

# Termické vlastnosti netkané textilie s obsahem nanovláknenných vrstev

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N3106 Textilní inženýrství

*Studijní obor:*

Netkané a nanovláknenné materiály

*Autor práce:*

**Bc. Jakub Hrubý**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů





## Zadání diplomové práce

# Termické vlastnosti netkané textilie s obsahem nanovlákných vrstev

*Jméno a příjmení:* **Bc. Jakub Hrubý**  
*Osobní číslo:* T16000529  
*Studijní program:* N3106 Textilní inženýrství  
*Studijní obor:* Netkané a nanovlákné materiály  
*Zadávající katedra:* Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů  
*Akademický rok:* 2018/2019

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou, prostupu tepla netkanými textiliemi.
2. Navrhněte postup výroby netkané textilie s obsahem nanovlákných vrstev a vyrobte sérii vzorků o různých objemových hmotnostech s různým složením.
3. Testujte tepelnou vodivost vyrobených materiálů v závislosti na objemové hmotnosti a přítomnosti nanovlákných vrstev.
4. Diskutujte výsledky a navrhněte další postupy řešení daného problému.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
40-60 dle potřeby  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- 1.W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann: Nonwovens Fabrics, Wiley-VCH, Weinheim 2003, ISBN: 3-527-30406-1
- 2.RUSSELL, Edited by S.J. Handbook of nonwovens. Boca Raton, Fla. [etc.] : Cambridge: CRC press ; Woodhead, 2007. ISBN 978-185-5736-030.
- 3.Jirsák, O., Wadsworth, L.C. Nonwoven Textiles, Carolina Academic Press, Durham, NC 1999, ISBN 0-89089-978-8

*Vedoucí práce:*

Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.  
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

*Datum zadání práce:*

16. února 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

10. srpna 2020

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka

L.S.

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

10. srpna 2020

Bc. Jakub Hrubý

## Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jiřímu Chaloupkovi za odborné vedení, konzultace a užitečné rady, díky kterým tato diplomová práce mohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Filipovi Sanetníkovi, za jeho cenné rady a pomoc při realizaci praktické části této diplomové práce.

Ne méně důležité poděkování pak patří mé rodině - rodičům Pavlu Hrubému a Jitce Hrubé, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

## Příprava krátkých nanovláken

### **Anotace**

Obsah této diplomové práce se zabývá studiem termických vlastností objemné netkané textilie. Především pak jejich tepelnou vodivostí. V práci byl zkoumán vliv změny plošné a objemové hmotnosti netkané textilie na hodnoty tepelné vodivosti. Změna byla vyvolána vložením nanovláknenné nebo jiné vrstvy jemných vláken. V teoretické části se nacházejí základní informace o způsobech přenosu tepla a vysvětlení z toho plynoucích pojmů. Dále pak popis používaných testovacích metod a zařízení pro stanovení tepelné vodivosti materiálů. V experimentální části byla zvolena metoda výroby netkané textilie od vláknenného materiálu po finální pojení a měření. Měřené hodnoty byly zaznamenány a vyhodnoceny. Celkové výsledky byly diskutovány a zhodnoceny v závěru.

**Klíčová slova:** Tepelné vlastnosti textilie, tepelná vodivost, netkaná textilie, nanovláknena

### **Summary (Annotation)**

Content of this diploma thesis deals with study thermal properties of nonwoven textile. Above all, their thermal conductivity. In this work was investigated effect of change basis weight and volume weight nonwoven fabric on thermal conductivity. Change was done by inserting a nanofiber or other layer of fine fibers. The theoretical part contains basic information about the methods of heat transfer and an explanation of the resulting concepts. Furthermore, a description of the test methods used and equipment for determining the thermal conductivity of materials. In the experimental part was description methods production of nonwoven fabric from fibrous material to final bonding and measurement. The measured values were recorded and evaluated. The overall results were discussed and evaluated in the conclusion.

