr_{2,v} = 5,5 \cdot 10^6$$

Rayleighovo kritérium  $Ra (-)$  pro určení zda jde o laminární nebo turbulentní režim

$$Ra_{2,v} = Gr_{2,v} \cdot Pr_{2,v} = 5,5 \cdot 10^6 \cdot 0,707 = 3,9 \cdot 10^6 \quad Ra_{2,v} < 10^9 \Rightarrow \text{laminární režim} \quad (5-92)$$

kde  $Ra_{2,v}$  je Rayleighovo kritérium pro boční plochu vláknitého koberce.

Nusseltovo číslo

$$Nu_{2,v} = 0,13 \cdot (Gr_{2,v} \cdot Pr_{2,v})^{\frac{1}{3}} = 0,13 \cdot (5,5 \cdot 10^6 \cdot 0,707)^{\frac{1}{3}} = 20,443 \quad (5-93)$$

platí pro  $10^4 \leq Ra \leq 10^7$

kde  $Nu_{2,v}$  je Nusseltovo číslo pro boční plochu vláknitého koberce.

Součinitel přestupu tepla  $\alpha(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$

$$\alpha_{2,v} \frac{Nu_{2,v} \cdot \lambda_{2,v}}{L_{2,v}} = \frac{20,443 \cdot 0,02631}{0,24} = 2,24 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5-94)$$

kde  $\alpha_{2,v}$  je součinitel přestupu tepla pro boční plochu vláknitého koberce.

#### 5.4.2 Tepelná ztráta předlisovaného koberce přirozenou konvekcí

Vzhledem k tomu, že se jedná o souvislý pás dřevovláknitého koberce, budou jednotlivé tepelné ztráty vztaženy na plochu  $1m^2$ .

##### a) horní strana koberce

$$\dot{q}_{k1,v} = \alpha_{1,v} \cdot (T_v - T_{\infty,v}) = 2,58 \cdot (302 - 299) = 7,74 W \cdot m^{-2} \quad (5-95)$$

kde  $\dot{q}_{k1,v}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí horní plochou vláknitého koberce.

##### b) boční strana koberce

$$\dot{q}_{k2,v} = \alpha_{2,v} \cdot (T_v - T_{\infty,v}) = 2,24 \cdot (302 - 299) = 6,72 W \cdot m^{-2} \quad (5-96)$$

kde  $\dot{q}_{k2,v}$  je měrný tepelný tok přirozenou konvekcí boční plochou vláknitého koberce.

#### 5.4.3 Tepelná ztráta předlisovaného koberce zářením

##### a) horní strana koberce

$$\dot{q}_{z1,v} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_v^4 - T_{\infty,v}^4) = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,82 \cdot (302^4 - 299^4) = 15,14 \frac{W}{m^2} \quad (5-97)$$

kde  $\dot{q}_{z1,v}$  je měrný tepelný tok zářením horní plochou vláknitého koberce.

##### b) boční strana koberce

$$\dot{q}_{z2,v} = \dot{q}_{z1,v} = 15,14 W \cdot m^{-2} \quad (5-98)$$

kde  $\dot{q}_{z2,v}(W)$  je měrný tepelný tok zářením boční plochou vláknitého koberce.

#### 5.4.4 Celková tepelná ztráta předlisovaného koberce

Je dána součtem měrného toku přirozenou konvekcí a zářením

##### a) horní strana koberce

$$\dot{q}_{e1,v} = \dot{q}_{k1,v} + \dot{q}_{z1,v} = 7,74 + 15,14 = 23,14 W \cdot m^{-2} \quad (5-99)$$

kde  $\dot{q}_{e1,v}$  je celkový měrný tepelný tok horní plochou vláknitého koberce.

## b) boční strana koberce

$$\dot{q}_{c2,v} = \dot{q}_{k2,v} + \dot{q}_{z2,v} = 6,72 + 15,14 = 21,86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5-100)$$

kde  $\dot{q}_{c2,v}$  je celkový měrný tepelný tok horní plochou vláknitého koberce.

Výpočtem tepelných ztrát bylo provedeno zhodnocení energetické bilance vybraných technologických úseků výrobního procesu. Porovnáním získaných hodnot s počítačovými simulacemi bude zhodnocena správnost výsledků. Výsledná tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku byla stanovena na **410W** a hlavního zásobovacího bunkru na **2,6 kW**. Tepelná ztráta kontinuálního vláknitého koberce je vztažena na plochu v m<sup>2</sup>, její hodnota je **23 W·m<sup>-2</sup>** pro horní stranu koberce a **22 W·m<sup>-2</sup>** pro boční stranu. Vypočtené hodnoty budou použity pro návrh vylepšení stávající situace.

## 6. Výpočet tepelných ztrát pomocí CFD simulací

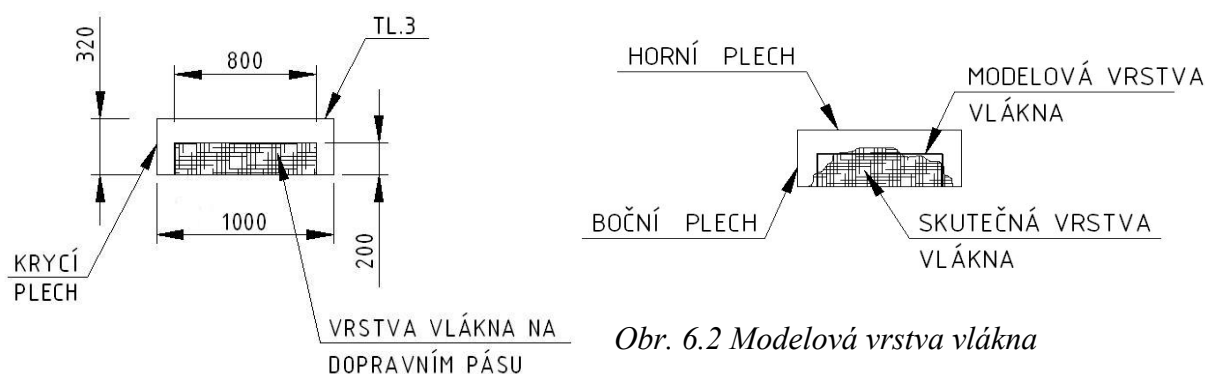
### 6.1 Tepelná ztráta šikmého pásového dopravníku v hale

#### 6.1.1 Charakteristika výpočtu

Výpočet je proveden v totožném smyslu a za stejných předpokladů, které jsou uvažovány ve výpočtu tepelných ztrát, aby bylo možné v závěru provést vzájemné zhodnocení dosažených výsledků. Obsahuje pouze část dopravníku nacházejícího se v hale. Jelikož se jedná o první úlohu z oblasti počítačového modelování, je úloha podrobněji popsána včetně zvolených metod a použitých řešičů. V dalších simulacích již budou hlavními prioritami dosažené výsledky, proto bude jejich popis omezen pouze na nezbytně nutné zdrojové informace, jako jsou například použité okrajové podmínky.

#### 6.1.2 Geometrie modelu ( rozměry v mm, bez měřítka )

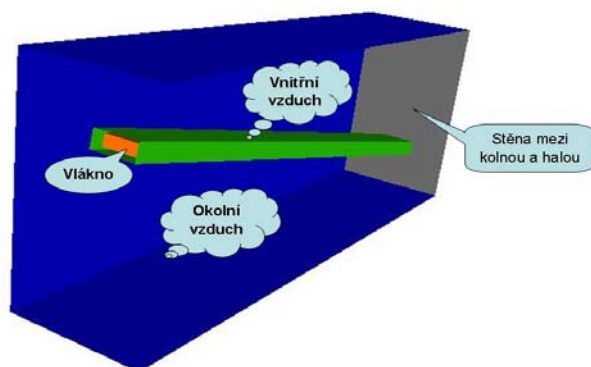
Vrstva vlákna na pásu má za provozu velmi nejednotvárný profil a její průměrná výška je stanovena na 200 mm. Pro výpočet se však vychází z ideálního modelového průřezu (viz obr.6.2). Skutečné rozměry dopravníku použité v simulaci jsou znázorněny na obr.6.1.



Obr. 6.1 Příčný řez modelem

Obr. 6.2 Modelová vrstva vlákna

#### 6.1.3 Výpočtový model a princip řešení



Obr. 6.3 Výpočtový model

Samotný výpočtový model se skládá ze 3 vzájemně propojených oblastí (tzv. „Regions“), ve kterých je použita „polyhedral“ výpočtová síť s lokálním zjemněním sítě uvnitř plechového zákrytu (viz obr. 6.3). Tato oblast je velice problematická z hlediska zaplnění výpočtovými buňkami. Mezera mezi vrstvou vlákna a plechovým zákrytem je vzhledem k velikosti okolního prostředí velice malá. Z důvodu modelování radičního toku mezi vrstvou

vlákna a zákrytem je zapotřebí diskretizovat tento prostor větším počtem výpočetních buněk o menší velikosti, Pokud by nebylo provedeno toto lokální zjemnění sítě, velikost buňky by svými rozměry mohla překročit celou oblast, což je nežádoucí. Radiační tok by nebyl správně nasimulován.

Model je tedy rozdělen na „Solid Region,“ charakterizující (vlákno) přepravované na pásu a dále pak na „Fluid Region,“ (vnitřní vzduch) představující vzduch uvnitř dopravníku a „Fluid Region,“ (okolní vzduch) představující vzduch ve výrobní hale. Pro každou z oblastí jsou zadány odlišné způsoby přenosu tepla.

Problematika výpočtu spočívá v přenosu tepla z vlákna směrem do chladnějšího okolního prostředí. Ve vrstvě vlákna se teplo šíří vedením podle Fourierova zákona. V první fázi je předpokládán radiační tok z navrstveného vlákna. Vyzařenou tepelnou energii pohlcuje okolní plechový zákryt. Přenos tepla konvekcí je v tomto případě zanedbatelný vzhledem k uzavřené vzduchové mezeře se předpokládá nevýrazné proudění vzduchu uvnitř kanálu. Rovněž vedení tepla z vrstvy vlákna směrem do zákrytu není uvažováno, neboť dotyková plocha je téměř nulová.

V druhé fázi dochází k ochlazení povrchu plechového zákrytu přirozenou konvekcí. Zde bude, kromě zjištění povrchových teplot, významným cílem určení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ).

Celý výpočet je řešen stacionárně, tj. beze změn veličin v závislosti na čase. Dále je omezen na řešení přenosu tepla pouze horní a bočními stranami zákrytu. Tepelný tok směrem dolů přes dopravní pás je zanedbán, neboť jeho určení by bylo obtížné. Ve výpočtu jsou použity stanovené provozní hodnoty.

#### 6.1.4 Model řešení ( Solver )

Simulace je řešena za pomoci k-ε modelu turbulence a DO (discrete ordinates) modelu radiace s provázaným přenosem tepla mezi všemi oblastmi. Výpočtový model je třídímenzionální, řešení je stacionární s předpokladem, že se jedná o ideální plyn nacházející se v gravitačním poli země.

#### 6.1.5 Okrajové podmínky ( Boundary Conditions )

Určují fyzikální vlastnosti okrajových částí jednotlivých oblastí (domény).