**Keywords:** Thermal properties of textiles, thermal conductivity, nonwovens, nanofibers

## Seznam použitých zkratek

SI	Mezinárodní soustava jednotek
C	Tepelná kapacita soustavy
c	Měrná tepelná kapacita látky
m	Hmotnost látky
Q	Teplo
$\Delta T$	Rozdíl teplot
Ck	Tepelná kapacita kalorimetru
<b>q</b>	Hustota tepelného toku
$\lambda$	Tepelná vodivost
$\nabla T$	Gradient teploty
E <sub>b</sub>	Povrchová emisní energie
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta
T <sub>s</sub>	Absolutní teplota povrchu
PA 6	Polyamid 6
PP	Polypropylen
PES	Polyester
Bico	Bikomponentní vlákenné pojivové
NT	Netkaná textilie
AC	Střídavý proud
ms	Plošná hmotnost
s	Plocha netkané textilie
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
U	Napětí na diferenciálním termočlánku
h	tloušťka vzorku
nm / $\mu\text{m}$ / m	Nanometr / Mikrometr / Metr
J	Joul
$^{\circ}\text{K}$ / $^{\circ}\text{C}$	Stupeň Kelvina / Stupeň Celsia
Hz	Hertz
dTex	Decitex
g / kg	Gram / kilogram
W	Watt

Obsah:

<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
1.1. ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA .....	11
1.2. SDÍLENÍ TEPLA - PŘEHLED NÁZVOSLOVÍ .....	14
1.2.1. Popis teploty.....	14
1.2.2. Popis tepla .....	14
1.2.3. Popis tepelné kapacity .....	14
1.2.4. Popis měrného tepla .....	15
1.2.5. Znění Fourierova zákona.....	17
1.2.6. Popis tepelné vodivosti.....	17
1.2.7. Šíření tepla kondukcí (vedením).....	19
1.2.8. Šíření tepla konvencí (prouděním).....	20
1.2.9. Šíření tepla radiací (zářením).....	21
1.3. ZPŮSOBY MĚŘENÍ PLOŠNÝCH TEXTILIÍ.....	23
1.4. STACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ .....	24
1.4.1. Měřicí přístroj podle Poensgena.....	24
1.4.1. Měřicí přístroj podle Bocka .....	25
1.4.2. Měřicí přístroj podle Van Rinsuma.....	26
1.4.3. Měřicí přístroj podle Van Nusselta .....	27
1.5. NESTACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ.....	27
1.5.1. Měřicí přístroj Alambeta.....	28
1.5.2. Měření přístroj podle Fitcheho .....	29
1.6. DRUHY VLÁKEN .....	30
1.6.1. Polyamid - PA 6.....	31
1.6.2. Polypropylen - PP.....	32
1.6.3. Polyester - PES .....	33
1.6.4. Bikomponentní vlákenné pojivové – Bico.....	33
1.7. NETKANÁ TEXTILIE .....	34
1.7.1. Výroba vlákenné vrstvy.....	35
1.7.2. Mykání vlákenné vrstvy.....	37
1.7.3. Mykací stroj válcový .....	38
1.7.4. Kladení vlákenné vrstvy.....	41



1.8.	NANOVLÁKENNÁ VRSTVA .....	44
1.8.1.	<i>Elektrostatické zvlákňování</i> .....	45
1.8.2.	<i>Nanospider</i> .....	47
1.8.3.	<i>Střídavé zvlákňování</i> .....	47
1.9.	MELTBOWN .....	48
1.10.	DRUHY POJENÍ NETKANÝCH TEXTILÍ .....	49
1.10.1.	<i>Termické pojení lisováním</i> .....	49
1.11.	METODY POUŽITÉ PŘI ANALYZOVÁNÍ A ZAZNAMENÁVÁNÍ VLASTNOSTÍ.....	50
1.11.1.	<i>Plošná hmotnost netkané textilie</i> .....	50
1.11.2.	<i>Tloušťka netkané textilie</i> .....	51
1.11.3.	<i>Elektronová mikroskopie</i> .....	51
1.11.4.	<i>Statická metoda měření tepelné vodivosti objemných materiálů</i> .....	52
1.11.5.	<i>Termoelektrické teploměry - termočlánky</i> .....	53
<b>2.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>54</b>
2.1.	POSTUPY PŘÍPRAVY ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ .....	54
2.1.1.	<i>Příprava základní netkané textilie</i> .....	55
2.1.2.	<i>Příprava nanovlákné vrstvy</i> .....	56
2.1.3.	<i>Optická analýza připravených částí vzorků</i> .....	59
2.1.4.	<i>Pojení jednotlivých vrstev vzorků</i> .....	62
2.2.	LABORATORNÍ APARATURA PRO MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ .....	63
2.3.	MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ STANOVENÍ METODIKY .....	64
2.3.1.	<i>Příprava aparatury pro měření</i> .....	65
2.3.2.	<i>Vložení vzorku do měřícího zařízení</i> .....	66
2.3.3.	<i>Nastavení měřícího přístroje HP kanálový multiplexor Agilent 34901A</i> .....	66
2.3.4.	<i>Měření vzorku</i> .....	67
2.3.5.	<i>Less and learn z první přípravy vzorků a jejich měření</i> .....	71
2.4.	SOUBĚŽNÉ TESTOVÁNÍ NT O DVOU PLOŠNÝCH HMOTNOSTÍ S PŘÍDAVKEM NANOVLÁKEN .....	72
2.4.1.	<i>Plošná hmotnost základní netkané textilie</i> .....	73
2.4.2.	<i>Popis vzorků pro experiment</i> .....	73
2.4.3.	<i>Tepelné pojení jednotlivých komponent</i> .....	74
2.4.4.	<i>Měření tepelné vodivosti vlákných materiálů</i> .....	75
2.4.5.	<i>Less and learn z druhé přípravy vzorků a jejich měření</i> .....	78

2.5.	POROVNÁVÁNÍ TEPELNÉ VODIVOSTI NANOVLÁKENNÉ VRSTVY S MELTBLOWNEM.....	79
2.6.	DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....	83
<b>3.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>84</b>
<b>4.</b>	<b>POUŽITÉ ZDROJE.....</b>	<b>87</b>
<b>5.</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>90</b>

## Úvod

Měření teplotních vlastností objemných vlákných materiálů, se považuje za doposud ne úplně dobře zmapovanou oblast. Je to způsobeno vstupem mnoha faktorů ovlivňujících měření, jako jsou například přitlačná síla, velikost průměrů vláken, potažmo pórů, tepelné ztráty a jiné. Zmíněné vlivy mohou být předpokladem pro špatnou opakovatelnost měření.

Tato práce byla zaměřena na měření tepelné vodivosti objemných netkaných textilií s přidavkem jemných vláken, která byla vkládána do vrstvy základní netkané textilie a následně měřena.

V první části se nachází teoretické zázemí pro pochopení mechanismů sdílení tepla, které je doplněno o základní pojmy s tím spojené. Dále bylo popsáno několik jiných způsobů měření tepelné vodivosti, které je možné aplikovat na plošné textílie. Teoretická část pokračuje logicky uspořádanými technologickými kroky, které byly využity při následné výrobě vzorků.

Praktická část se skládala ze tří experimentů, první měl ověřovat vliv plošné hmotnosti nanovlákné vrstvy. Během oddělení nanovláken docházelo k jejich poškození. Proto byla nanovláknina vložena i s podkladovou textilií a podrobena měření. Druhé měření ověřovalo vliv plošné potažmo objemové hmotnosti vzorků na výsledné hodnoty tepelné vodivosti. Třetí měření bylo zaměřeno na vložení jiného druhu vlákné vrstvy v tomto případě vláken meltblown a výsledky byly porovnávány s hodnotou po vložení nanovláken

Změřené hodnoty byly vždy zpracovány, pro každý experiment byl pro větší přehlednost vytvořen graf. Poznatky z výsledků byly shrnuty v diskuzi a zhodnoceny v závěru.