Teplota vlákna .....	$T = 303 \text{ K}$
Hustota vlákna .....	$\rho = 26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tepelná kapacita vlákna .....	$c = 1,67 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel tepelné vodivosti vlákna .....	$\lambda = 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Poměrná zářivost ( emisivita ) vlákna .....	$\varepsilon = 0,82$
Poměrná zářivost ( emisivita ) plechového zákrytu .....	$\varepsilon = 0,1$
Součinitel tepelné vodivosti plechového zákrytu .....	$\lambda = 45,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**Rozhraní** nebo také meziplocha (Interface) je nastaveno jako (Baffle), což je mezistěna bránící v pohybu tekutiny, což je v tomto případě odpor tvořený plechovým zákrytem

Tepelný odpor plechového zákrytu

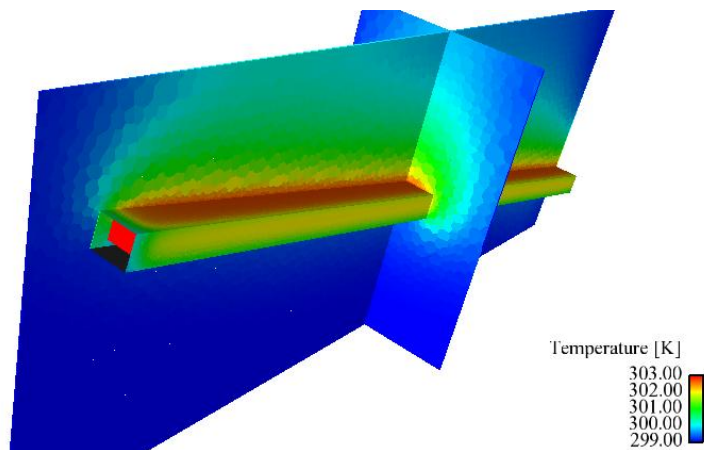
$$R = \sum \frac{d}{\lambda} = \frac{0,003}{45,4}$$

$$R = 6,61 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$$

Teplota vzduchu .....	T = 299 K
Hustota vzduchu .....	$\rho = 1,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Dynamická viskozita vzduchu .....	$\eta = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Tepelná kapacita vzduchu .....	$c_p = 1003,62 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost vzduchu .....	$\lambda = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Intenzita turbulence .....	2 %
Pressure outlet ( protitlak okolního prostředí ) .....	P = 0 Pa

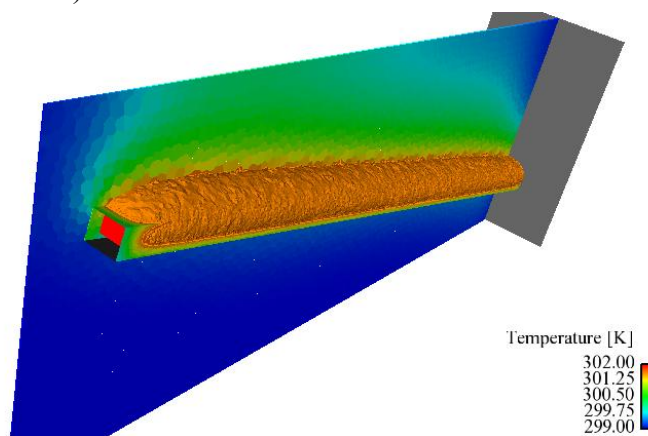
### 6.1.6 Teplotní kontury

Na obr. 6.4 je vykresleno teplotní pole konvektivního proudu vzduchu obtékajícího plechový zákryt šikmého pásového dopravníku v hale. Z obrázku vyplývá výraznější tepelná ztráta horní části plechového zákrytu, neboť má prokazatelně vyšší povrchovou teplotu než boční strany. U horní části zákrytu lze očekávat i vyšší hodnotu součinitele přestupu tepla. Okolní vzduch se od teplého plechu ohřívá a vlivem vztlakových sil proudí směrem vzhůru.



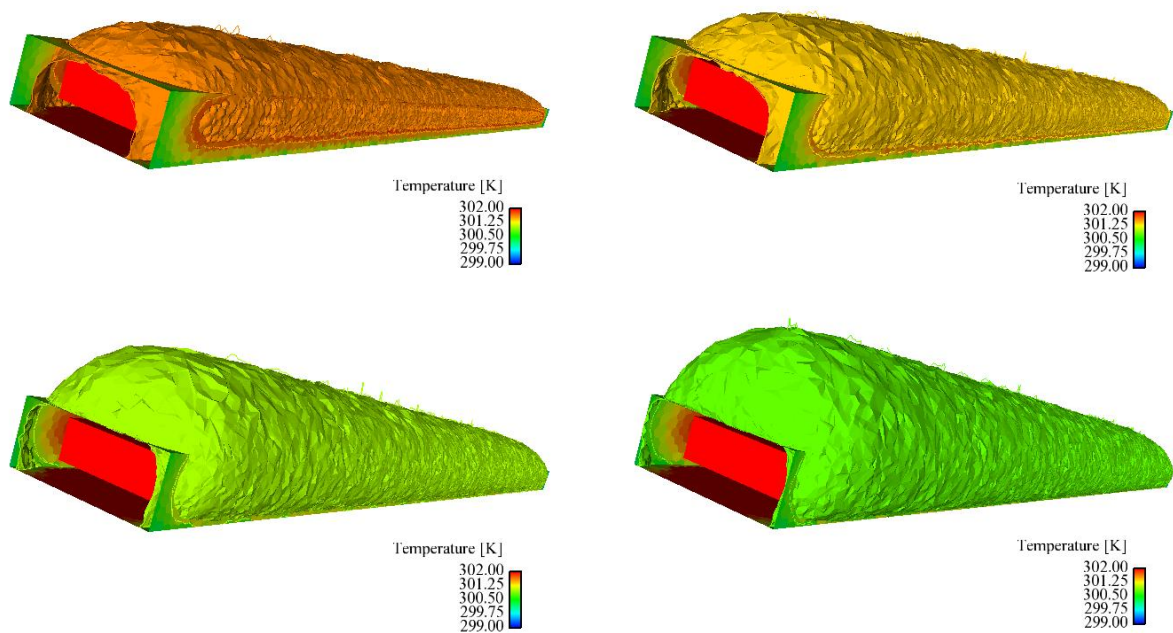
Obr. 6.4 Teplotní profil vzduchu v okolí zákrytu

### 6.1.7 Izoplochy (Isosurface)



Obr. 6.5 Tepelný tok zákrytem

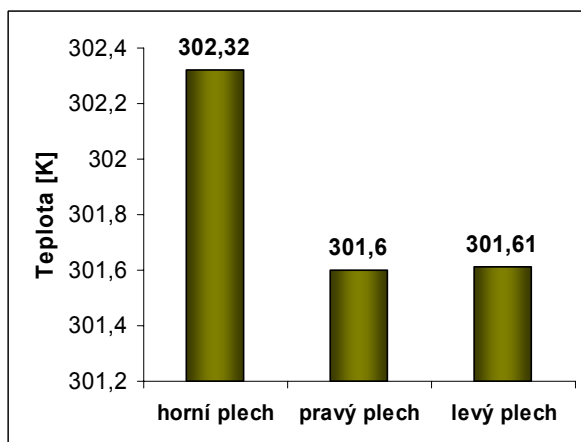
Izotermy jsou plochy, které spojují místa se stejnými teplotami. V případě izoplochy na obr. 6.5 si lze představit pomyslný prostorový řez tepelným tokem, který odchází do okolního prostředí v různých vzdálenostech od zákrytu. Uprostřed je patrná vrstva dřevěného vlákna ze které vychází tepelná energie horní a bočními stranami plechového zákrytu. Na obr. 6.6 lze pozorovat pokles intenzity tepelné energie se vzdáleností od zákrytu. V těsné blízkosti zákrytu je viditelná větší koncentrace tepelné energie, od které zahřívá okolní vzduch. Poměrně rychle se teplo vyprodukované vrstvou vlákna rozptýlí do okolí, což je zapříčiněno nízkým teplotním gradientem mezi teplotou zákrytu a okolím. Zároveň je patrný převažující tepelný tok horní částí zákrytu.



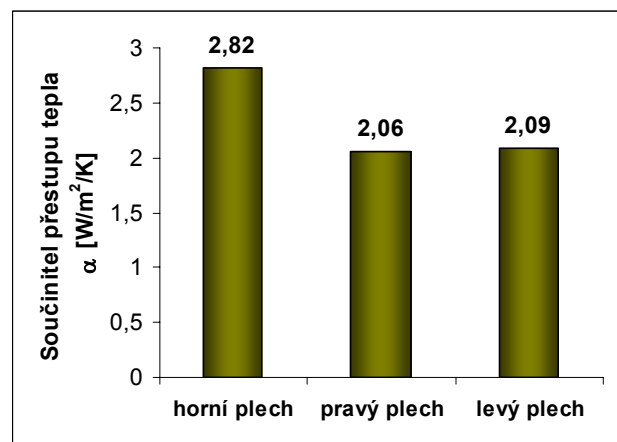
Obr. 6.6 Intenzita tepelného toku

### 6.1.8 Výsledné hodnoty

Grafické závislosti na obr. 6.7 a obr. 6.8 udávají výstupní průměrné hodnoty ze simulace vážené přes objemové toky (Mass-Flow Average) pro dané plochy.



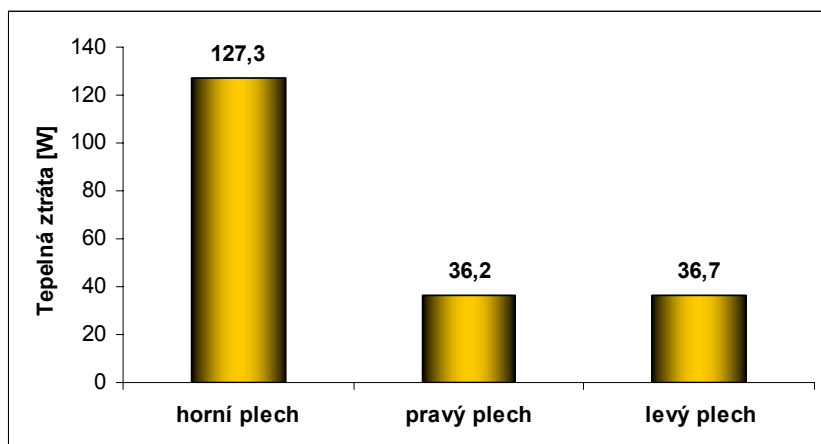
Obr. 6.7 Povrchové teploty plechového zákrytu  $T$  [K]



Obr. 6.8 Součinitel přestupu tepla  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]



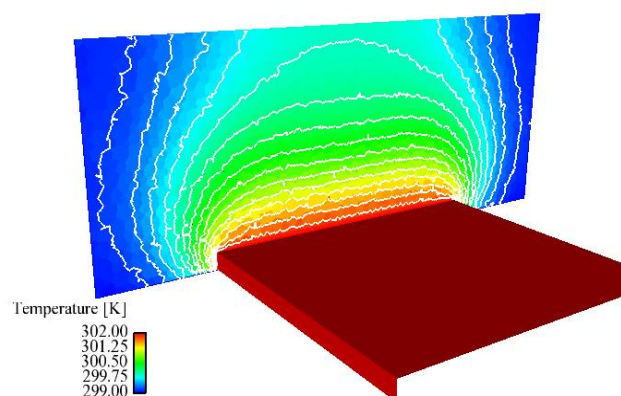
Z výsledných hodnot vyplývá, že největší ztráta je podle předpokladu horním plechem zákrytu. Tepelný tok přirozenou konvekcí je patrný na obr. 6.9. Zároveň poměrně nízké hodnoty tepelných ztrát vycházejí z malého teplotního rozdílu (plechový zákryt × okolní vzduch) a nízkých povrchových teplot dopravníku.



Obr. 6.9 Tepelná ztráta do okolí přirozenou konvekcí  $Q_k$

## 6.2 Tepelný tok do okolí z předlisovaného koberce

Simulace je provedena za stejných předpokladů jaké jsou uvažovány ve výpočtu tepelných ztrát předlisovaného koberce. Výpočtový model je nastaven pro řešení přirozené konvekce. Řešení je stacionární, neboť je pozorován ustálený tepelný tok do okolí. Na obr. 6.7 je znázorněno teplotní pole v okolí vláknitého koberce. Viditelné jsou jednotlivé izotermy spojující místa s konstantní teplotou. Tepelný tok směřující do posuvného pásu není v simulaci uvažován. Vláknitý koberec je v této fázi výroby zformátován na konstantní šířku 2800 mm. Výška vrstvy vlákna v koberci je namodelována na střední hodnotu (160 mm) z předepsaného výrobního rozmezí 80-240 mm. Teplota vlákna (29 °C) a okolního vzduchu (26 °C) vycházejí z naměřených hodnot v zimním období. Na obr. 6.11 je znázorněn pohled do výrobní haly na úsek výrobní linky za kontinuálním předlisem, kde se souvislý koberec příčně rozděluje na požadované rozměry dle vyráběných desek. Následuje posun na zrychlovací pás, který jednotlivé vláknité rohože překládá do zavážecího koše před lisem.