## **1. Teoretická část**

Teoretická část této diplomové práce je koncipována tak, aby čtenáři přinesla shrnutí základních principů týkajících se přenosu tepla. Přináší souhrn možností měření těchto vlastností u textilních materiálů popsaných jinými autory, ze kterých byl jeden konkrétní vybrán a následně využit v experimentální části pro měření termických vlastností připravených textilních vzorků.

Dále jsou zmíněny jednotlivé materiály a technologické kroky, které bylo zapotřebí využít během laboratorní přípravy vláknenných materiálů pro experimentální část. Tím čtenáři přináší snazší orientaci v diskutované problematice.

Poslední pasáž teoretické části se zabývá analytickými metodami, které byly použity pro popis pozorovaných vlastností připravených textilií v experimentální části.

### **1.1. Způsoby přenosu tepla**

Odvození základních vztahů pro šíření tepla vychází z předpokladu, že těleso s vyšší teplotou předává dle teplotního gradientu energii tělesu s nižší teplotou a to až do doby, kdy dojde k vyrovnání energie v obou tělesech (rovnovážný stav). K přenosu tepla mezi dvěma tělesy, jež mají různou tepelnou energii, může docházet buď přímým kontaktem těchto těles, nebo působením na dálku [2]. Tepelná vodivost je schopnost materiálu přenášet teplo (energii). K tepelné vodivosti dochází v důsledku kmitání (pohybu) molekulárních částic v materiálu, které má za následek změny jejich kinetické energie. Typicky dobré elektrické vodiče mají i dobrou tepelnou vodivost. Tato skutečnost je exemplárně patrná například u kovů, kde je vodivost realizována pomocí volných elektronů a těsné mřížkové vazby. Díky těmto vlastnostem dochází u kovů k rychlému ohřátí při jejich expozici vůči teplu [1,3].

K přenosu tepla dochází nerovnoměrně. Jedná se o termodynamický děj, který je realizován v prostoru a čase s konečnou rychlostí. K přenosu tepla dochází pomocí tří základních způsobů [2,4].

### **Šíření kondukcí**

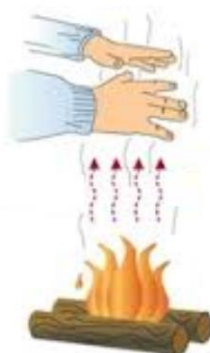
Energie proudí z místa o vyšší teplotě (střední kinetické energii) do místa s nižší teplotou, toto je realizováno na částicích v přímém kontaktu. K výměně dochází vlivem srážení částic, čímž dochází k předání části pohybové energie. V uspořádání mřížky k přemístění nedochází, částice pouze kmitají kolem své rovnovážné polohy. Děj je známý z přenosu tepla v pevných látkách (viz obr.: 1), v případě plynů a kapalin do něj vstupují další faktory [2,3].



*Obrázek 1.: Vyobrazení způsobu šíření tepla kondukcí (vedením) [5].*

### **Šíření konvencí**

Teplotní proudění strhává při průchodu hmotou částice látky, čímž mění jejich polohu. Jednotlivé částice tak mají různou vnitřní energii (teplotu), jejich mísením mezi sebou dochází k přenosu tepla. Vzhledem k předchozí formulaci k tomuto ději nemůže docházet u pevných látek, děj je pozorovatelný pouze u plynů a kapalin (viz obr.: 2)[2,4].



*Obrázek 2.: Vyobrazení způsobu šíření tepla konvencí (prouděním) [5].*

### **Šíření radiací**

Látka emituje energii všemi směry, přenos tepla je realizován pomocí elektromagnetického záření o dané vlnové délce (viz obr.: 3). Tento způsob přenosu může být, na rozdíl od předchozích dvou principů, uskutečněn i ve vakuu. Energie vyzařovaná radiací je závislá na více parametrech např. na teplotě, barvě povrchu nebo obsahu plochy [2,4].