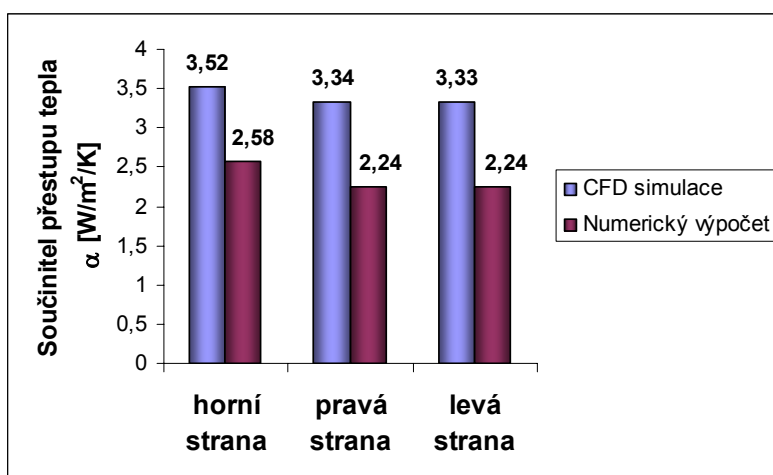
Obr. 6.10 Kontury teploty vzduchu v okolí předlisovaného koberce



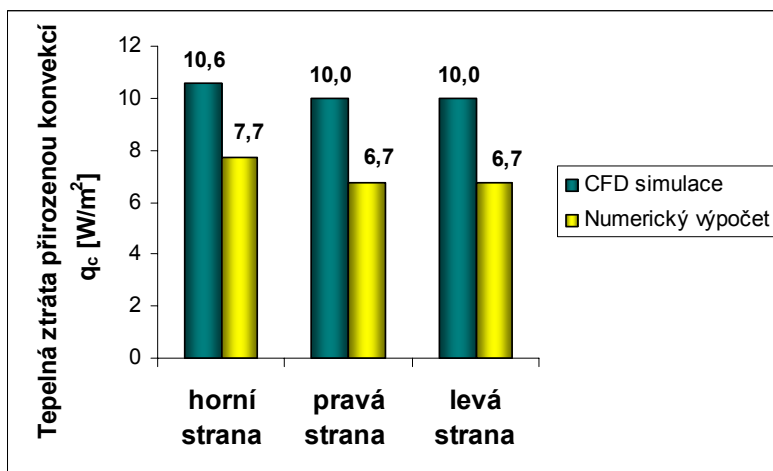
Obr. 6.11 Předlisovaný koberec na výrobní lince

Potřebnou hodnotou získanou ze simulace je součinitel přestupu tepla  $\alpha$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) pro jednotlivé části koberce, kterými jsou horní strana a totožné boční strany. Dle obr. 6.11 je zřejmé, že rozdíl mezi součiniteli přestupu tepla pro jednotlivé strany není příliš výrazný. Z toho vyplývá, že ani ztráta přirozenou konvekcí (viz obr.6.12) se nebude nijak zásadně lišit. Vzhledem k tomu, že je při modelování této problematiky uvažováno s nekonečným souvislým dřevovláknitým kobercem, jsou výsledné hodnoty pro přirozenou konvekcii stanoveny ve  $W \cdot m^{-2}$ .

Viditelný rozdíl patrný u obou hodnot vzniká při srovnání numerického výpočtu s CFD simulací. Nižší hodnoty získané z výpočtu mohou být způsobeny např. nevhodně zvoleným vtahem pro určení Rayleighova čísla, které lze zvolit podle různých kritérií. Další možností může být chyba na straně počítačového modelování, např. v podobě nevhodně definovaného výpočetního modelu, špatných inicializačních hodnotách, příliš hrubé výpočetní sítě apod. Důležité je však stanovení, za jakých podmínek lze rozdíly v získaných hodnotách akceptovat. V případě, že se jedná o tepelné toky energie, není vyžadována tak vysoká přesnost, proto je možné se s výslednými rozdíly spokojit.



Obr. 6.11 Součinitel přestupu tepla  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

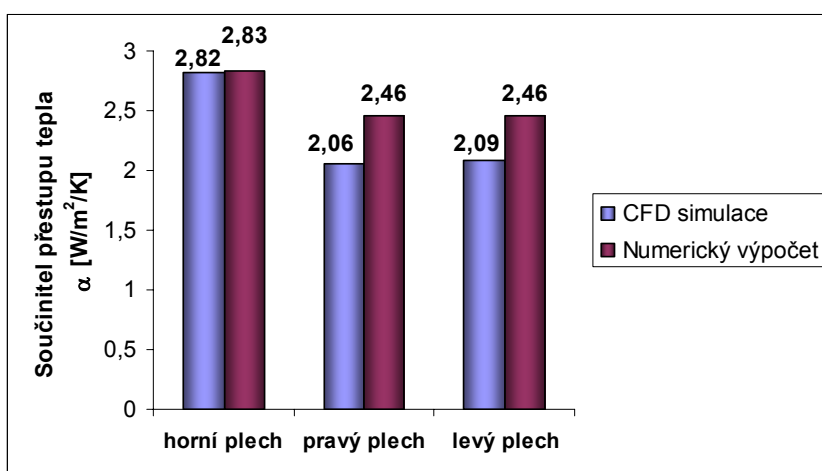


Obr. 6.12 Jmenovitá tepelná ztráta přirozenou konvekcí  $q_c$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]

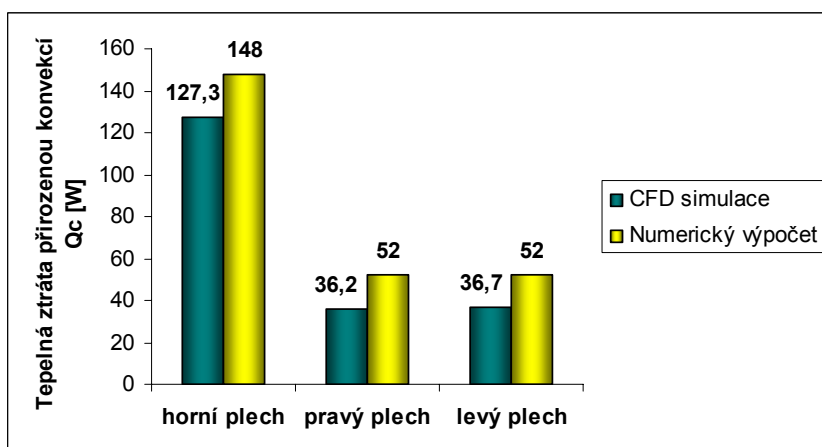
### 6.3 Porovnání výpočtu tepelných ztrát šikmého pásového dopravníku v hale s CFD simulací

Zhodnocení dosažených výsledků je zaměřeno na tepelnou ztrátu šikmého pásového dopravníku nacházejícího se v hale. Oproti předchozímu případu, jsou rozdíly mezi jednotlivými hodnotami výrazně menší, což lze považovat za úspěch. Zvláště u horního části plechového zákrytu bylo docíleno téměř totožné hodnoty součinitele přestupu tepla (viz obr.6.13).

Výsledné porovnání tepelných toků jednotlivými částmi zákrytu (viz obr.6.14) potvrzuje fakt patrný z teplotních kontur na obr. 6.6, že největší tepelná ztráta do okolí je horní částí.



Obr. 6.13 Porovnání součinitele přestupu tepla  $\alpha$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]



Obr. 6.14 Porovnání tepelná ztráta do okolí přirozenou konvekcí  $Q_k$

Rozdíl hodnot součinitele přestupu tepla  $\alpha$  mezi CFD simulací a numerickým výpočtem se pohybuje v přijatelném rozmezí 0,4-16% a celkové tepelné ztráty od 14-30%.

## 6.4 Zhodnocení výsledků dosažených výpočtem tepelných ztrát

Byl proveden výpočet tepelných ztrát rozdílných technologických úseků výrobní linky mezi procesy sušení a lisování. Vzhledem k umístění a charakteru jednotlivých strojních zařízení nelze provést jejich objektivní porovnání. Ze získaných hodnot však lze určit míru vlivu daného výrobního cyklu na celkové energetické ztráty a zhodnotit možnosti snížení těchto ztrát.

V případě hlavního zásobovacího bunkru byla vypočtena celková tepelná ztráta v hodnotě **2,6 kW**. Ikdyž je zde použita tepelná izolace, dochází k poměrně k vysokým energetickým ztrátám. Hlavním důvodem je umístění bunkru ve venkovním prostředí, kde je zejména v zimním období vystavován nízkým teplotám okolního vzduchu. Jedná se o jedinou část řešeného výrobního cyklu, která se nachází venku. Možným řešením je zde použití lepšího izolačního materiálu za současné instalace trubkového topného systému pro vytápění obvodového pláště. Možné zvýšení teploty vlákna je však v tomto případě nereálné z více důvodů. Jedním z nich je velice náročné určení tepelného toku vláknem uvnitř zásobníku. Z důvodu nezjistitelné obměny vlákna, které je prohrabováno rozhrnovacím dopravníkem, nelze určit množství dodané tepelné energie pro ohřev.

Dalším úsekem je šikmý pásový dopravník navazující na hlavní zásobovací bunkr. Je zároveň prvním úsekem linky nacházející se ve vnitřním prostředí. Jeho tepelná ztráta je díky malým teplotním rozdílům velice nízká (**410 W**). Navíc je ve své spodní části procházející kolnou zaizolován. Vrstva vlákna putující na pásovém dopravníku má průměrnou výšku 200 mm, která se příliš nemění. Spolu s dostatečnou délkou dopravního pásu nabízí vhodné předpoklady nejen pro zamezení tepelných ztrát, ale navíc i k teplotnímu ovlivnění této vrstvy. Další výhodou tohoto úseku je fakt, že se jedná o poslední technologickou operaci, při níž je s vláknem manipulováno v nezhuťném stavu. V dalším procesu je již vlákno podrobena vrstvení do kompaktního koberece ve vrstvicí stanici. Dopravník se nahází v samotné výrobní hale, ve které už celkově nedochází k tak vysokým energetickým ztrátám z důvodu vysoké teploty vnitřního vzduchu. Teplota vlákna výrazně neklesá. Poloha šikmého pásového dopravníku, je též vyhovující, od lisovacího procesu už dopravník dělí pouze vrstvicí stanice a kontinuální předdlis. Jedná se tedy bezpochyby o nejvýhodnější pozici ve výrobním procesu, kde lze do tepelné bilance vlákna zasáhnout. Omezujícím faktorem je v tomto případě rychlost posuvu dopravního pásu, který zkracuje dobu setrvání vlákna na dopravníku.

Posledním vyhodnocovaným úsekem byl vláknitý koberec za kontinuálním předdlisem. Jeho tepelná ztráta byla stanovena na **23 W·m<sup>-2</sup>** pro horní stranu a **22 W·m<sup>-2</sup>** pro boční stranu z důvodu souvislého vláknitého pásu. V tomto úseku lze vlákno teplotně ovlivnit už velmi obtížně. Vláknitý koberec se nachází v ucelené předdlisovaném stavu a při současné rychlosti výrobní linky nelze jeho teplotu už zvýšit. Jedinou známou možností je v tomto případě použití parní injektáže, která pracuje na principu rovnoměrného prohřátí vlákna vodní parou. Koberec je podélně rozříznut na dvě souměrné části, do kterých je tryskami vhněny sytá pára, které vlákno nejen prohřeje, ale i částečně navlhčí. Tento systém však nelze z kapacitních důvodů za současné situace použít, neboť se s ním při návrhu linky nepočítalo.

Z provedeného zhodnocení lze usoudit, že nejvýhodnějším technologickým úsekem pro řešení problematiky stabilizace teploty vlákna se jeví šikmý pásový dopravník. Nabízí dobré konstrukční předpoklady pro návrh ohřevu vlákna. V následující kapitole je proveden rozbor vlivu radiačního toku na vrstvu vlákna.

## 7. Vliv radiace na teplotní profil ve vrstvě vlákna

V této části práce je řešen vliv tepelného záření na ohřev vrstvy vlákna na šikmém pásovém dopravníku. Za pomoci CFD simulace přenosu tepla radiací jsou pozorovány změny v teplotním profilu ve vrstvě vlákna v určitých časových intervalech. Je tedy zřejmé, že se bude jednat o nestacionární výpočet. Proměnnou okrajovou podmínkou zde bude teplota okolního plechového zákrytu. Zatím není řešen způsob jakým se docílí dané povrchové teploty zákrytu, ale pouze jeho vliv na vrstvu vlákna z hlediska vyzářené energie.