*Obrázek 3.: Vyobrazení způsobu šíření tepla radiací (zářením) [5]*

V technické praxi se velmi často stává, že jeden ze způsobů přenosu tepla převažuje nad zbylými. Pro zjednodušení, s přihlédnutím k tomuto faktu, se při výpočtech bere v potaz pouze hlavní princip a ostatní se zanedbávají. V případě, kdy nelze s určitostí předem stanovit, jaký z principů použít, je nutné pro komplexnější zhodnocení přenosu tepla přistoupit ze zjednodušeného výpočtu ke kombinaci jednotlivých výpočtů [1,2,3].

## 1.2. Sdílení tepla - přehled názvosloví

Při zkoumání problematiky tepelných vlastností materiálů nebo prostředí je důležité znát pár základních pojmů s nimi spojených. Fourierův zákon vysvětluje okolnosti sdílení tepla pomocí vedení. Z jeho popisu je dále zřetelná další definice, kterou je tepelná vodivost materiálu. Ta slouží k posouzení látek vzhledem k jejich vlastnostem.

### 1.2.1. Popis teploty

Teplota je základní popisná veličina termodynamiky zařazená do jednotek soustavy SI. Teplota (T) popisuje skalární veličinou tepelný stav hmoty. Pro popis teploty se používá jednotka stupeň Kelvina značená písmenem °K nebo stupeň Celsia °C [10].

### 1.2.2. Popis tepla

V termodynamice se s pojmem teplo (Q) setkáváme v souvislosti s tepelnou výměnou. Teplo je energie, kterou předává teplejší těleso tělesu chladnějšimu. Definuje se jako změna (zvýšení) vnitřní energie o vykonanou práci. Systém ne vždy práci vykonává, v takovém případě můžeme definici upravit a popsat ji jako změnu vnitřní energie vlivem styku s jiným materiálem nebo prostředím. Jednotkou tepla je Joule (J). Ten je pak definován jako odvozená jednotka soustavy SI, která udává práci vykonanou působením jednoho Newtonu na dráze jednoho metru ve směru pohybu. Matematicky zapsanou jako  $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$  [2,5].

### 1.2.3. Popis tepelné kapacity

Tepelná kapacita popisuje schopnost materiálů vstřebávat teplo. Matematicky odpovídá teplu, které je zapotřebí pro ohřev tělesa o jeden stupeň Kelvina. Popisují se dva základní typy, kde k ohřevu dochází za stálého objemu či tlaku. Jednotkou popisující tepelnou kapacitu je  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$  (rovnice: 1.).

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

C... tepelná kapacita soustavy

dQ... derivace dodaného tepla

dT... změna teploty dodáním tepla [10].

#### 1.2.4. Popis měrného tepla

Měrné teplo ( $c$ ) je definováno jako množství tepla ( $Q$ ) v Joulech, které je potřeba přivést k tělesu, aby došlo ke změně teploty materiálu o hmotnosti ( $m$ ) jednoho kilogramu o jeden teplotní stupeň. Pro homogenní materiál je konstantní a jednotkou je  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  (rovnice: 2.).

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \left( \frac{dQ}{dT} \right) \quad (2)$$

c... měrná tepelná kapacita látky

m... hmotnost látky

dQ... derivace dodaného tepla

dT... změna teploty dodáním tepla [1,10]

Pro zjednodušení lze zapsat stavovou rovnici následujícím vztahem za použití kapacity měrného tepla (rovnice: 3.).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3)$$

Q... množství tepla dodané soustavě

m... hmotnost

c...měrná tepelná kapacita

$\Delta T$ ... rozdíl teplot



Hodnota měrného tepla se mění v závislosti na teplotě, z toho důvodu je v materiálových tabulkách uvedená hodnota vztahována k určitému rozmezí teplot. Dalším důležitým parametrem, který může do značné míry ovlivnit tuto hodnotu je vlhkost, proto se před měřením doporučuje vzorek kondicionovat (sušit) [1,7,10].

Pro měření měrného tepla se používá přístroj zvaný kalorimetr. Jedná se o dobře tepelně izolovanou nádobu, do které se vkládá vzorek. Pokud bychom docílili ideálně izolovaného kalorimetru, který by neodebíral žádnou tepelnou energii a zároveň by vzorek neprocházel žádnou fázovou změnou, dalo by se uvažovat, že z předchozího vztahu je možné měrné teplo vyjádřit. To je velmi zjednodušený popis. Nicméně pokud uvažujeme, že známe velikost přivedené energie ( $dQ$ ), jež je všechna spotřebována na ohřev vzorku, můžeme tedy vypočítat přibližnou hodnotu měrného tepla vzorku [4,6].

Platila by tedy kalorimetrická rovnice popsaná výše, kdy známe přivedenou tepelnou energii ( $Q$ ), hmotnost vzorku můžeme zvážit a rozdíl teplot ( $\Delta t$ ) se dá odečíst z teploměru. Nicméně to by do výpočtů vnášelo velkou nepřesnost, a proto výrobci kalorimetrů udávají hodnotu tepelné kapacity zařízení ( $C_k$ ), která musí být ve výpočtech zohledněna (rovnice: 4.).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T + C_k \cdot \Delta T_k \quad (4)$$

$Q$ ... množství tepla dodané soustavě

$m$ ... hmotnost

$c$ ...měrná tepelná kapacita

$\Delta T$ ... rozdíl teplot

$C_k$ ... tepelná kapacita kalorimetru

$\Delta T_k$ ... rozdíl teplot kalorimetru

Rovnice popisuje, že množství přivedeného tepla do soustavy je rovno změně teploty vzorku vztaženo na jeho hmotnost, dále se bere v patrnost i samotné zahřátí aparatury kalorimetru [10].

### 1.2.5. Znění Fourierova zákona

Fourierův zákon je pilířem při matematickém popisu vedení tepla. Byl odvozen z experimentálně zjištěných faktů, které popsal Fourier. Zjistil, že teplo prošlé tělesem o stejném složení v každé části, je přímo úměrné teplotnímu spádu a času (rozměru plochy, kterou tepelný tok probíhá (rovnice: 5.)).

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (5)$$

$q$ ... hustota tepelného toku

$\lambda$ ... součinitel tepelné vodivosti

$\nabla T$ ... gradient teploty (parciální derivace teploty podle všech os)

Fourierův zákon říká, že vektor hustoty tepelného toku ( $q$ ) je přímo úměrný gradientu teploty a má opačný směr [2,7].

### 1.2.6. Popis tepelné vodivosti

Ve fyzice se označuje tepelná vodivost ( $\lambda$ ), jedná se o schopnost dané látky nebo prostředí vést teplo. Popisuje, do jaké míry je materiál nebo prostředí ochotný převádět teplo ze zahřáté do chladnější části. Je definována jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád. Přitom se předpokládá, že teplo se šíří pouze v jednom směru. Pro základní technické materiály byla hodnota zaznamenána do tabulek a je brána jako konstanta. Jeho výpočet

je dán Fourierovým zákonem ze vzorce (5). Hodnota tepelné vodivosti je závislá na více faktorech, jako jsou:

- Tlak prostředí
- Vlhkost (vnitřní i prostředí)
- Teplota a další... [8,9,13]

Tabulka 1.: *Tabulka vybraných hodnot tepelné vodivosti [inspirováno z 3]*

Látka	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		
	při 25 °C	při 20 °C	při 0 °C
měď	386	395	401
zlato	317		
hliník	237	229	
mosaz	120		
železo	80,2	73	
voda	0,6062	0,6	0,55
nylon	0,24		
linoleum		0,19	
dřevo stavební <sup>[pozn. 1]</sup>	0,18 – 0,49		
polystyren		0,16	
skelná vata		0,04	
ovčí vlna	0,04		
sníh (čerstvý)			0,03 <sup>[pozn. 2]</sup>
polystyrenová pěna	0,033	0,035	
vzduch (normální tlak)	0,0262	0,026	
aerogel	0,015–0,020		