Prvním časovým krokem bude skutečná doba, kterou stráví na šikmém pásovém dopravníku pomyslná elementární částice při dopravě z počátečního bodu do koncového, tj. z nástupního místa v kolně až do okamžiku, kdy částice dopravník opouští v hale. Z jednoduchého vztahu pro výpočet rovnoměrné přímočaré rychlosti hmotného bodu si tento skutečný provozní čas odvodíme.

Zadáno:  $l = 22,5$  [m] .....celková délka šikmého pásového dopravníku  
 $v = 0,64$  [m·s<sup>-1</sup>].....rychlost posuvu dopravního pásu

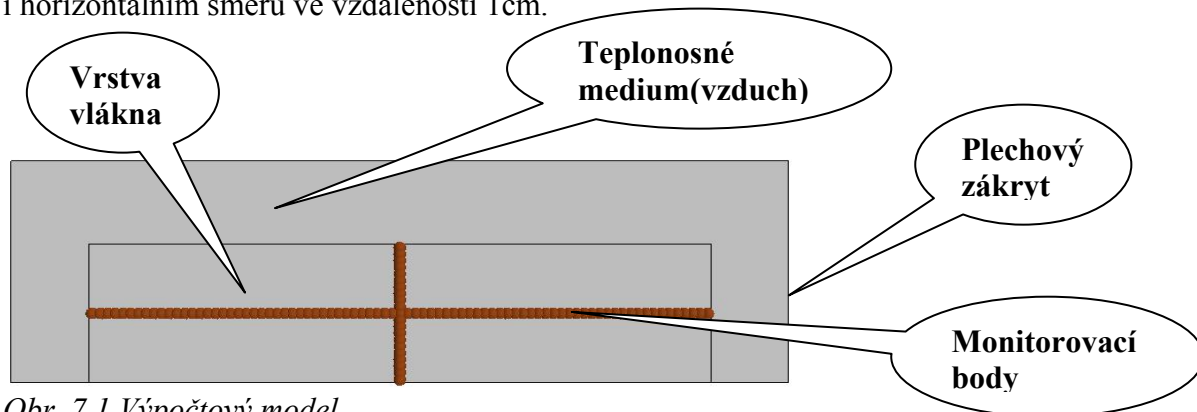
$$v = \frac{l}{t} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{l}{v} = \frac{22,5}{0,64} = 35,2 \approx 35 \text{ s} \quad (7-1)$$

Tento základní časový interval je ve výpočtu dále prodloužen až na dobu 2 minut pro získání představy o teplotním profilu ve vrstvě vlákna i v relativně dlouhodobějším časovém horizontu.

Výpočet je proveden pro tloušťku vrstvy vlákna 200 mm, což odpovídá její průměrné hodnotě. Z hlediska teplotního vlivu na vrstvu v celé její tloušťce se jedná o nejpříznivější variantu. Již před samotným výpočtem lze usuzovat, že za současného stavu zřejmě nedojde k prohřátí celé vrstvy vlákna vzhledem k její velmi nízké tepelné vodivosti. Ze získaných výsledků se budou odvíjet další opatření.

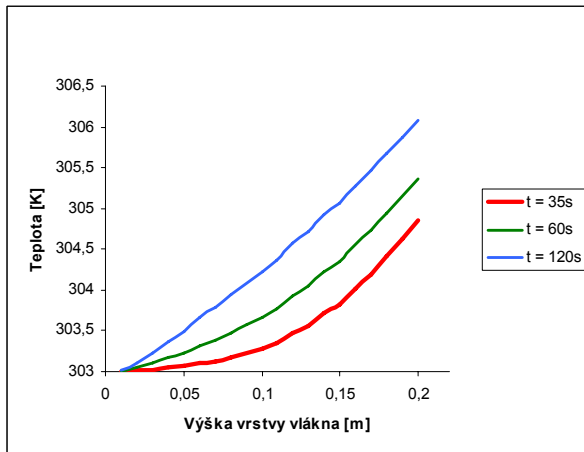
### Výpočtový model

Počítačové modelování je provedeno pro 2D model (viz obr. 7.1) s využitím radiačního výpočtového modelu. Samotný model se skládá z vrstvy vlákna, který zakrývá plechový zákryt. Výchozí teplota je nastavena na hodnotu 303 K. Délka výpočtu je vyhodnocována pro tři časové intervaly, výchozím krokem je provozní čas 35 s, dále pak časové úseky 60 s a 120 s. Pro snímání teploty jsou ve vrstvě vlákna umístěny monitorovací body ve vertikálním i horizontálním směru ve vzdálenosti 1cm.

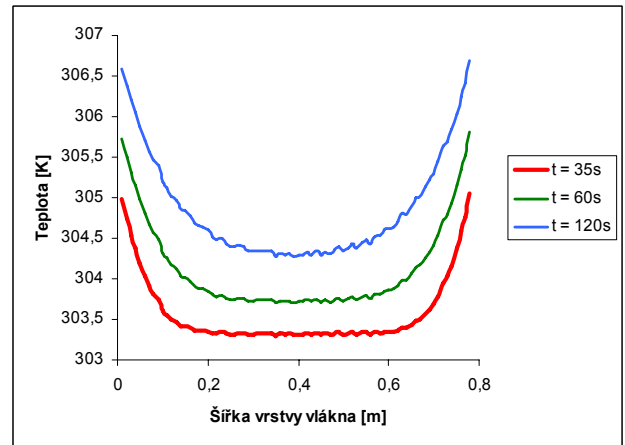


Obr. 7.1 Výpočtový model

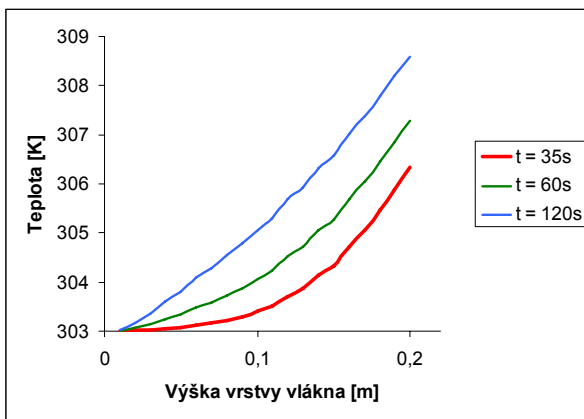
## 7.1. Průběh teploty ve vrstvě vlákna



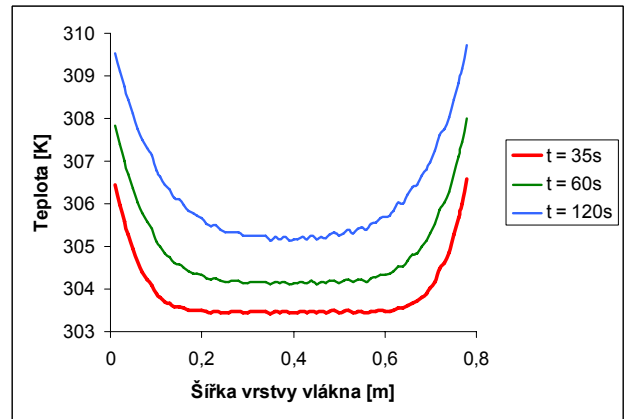
Obr. 7.1 Vertikální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 90\text{ °C}$



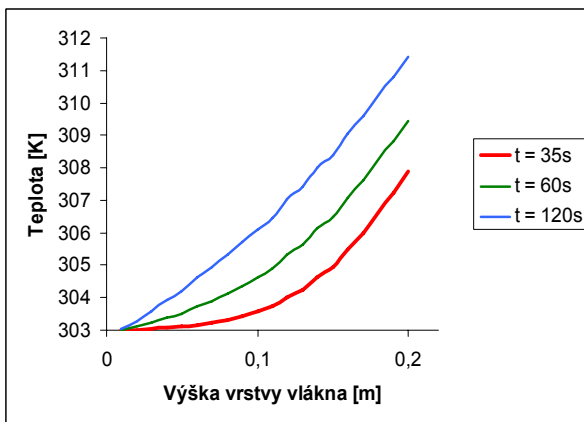
Obr. 7.2 Horizontální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 90\text{ °C}$



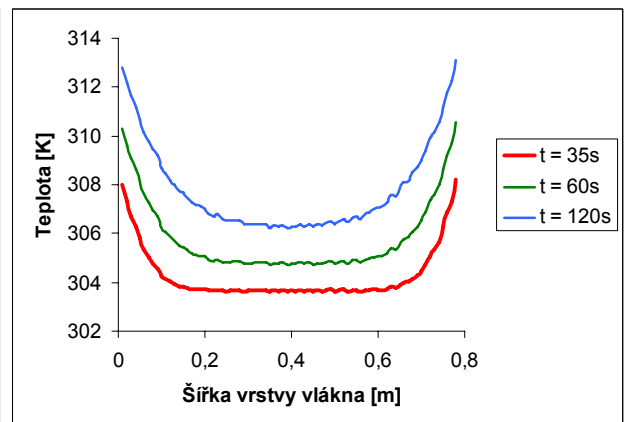
Obr. 7.3 Vertikální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 120\text{ °C}$



Obr. 7.4 Horizontální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 120\text{ °C}$

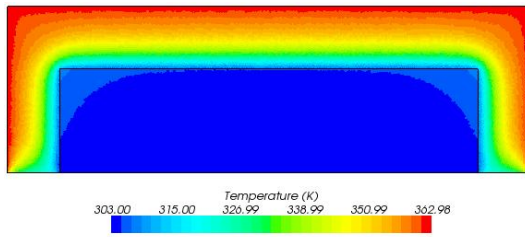


Obr. 7.5 Vertikální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 150\text{ °C}$

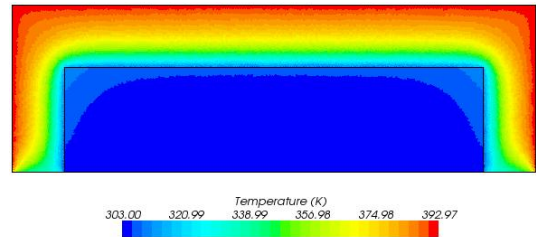


Obr. 7.6 Horizontální řez teplotním profilem při teplotě zákrytu  $T = 150\text{ °C}$

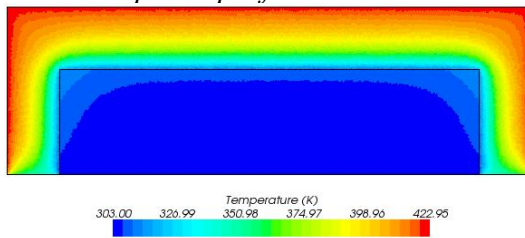
## Kontury teploty ve vrstvě vlákna



Obr. 7.7 Teplotní profil v čase 35 s

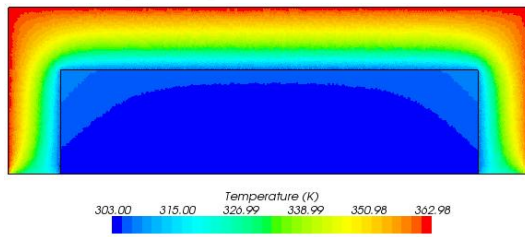


Obr. 7.8 Teplotní profil v čase 60 s

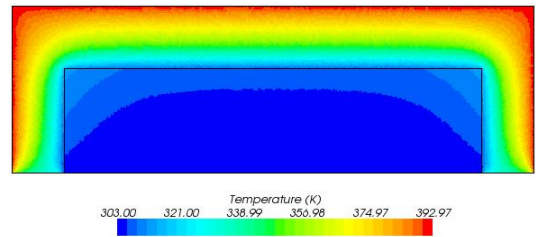


Obr. 7.9 Teplotní profil v čase 120 s

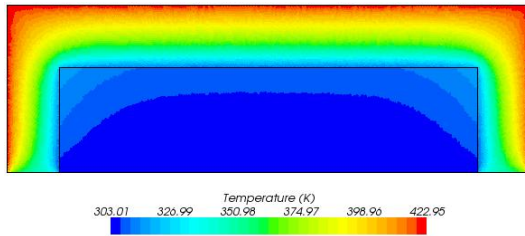
## Při teplotě zákrytu 90°C



Obr. 7.10 Teplotní profil v čase 60 s

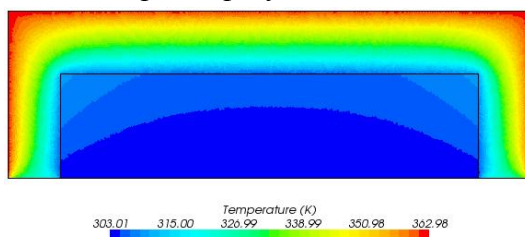


Obr. 7.11 Teplotní profil v čase 60 s

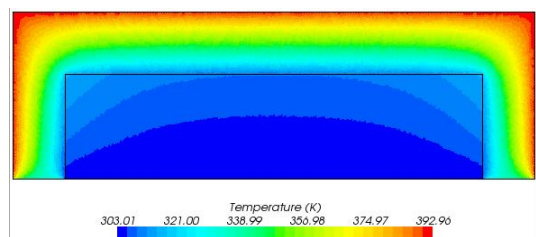


Obr. 7.12 Teplotní profil v čase 120 s

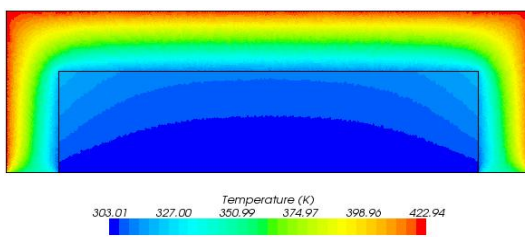
## Při teplotě zákrytu 120°C



Obr. 7.13 Teplotní profil v čase 35 s



Obr. 7.14 Teplotní profil v čase 60 s

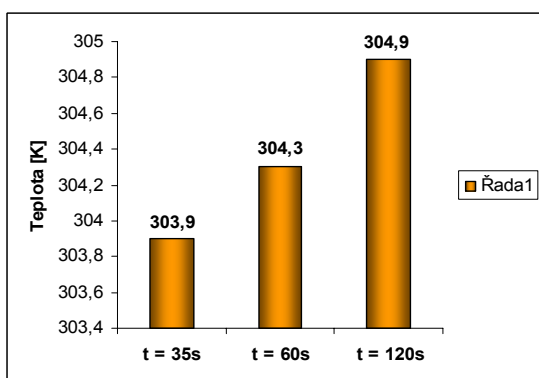


Obr. 7.15 Teplotní profil v čase 120 s

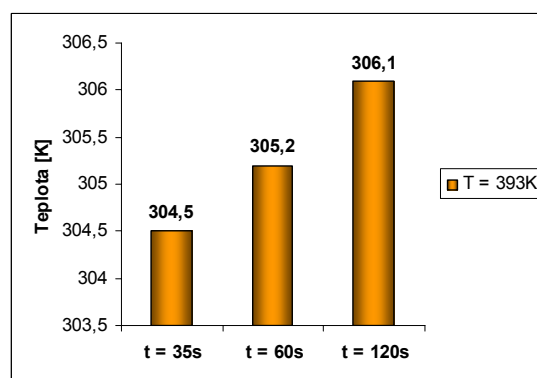
## Při teplotě zákrytu 150°C

Výsledkem průzkumu radiačního vlivu na teplotu vlákna jsou grafické závislosti (viz obr.7.1-7.6) teploty na vzdálenosti ve vrstvě v horizontálním i vertikálním směru. Teplota plechového zákrytu byla uvažována 90 °C, 120 °C a 150 °C, při kterých jsou vyhodnocovány teplotní profily v časových intervalech 35 s, 60 s a 120 s. Při nižších teplotách se nepotvrdil výrazný tepelný růst ve vrstvě vlákna. Se zvyšující se teplotou radiačního plechu se posouvá horizontální průběh teploty k vyšším hodnotám. Vlivem nízkého součinitele tepelné vodivosti se vrstva vlákna velmi obtížně prohřívá. Je nemožné dosáhnout rovnoměrného prohřátí celé vrstvy. U horizontálních řezů je patný nerovnoměrný poměr prohřátí vrchních a středových vrstev. Povrchové vrstvy se ohřívají na výrazně vyšší teplotu a velmi obtížně předávají získanou energii dále do středu vrstvy. V případě dlouhodobého ohřevu by mohla teplota povrchu vrstvy vlákna vzrůst až ke kritickým hodnotám. V případě vertikálních řezů se potvrzuje zjištění, že se střed vrstvy téměř teplotně neovlivní. Zejména v dotykové ploše vrstvy vlákna s dopravním pásem je teplota vlákna i při teplotě radiačního plechu 150 °C stále konstantní.

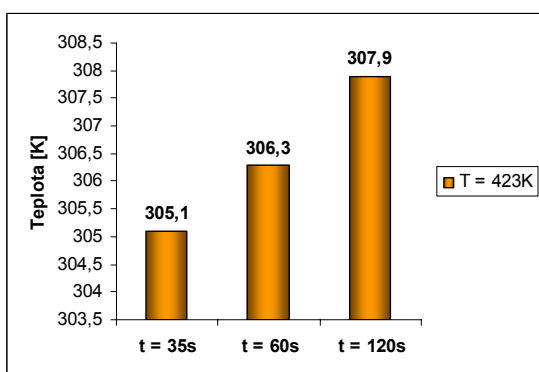
Kontury teploty ve vrstvě vlákna (viz obr.7.7-7.15) potvrzují zjištěné grafické závislosti v jednotlivých časových krocích. Výrazně se prohřívají pouze okrajové části a teplotní gradienty jsou velmi výrazné. I při nejvyšší teplotě plechového zákrytu zůstává střed vrstvy vlákna teplotně neovlivněn. Významnou hodnotou je střední teplota vrstvy vlákna získaná plošnou integrací dané oblasti. Její hodnoty jsou znázorněny na obr. 7.16-7.17.



Obr. 7.16 Střední teplota ve vrstvě vlákna při teplotě zákrytu 90 °C



Obr. 7.17 Střední teplota ve vrstvě vlákna při teplotě zákrytu 120 °C



Obr. 7.17 Střední teplota ve vrstvě vlákna při teplotě zákrytu 150 °C

Bylo dokázáno, že samotným radiačním mechanismem nelze vlákno na požadovanou hodnotu ohřát. I při teplotě zákrytu 150 °C se za běžného provozního stavu zvýší střední teplota ve vrstvě pouze o 2 °C. Je potřeba zvážit přídatný zdroj tepelné energie.



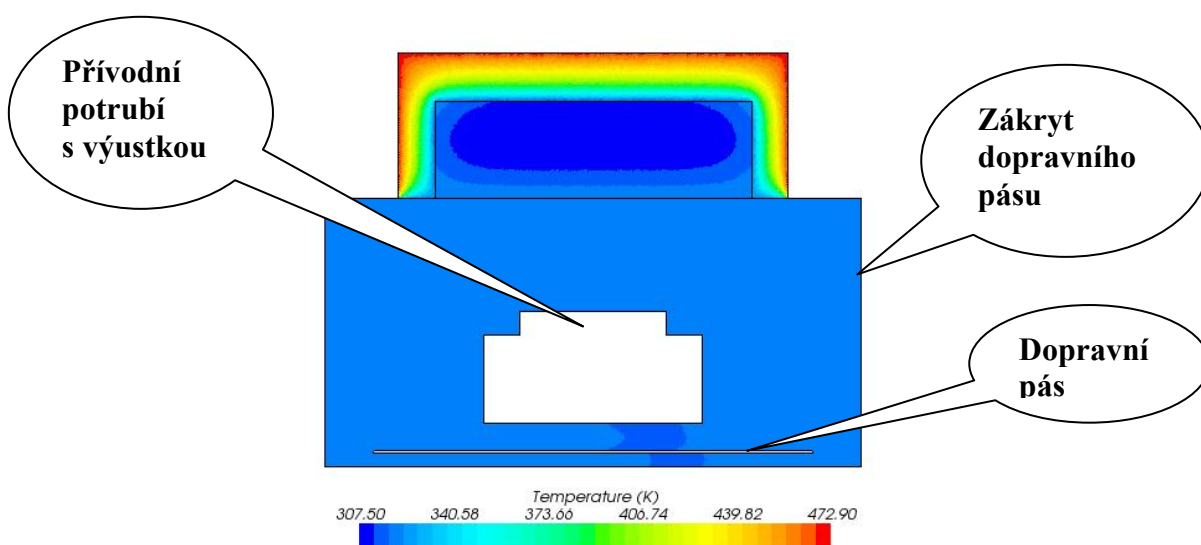
## 8. Optimalizace zařízení pro ohřev vlákna

Při průzkumu vlivu radiace na ohřev vrstvy vlákna se potvrdil očekávaný pozitivní účinek. Teplotní profil ve vrstvě vlákna byl ovlivněn v závislosti na narůstajícím čase. Vzhledem k poměrně nízké tepelné vodivosti dřevěného vlákna se téměř nepodařilo teplotně ovlivnit střed této vrstvy, pouze její okrajové části. Z malé tepelné vodivosti vlákna jsou také patrné výrazné teplotní gradienty napříč jednotlivými vrstvami. Z výsledků tedy vyplývá, že za současného provozního stavu nelze vrstvu vlákna ohřát pouze radičním způsobem.

Jako další varianta se nabízí konvekční způsob ohřevu. Ovšem v tomto případě nelze zaručit nežádoucí víření dřevního prachu, popřípadě narušení celé vrstvy. Vlákno by se mohlo dostat i při nízkých rychlostech proudění velmi lehce do vznosu. Tento jev bohužel není realizovatelný v používané CFD simulaci, proto je tato možnost vyloučena.

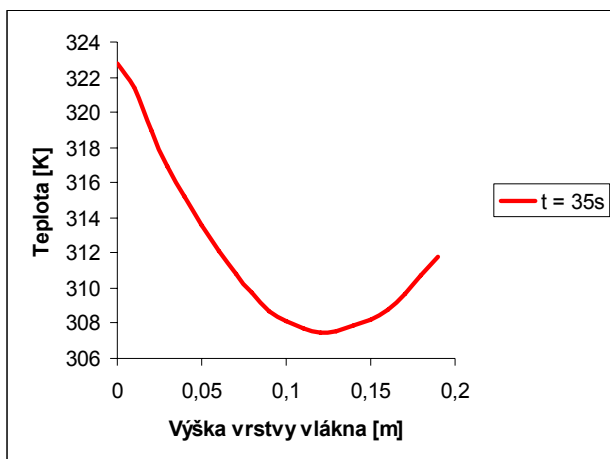
Žádoucí účinek na prohřátí chladnějších spodních vrstev by mohl mít tepelný tok přes dopravní pás. V tomto případě již lze pomýšlet na přenos tepla konvekcí. Následující postup je zaměřen ohřev dopravního pásu proudem teplého vzduchu, jehož tepelná energie by měla pomoci prohřát spodní část vrstvy vlákna.

Výpočet je řešen nestacionárně s použitím 2D modelu. Kromě radičního výpočetního modelu pro řešení tepelného toku z plechového zákrytu do vrstvy vlákna, je použit také k-ε model turbulence pro charakteristiku proudění ideálního plynu. Vzduch je přiváděn do prostoru pod dopravním pásem, který ohraničuje zákryt dopravního pásu. Průřez vzduchotechnického potrubí je zvolen náhodně, dotváří pouze celkovou představu návrhu, neboť řešení vzduchotechnického potrubí není náplní práce. Distribučním prvkem vzduchu čtyřhranná výustka, jejíž šířka je 325 mm. Simulací byl zoptimalizována přívodní rychlost a teplota vzduchu. Za současného provozního času (35 s), bylo zjištěno, že postačujícími parametry vzduchu pro ohřev vlákna na střední požadovanou teplotu (35-40 °C) postačí rychlost přívodního vzduchu  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  o teplotě 50 °C, ovšem za současného působení radičního účinku plechového zákrytu vrstvy vlákna. Teplota zákrytu byla zvolena jako nejvyšší přípustná hodnota 200 °C. Vyšší hodnotu nebylo s ohledem na teplotu vzplanutí usazeného dřevěného prachu možno volit. Na obr.8.1 je znázorněn teplotní profil šikmého pásového dopravníku.

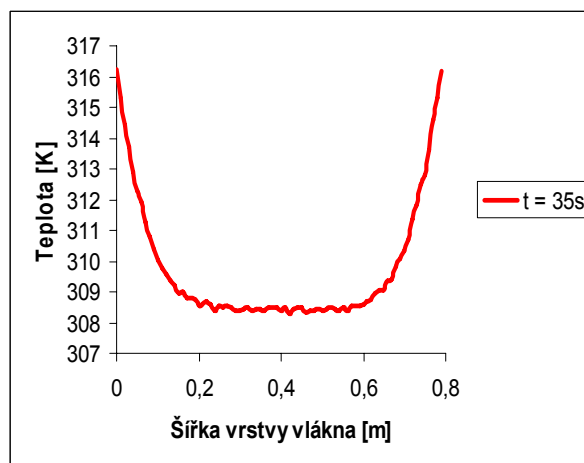


Obr.8.1 Teplotní profil dopravníku

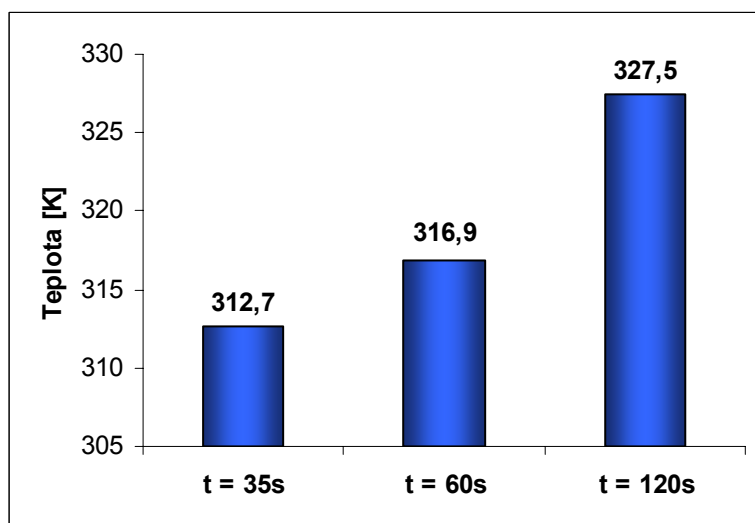
Výsledný teplotní profil ve vrstvě vlákna vyplývá z vertikálního ( viz obr. 8.2) a horizontálního (viz obr. 8.3) teplotního profilu. Bylo docíleno posunutí teplotního profilu k vyšším hodnotám. Nepodařilo se však zrovnoměrnit teplotní gradient ve vrstvách vlákna. I přes doplnění radiačního toku přívodem tepla přes dopravní pás zůstávají vyšší teploty na okrajích vrstvy, jak je patrné i z obr. 8.1. Výsledná střední teplota vrstvy vlákna je podle grafu na obr. 8.4 rovna hodnotě 312,7 K. Při delším ohřevu se střední teplota dále zvyšuje.



Obr. 8.2 Vertikální řez teplotním profilem



Obr. 8.3 Horizontální řez teplotním profilem



Obr. 8.4 Střední teplota vrstvy vlákna v průběhu ohřevu

## 8.1 Konstrukční požadavky pro realizaci ohřevu vlákna

Pro dosažení ohřevu vlákna je nezbytné provést obměnu dopravního pásu. Stávající gumotextilní dopravní pás se vyznačuje nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ), tudíž není schopen bezprostředního přenosu tepelného toku z konvekčního proudu do vrstvy vlákna. Jeho tepelná setrvačnost je pro dané účely příliš vysoká. V simulaci je uvažováno s materiálovými vlastnosti dopravního pásu vyrobeného z ocelových destiček firmy Euro SITEX. Typ 1500.

## Popis provedení dopravního pásu

Pás je vyroben z různě širokých a dlouhých kovových destiček skrz jejichž okraje jsou provlečeny příčné tyčky (viz obr. 8.5). Konce těchto příčných tyček jsou vždy zakončeny válečkovým řetězem. Mezi koncem destiček a řetězem mohou být ještě bočnice. Destičky pásu mohou být vyrobeny jako plné, děrované, nebo s drobnými bublinami na povrchu z důvodu nepřichytávání se materiálu na pás. [10]

## Vlastnosti dopravního pásu

- přímý chod pásu
- záběr pásu bez prokluzu
- snadno lze upravit tak, aby mohl dopravovat materiál i do stoupání
- vysoká pevnost a životnost pásu

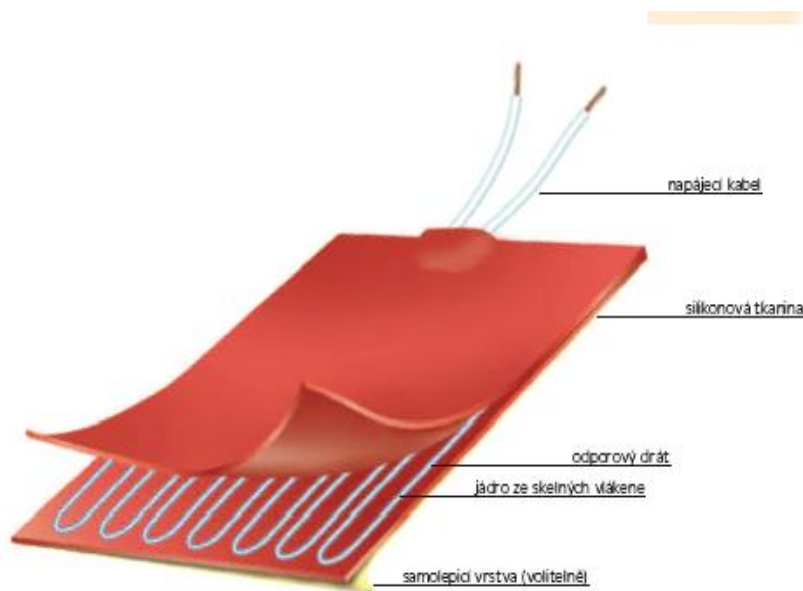


Obr. 8.5 Dopravní pás [10]

## Technické parametry

- standardní materiál – lesklá ocel, nerez
- pracovní teplota – do 350°C

Pro účely ohřevu plechového zákrytu je použita topná silikonová tkanina FLEXMAT firmy Revos (viz obr. 8.6). Topný element je tvořen odporovým drátem Ni-Cr nebo Cu-Ni ovinutý na skelném kordu. Tento topný prvek je vložen mezi dvě silikonem impregnované skelné tkaniny. Výsledkem je robustní a ohebná topná tkanina. Vyrábí se na objednávku, rozměry a ostatní parametry tkaniny se navrhuje dle požadavků zákazníka. Topná tkanina může být vybavena termostatem, teplotním omezovačem a dalšími regulačními prvky. [11]



Obr. 8.6 Silikonová topná tkanina [11]

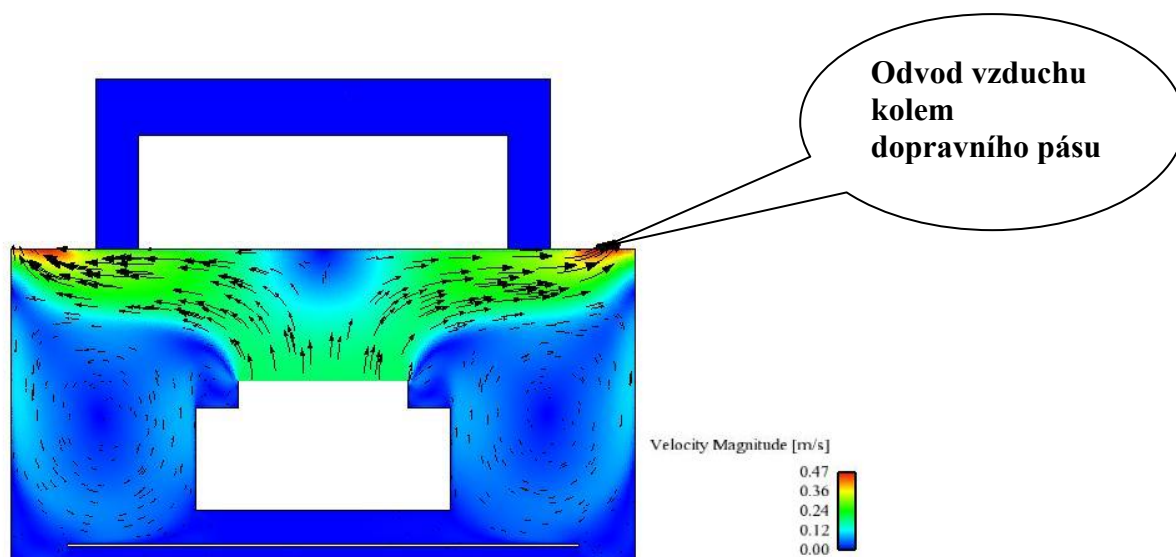
Technické parametry silikonové topné tkaniny jsou uvedeny v tab. 8.1

Tab. 8.1 Technické parametry [11]

	Silikonová topná fólie
Výkon	do 5 kW/m <sup>2</sup>
Tolerance výkonu	±10%
Napájecí napětí	libovolné
Dielektrická pevnost	2000 V
Rozměry a tvar	na přání
Maximální délka	3 m
Maximální šířka	1 m
Tloušťka tkaniny	3,0 mm (± 0,5 mm), silnější v místě připojovacího bodu
Max. teplota povrchu tkaniny	250°C
Max. teplota ohřívané části	200°C
Min. teplota okolí	-60°C
Případný termostat	10 až 150°C, 250 V, 6 A
Případný omezovač teploty	60°C, 80°C, 100°C nebo 150°C, 250 V, 6 A

## 8.2 Optimalizace proudění vzduchu v zákrytu pásového dopravníku

Při zkoumání rychlostního pole v zákrytu dopravníku bylo zjištěno, že dochází k neefektivnímu využití přiváděného teplého vzduchu. Velké množství odchází, po bezprostředním kontaktu s horní částí pásu předávající tepelnou energii do vlákna, otvorem mezi pásem a zákrytem. Výhodnější by bylo směřování proudu více do prostoru kolem spodní části dopravního pásu. Energie dopravovaná vzduchem by se tak lépe využila pro stabilizaci teploty celého pásu. Na obr. 8.7 jsou znázorněny vektory rychlosti proudu vzduchu.



Obr. 8.7 Rychlostní profil dopravníku

Z důvodu optimalizace proudění je nezbytné stávající výfukové otvory zaslepit a nahradit je novými. Je zapotřebí vycházet z předpokladu, že množství vzduchu, které do zákrytu přitéká, musí být zároveň také odvedeno. Pro určení rozměrů distribučních prvků (jednořadé

výustky) se vychází z potřebného množství vzduchu pro ohřev vrstvy vlákna. V simulaci byla stanovena šířka výustky na 325 mm a vstupní rychlost  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V případě, že jsou tyto parametry stanoveny pro elementární řez dopravníkem, je celková potřeba přiváděného vzduchu stanovena podle následujícího vztahu

$$\dot{V} = s \cdot l \cdot w = 0,305 \cdot 22,5 \cdot 0,2 = 1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (8-1)$$

kde  $s(\text{m}^2)$  je průtoková šířka výustky,  $l (\text{m})$  je délka dopravníku a  $w (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  je přívodní rychlost

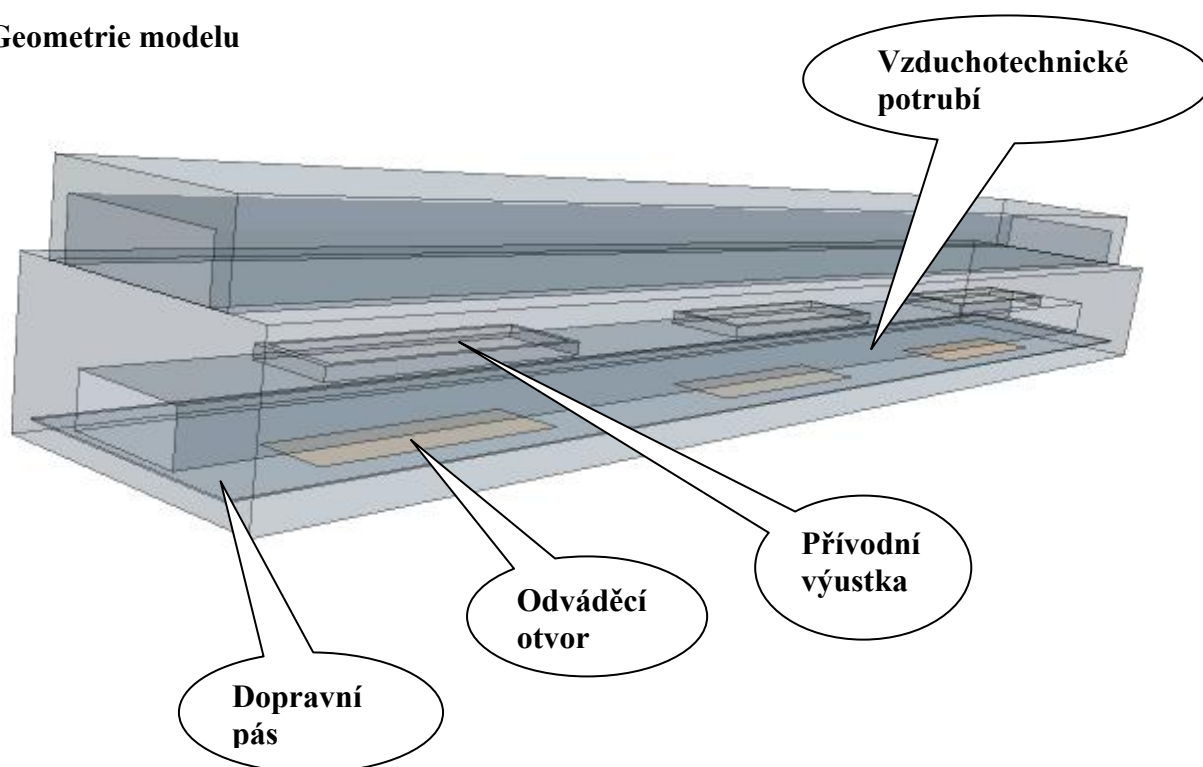
V návrhu přívodu vzduchu je zvoleno 10 distribučních členů (výustek), které jsou rovnoměrně rozmístěny po celé délce dopravníku. Na každou výustku potom připadá objemový tok

$$\dot{V}_n = \frac{\dot{V}}{n} = \frac{1,35}{10} = 0,135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (8-2)$$

kde  $V_n (\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$  je objemový tok připadající na jednu výustku,  $n (-)$  je počet výustek

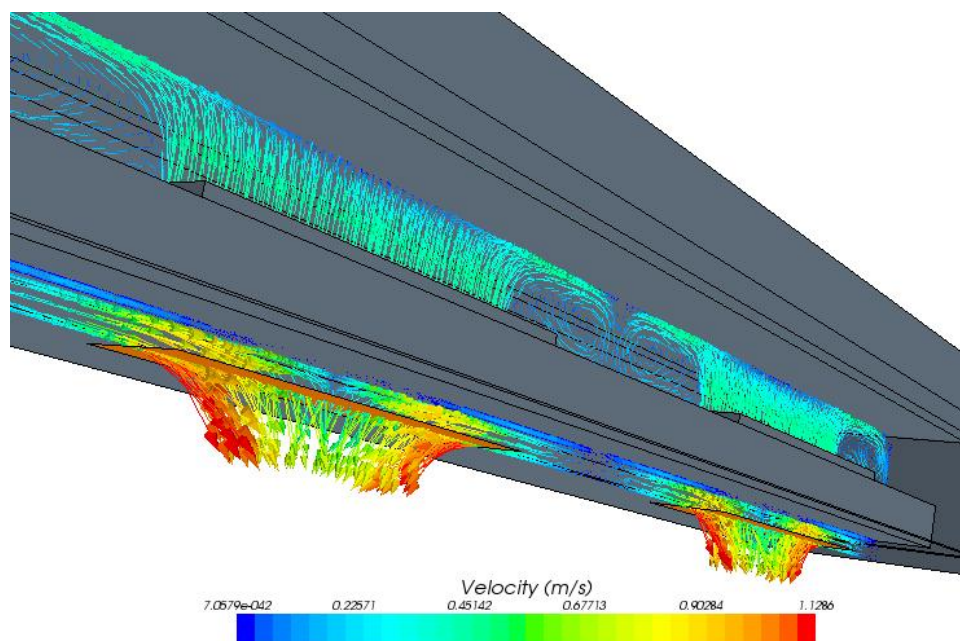
Simulace je řešena pouze pro část dopravníku což je pro posouzení charakteru proudění uvnitř zákrytu postačující. Výpočet je řešen stacionárně pro 3D geometrický model za použití  $k-\epsilon$  modelu turbulence. Odváděcí otvory jsou navrženy na spodní straně zákrytu pod dopravním pásem. Jejich velikost je totožná s přívodními výustkami, tedy  $325 \times 1225 \text{ mm}$ .

### Geometrie modelu



Obr.8.8 Výpočtový model

Díky umístění odváděcích otvorů na spodní stranu zákryt bylo dosaženo optimálnějšího proudění vzduchu. Teplý vzduch svým rozsahem rovnoměrněji prohřívá horní část dopravního pásu, která se účastní výměny tepla mezi vzduchem a vrstvou vlákna. Díky vysoké tepelné vodivosti nově navržené konstrukce dopravního pásu je zaručen kvalitní přenos tepla. Vlákno se tímto způsobem prohřeje na vyšší střední hodnotu než při samotném radiačním toku z plechového zákrytu. Umístěním odváděcích otvorů do spodní části dopravníku je zajištěno delší setrvání teplého vzduchu v zákrytu, z čehož plyne, že je schopen předat více své tepelné energie pro ohřátí strojních součástí dopravníku. Vektory proudícího vzduchu v zákrytu jsou viditelné na obr. 8.9.

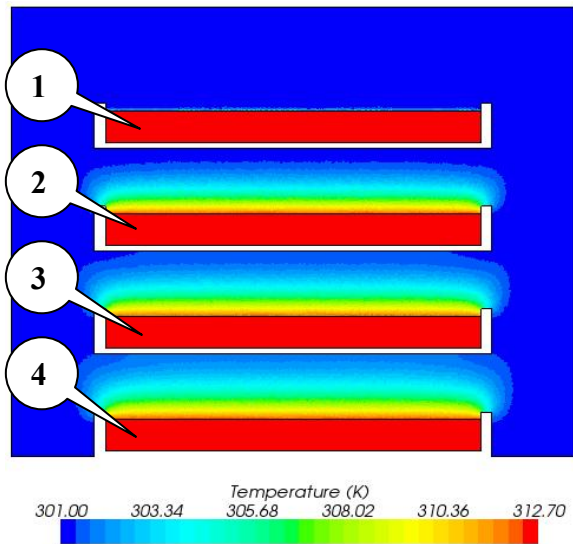


Obr. 8.9 Rychlostní pole v zákrytu dopravníku

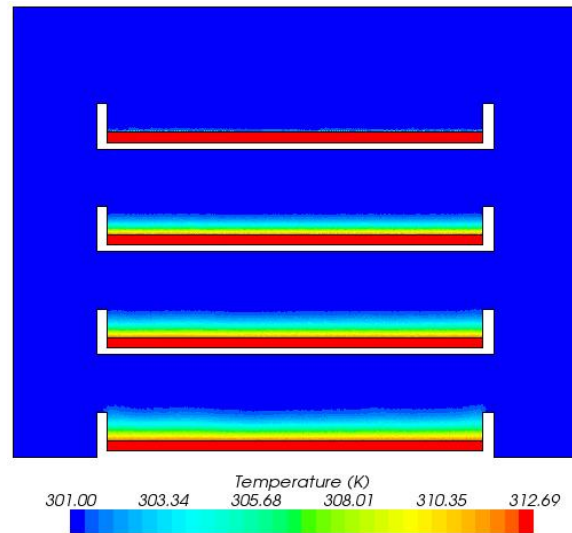
### 8.3 Chladnutí koberce v zavážecím koši

Na závěr je potřeba určit, jaký vliv na teplotu vlákna bude mít časová prodleva v zavážecím koši do lisu. Časová prodleva odpovídá aktuálnímu lisovacímu času, který závisí na tloušťce vyráběných desek. U nejnižší tloušťky vláknitého koberce (80 mm) je čas potřebný pro lisování 240 s a u nejvyšší tloušťky (240 mm) je zapotřebí 750 s. Byl proveden časově závislý výpočet pro zjištění chladnutí předlisovaného koberce u obou variant. Pro zjištění teplotního pole v řezu vláknitého koberce je v každém 1 cm umístěn jeden monitorovací bod. Simulace se zabývá řešením pouze přirozené konvekce, tepelný tok do strojního zařízení je zanedbán.

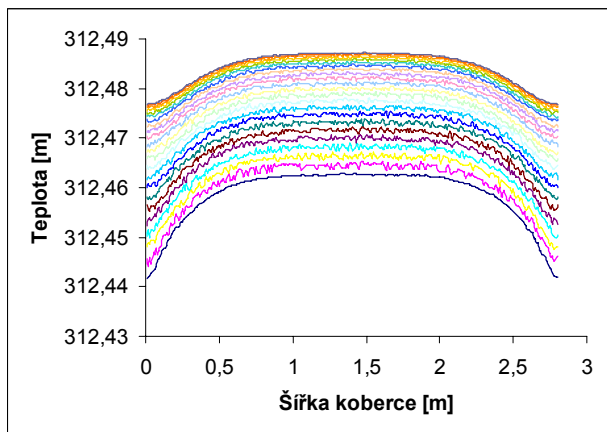
Vláknité koberce jsou zrychlovacím dopravníkem vkládány do koše postupně. V případě lisovacího času 240 s je zavážení kobereců rozděleno na intervaly 0, 80, 160 a 240s. Z toho vyplývá, že nejdelší čas stráví před lisem koberec č.4 (viz obr. 8.10), což se ukazuje i z nejvýraznějšího teplotního profilu v okolí 4. koberce. Na obr. 8.12 a 8.13 jsou znázorněny průběhy teplot ve 4. koberci, který vychladne nejvíce. Ze středních teplot v koberci (viz obr.8.14 a 8.15) lze vyčíst s jakou průměrnou teplotou vstupují jednotlivé vláknité koberce do lisu.



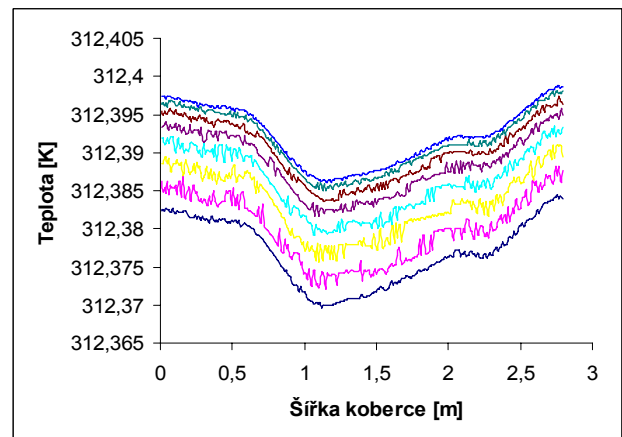
Obr. 8.10 Teplotní profil při tloušťce koberece 240 mm



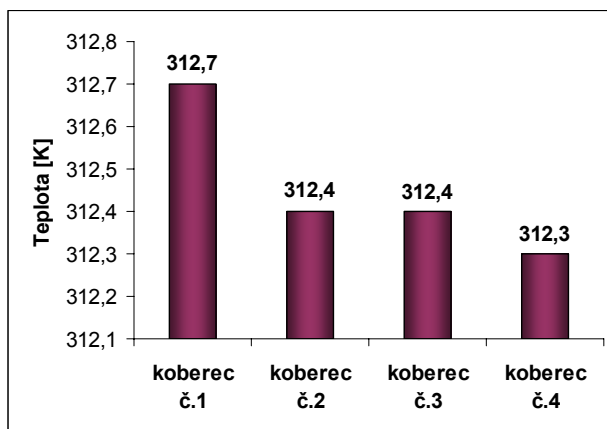
Obr. 8.11 Teplotní profil při tloušťce koberece 80 mm



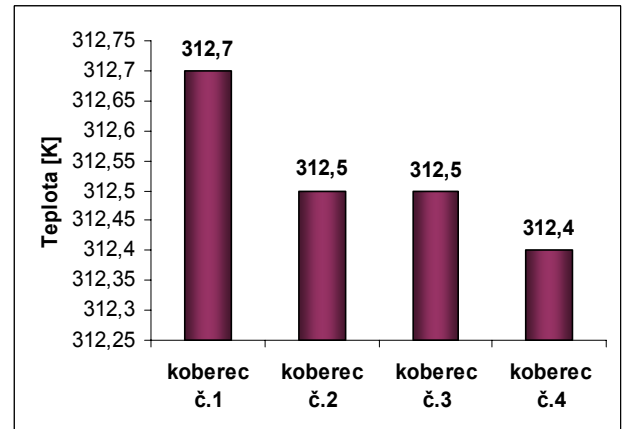
Obr. 8.12 Průběh teploty v koberci č. 4



Obr. 8.13 Průběh teploty v koberci č. 4



Obr. 8.14 Střední teplota v koberci



Obr. 8.15 Střední teplota v koberci

V průběhu lisovacího času nejvíce prochládnul spodní koberec, který tráví v zavázacím koši nejdéle. Ovšem v případě tloušťky koberece 80 mm jeho celková teplota poklesne pouze o 0,32 °C při tloušťce 240 mm poklesne o 0,23 °C. Z toho vyplývá, že se původní teplota vlákna téměř nezměnila. Koberec přichází do lisu o průměrné teplotě 39,5 °C, čím jsou splněny původní předpoklady, které počítaly s původní teplotou vlákna 35-40 °C.

## 9. Závěr

Úkolem práce bylo zhodnocení tepelné bilance části výrobního procesu a návrh vylepšení stávající situace. Řešení vycházelo z požadavku na udržení teploty dřevěného vlákna mezi procesy sušení a lisování, které po výstupu ze sušícího zařízení postupně chladne. Optimální teplota vlákna, které mělo být dosaženo na vstupu do lisu, se pohybovala mezi hodnotami 35-40 °C. Zásadním rozhodnutím bylo zvolení přístupu k řešení dané problematiky. Nabízel se přístup celkové energetické optimalizace výrobního procesu nebo přístup lokálním zásahem. Po uvážení bylo přistoupeno k vylepšení pouze určité části výrobního procesu. Vychází se přitom z výpočtu tepelných ztrát pro vybrané technologické celky výrobní linky. Správnost získaných výsledků je následně ověřena porovnáním s hodnotami získanými počítačovým modelováním. Podle předpokladu se ukázalo, že jednotlivé hodnoty se mírně odlišují, ovšem v akceptovatelné míře.

Na základě výpočtu tepelných ztrát a posouzení výchozí situace se dospělo k rozhodnutí řešit problematiku chladnutí vlákna ohřevem na šikmém pásovém dopravníku. Jedná se totiž o jedinou část výrobní linky, která je relativně dobře přístupná a kde je možné vlákno v reálném čase teplotně ovlivnit. Přispívá k tomu i fakt, že vlákno je zde volně sypáno na dopravním pásu. Poté se formuje do koberce, kde není žádný prostor pro jeho předeřev, ani ve formě parní injektáže. Zároveň se nachází ve výrobní hale v blízkosti lisu, tudíž nebude po ohřátí docházet k tak výraznému chladnutí jako je tomu při dopravě venkovním prostorem.

Za pomoci počítačové simulace byl proveden průzkum vlivu radiačního tepelného toku na prohřátí vrstvy vlákna. Díky nízké tepelné vodivosti vlákna se však nepodařilo v dostatečné míře vlákno ohřát ani při teplotě radiačního plechu 150 °C. Konvekční způsob ohřevu v tomto případě nepřipadal v úvahu z důvodu nekontrolovatelného vznosu vlákna. Pro prohřátí spodních vrstev vlákna byl navržen přívod teplého vzduchu do prostoru zákrytu dopravního pásu. Výpočtem byla stanovena teplota konvekčního vzduchu na 50 °C a množství přiváděného vzduchu na  $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Stávající gumotextilní dopravní pás musí být z důvodu nízké tepelné vodivosti nahrazen pásem z dlouhých kovových destiček. Ten zaručuje kvalitní přenos tepla do vrstvy vlákna. Plechový zákryt je vyhříván silikonovou topnou tkaninou na teplotu 200 °C. Tato teplota byla zvolena jako nejvyšší možná a ohledem na teplotu vznícení usazeného dřevěného prachu. Díky těmto opatřením se vrstva vlákna prohřeje za současného provozního času 35 s na průměrnou teplotu 39,7 °C, což splňuje původní požadavek.

Pro zjištění skutečné teploty vlákna na vstupu do lisu bylo potřeba určit ochlazení koberce v zavázacím koši do lisu. Podle vyráběné tloušťky desky zde vláknité koberec setrvává různý časový interval po dobu celého lisovacího procesu. Pro porovnání bylo důležité určit chladnutí při nejkratší a nejdelší časové prodlevě. Zavázací lis je 4-etážový, z čehož vyplývá, že nejdelší čas v něm stráví spodní koberec. Výpočtem se dokázalo, že při nejkratší době (240 s) odpovídající tloušťce vylisované desky 8mm zchladne koberec v průměru o 0,32 °C a při nejdelší době (750 s) odpovídající tloušťce vylisované desky 40 mm pouze o 0,23 °C. Jedním z důvodů je poměrně vysoká teplota okolního vzduchu (28 °C). Výsledkem řešení je průměrná teplota vláknitého koberce na vstupu do lisu v hodnotě 39,5 °C. Tímto návrhem bylo dosaženo původního záměru urychlit lisovací proces a celkový výrobní cyklus za účelem vyšší produktivity.



## 10. Seznam použitých zdrojů

- [1] Hrázský, J. – Král, P.: Kompozitní materiály na bázi dřeva, Část I.: Aglomerované materiály. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000
- [2] Hrázský, J. – Král, P.: Kompozitní materiály na bázi dřeva, Část I.: Aglomerované materiály. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2004
- [3] Hrázský, J. – Král, P.: Kompozitní materiály na bázi dřeva, Část II.: Dýhy a vrstvené Masivní materiály. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita
- [4] Pavelek, M. a kol.: Termomechanika, skripta VUT Brno, 2003.
- [5] Jícha, M.: Přenos tepla a látky, skripta VUT Brno, 2001
- [6] Nožička, J.: Sdílení tepla, skripta ČVUT Praha, 1997
- [7] Ferziger, J. – Peric, M.: Computational Methods For Fluid Dynamics, 2. edition Springer Verlag, 1999
- [8] CD-adapco.: CCM USER GUIDE, STAR-CD VERSION 4.02, CD-ADAPCO, 2006
- [9] Firemní podklady společnosti DDL-Lukavec
- [10] Euro SITEX, s.r.o.: katalog výrobce, [online]. Dostupné z www: <<http://www.eurositex.cz/produkty/doprasy/katalog/index.htm>>
- [11] Revos, s.r.o.: katalog výrobce, [online]. Dostupné z www: <<http://www.revos.cz/pdf/cz/2008/flexmat.pdf>>

## 11. Seznam použitých veličin a jednotek

Označení	Jednotka	Název veličiny
Q	[W]	tepelný výkon
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
U	[J]	vnitřní energie
p	[Pa]	tlak
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
c	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
m	[kg]	hmotnost
T	[K]	termodynamická teplota
t	[s]	čas
q	[W·m <sup>-2</sup> ]	jmenovitý tepelný výkon
$\dot{q}$	[W·m <sup>-2</sup> ]	jmenovitý tepelný tok
$\lambda$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\delta$	[m]	tloušťka
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
T <sub>w</sub>	[K]	teplota stěny
T <sub>tek</sub>	[K]	teplota tekutiny
$\alpha$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\bar{\alpha}$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	střední součinitel přestupu tepla
c	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla
$\gamma$	[m]	vlnová délka
c <sub>0</sub>	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla ve vakuu
n	[-]	absolutní index lomu
$\sigma$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> ]	stefan-Boltzmannova konstanta
$\varepsilon$	[-]	součinitel poměrné zářivosti (emisivita)
f <sub>v</sub>	[Hz]	frekvence
$\theta$	[m]	tloušťka mezní vrstvy
$\vec{n}$	[-]	jednotkový vektor normály
$\varepsilon_1$	[-]	součinitel poměrné zářivosti dřevěného vlákna
$\varepsilon_2$	[-]	součinitel poměrné zářivosti pozinkovaného plechu
F <sub>1-2</sub>	[-]	úhlový součinitel horního plechového zákrytu
a <sub>1</sub>	[m]	šířka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku
b <sub>1</sub>	[m]	délka vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku
a <sub>2</sub>	[m]	šířka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
b <sub>2</sub>	[m]	délka horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
T <sub>1</sub>	[K]	teplota vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku
T <sub>2</sub>	[K]	teplota horního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
S <sub>1</sub>	[m <sup>2</sup> ]	horní plocha vrstvy vlákna na šikmém pásovém dopravníku
S <sub>2</sub>	[m <sup>2</sup> ]	horní plocha plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{1-2}$	[W]	tepelný tok do horní části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
c <sub>1</sub>	[m]	výška vrstvy dřevěného vlákna na šikmém pásovém dopravníku
c <sub>2</sub>	[m]	výška bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
b <sub>2</sub>	[m]	délka bočního plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
F <sub>3-4</sub>	[-]	úhlový součinitel bočního plechového zákrytu
S <sub>3</sub>	[m <sup>2</sup> ]	boční plocha vrstvy vlákna na šikmém pásovém dopravníku

$S_4$	[m <sup>2</sup> ]	boční plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{3-4}$	[W]	tepelný tok do boční části plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\lambda_{pl}$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti plechového zákrytu
$\delta_{pl}$	[m]	tloušťka plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{v1}$	[W]	tepelný tok vedením horní plochou plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{v2}$	[W]	tepelný tok vedením boční plochou plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$T_{w1}$	[K]	povrchová teplota horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$T_{\infty}$	[K]	teplota vzduchu
$T_{f1}$	[K]	teplota filmu u horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\nu_1$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita vzduchu u horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\lambda_1$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivost vzduchu u horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Pr_1$	[-]	Prandtlovo číslo vzduchu u horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$L_1$	[m]	charakteristický rozměr horního povrchu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Gr_1$	[-]	Grashofovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$O_1$	[m]	je obvod horní plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Ra_1$	[-]	Rayleighovo kritérium pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Nu_1$	[-]	Nusseltovo číslo pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\alpha_1$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	je součinitel přestupu tepla pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$T_{w2}$	[K]	povrchová teplota boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$T_{f2}$	[K]	teplota filmu u boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\nu_2$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita vzduchu u boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\lambda_2$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivost vzduchu u boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Pr_2$	[-]	Prandtlovo číslo vzduchu u boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$L_2$	[m]	charakteristický rozměr boční povrchu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Gr_2$	[-]	Grashofovo kritérium pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$O_2$	[m]	obvod boční plochy plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$Ra_2$	[-]	Rayleighovo kritérium pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku

$Nu_2$	[-]	Nusseltovo číslo pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\alpha_2$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{q}_{k1}$	[W]	měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{k1}$	[W]	tepelný tok přirozenou konvekcí pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{q}_{k2}$	[W]	měrný tepelný tok přirozenou konvekcí pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{k2}$	[W]	tepelný tok přirozenou konvekcí pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{q}_{z1}$	[W]	měrný tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{z1}$	[W]	tepelný tok zářením pro horní plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{q}_{z2}$	[W]	měrný tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{z2}$	[W]	tepelný tok zářením pro boční plochu plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{k1}$	[W]	celkový tepelný tok konvekcí plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{z1}$	[W]	celkový tepelný tok radiací plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$\dot{Q}_{c1}$	[W]	výsledná tepelná ztráta plechového zákrytu na šikmém pásovém dopravníku
$k$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
$\alpha_i$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně stěny
$\alpha_e$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na vnější straně stěny
$T_e$	[K]	venkovní teplota
$T_i$	[K]	vnitřní teplota
$\delta_{př}$	[m]	tloušťka překližky
$\lambda_{př}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti překližky
$\delta_{iz}$	[m]	tloušťka tepelné izolace
$\lambda_{iz}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti izolace
$T_v$	[K]	teplota vlákna v koberci

### Dolní indexy

h	hala
k	kolna
v	vlákno v koberci

### Zkratky

VD	vláknitá deska
VK	vláknitý koberec
MDF	Medium Density fibreboard ( středně hustá vláknitá deska)
CFD	Computational Fluid Dynamics (počítačové modelování proudění)