Z tabulky (viz tab.: 1) je zřejmé, že mezi nejlepší tepelné vodiče patří kovy, toho je využíváno třeba ve vzduchotechnice. Tepelné výměníky jsou konstruovány

z kombinace měděných trubek, které jsou spojeny s hliníkovými plíšky, jež zvyšují rozměr teplosměnné plochy. Hliník má oproti mědi nižší hmotnost a zároveň je mnohem levnější.

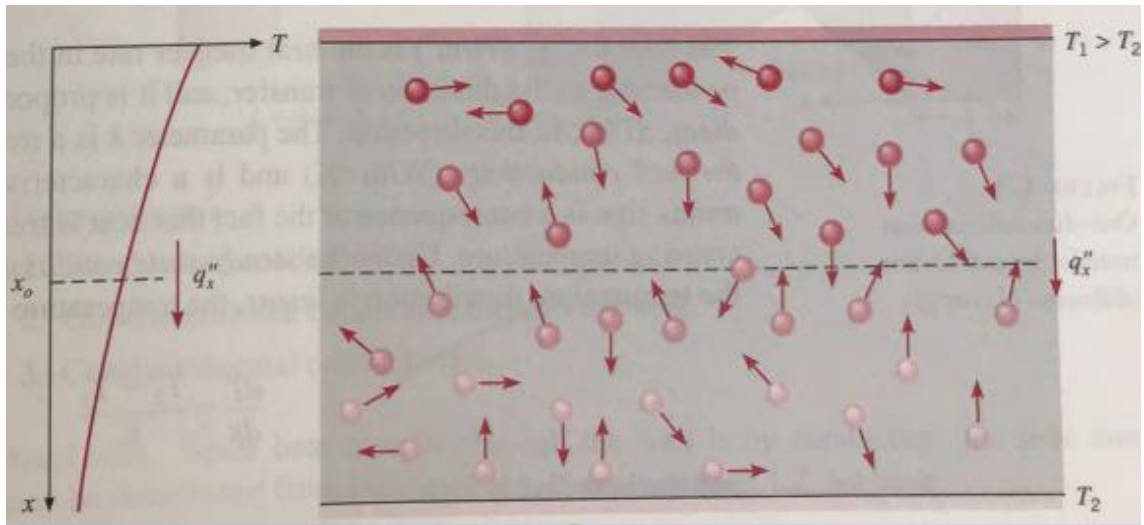
Taktéž je vidět, že polymery začínající nylonem, jsou svou hodnotou tepelné vodivosti v porovnání s kovy řádově jinde. Stejně tak tomu je i u ovčí vlny, z tabulky je patrné, že materiály používané pro textilní průmysl jsou voleny i s ohledem na ochranu a komfort uživatele. Za důležitou hodnotu se považuje hodnota udávaná u vzduchu (0,0262), která je brána jako hodnota hraniční. Všeobecně je vzduch pokládán za dobrý izolant [3,13].

### **1.2.7. Šíření tepla kondukcí (vedením)**

K vedení tepla dochází, pokud se naplní předpoklad o rozdílných teplotách v různých místech materiálu nebo prostředí. Přenos tepla vedením je realizován pomocí částic, které v místě s vyšší teplotou disponují vyšší kinetickou energií. Děj zpravidla probíhá v pevných látkách, kde vyšší střední kinetická energie znamená rychlejší pohyb částic kolem rovnovážné polohy ve strukturní mřížce. To má za následek častější srážku s ostatními částicemi. V důsledku srážek dochází k předání části kinetické energie do míst s nižší energií, přičemž dochází k rozpohybování okolních částic ale nikoli k jejich přeuspořádání. Děj je díky těsnému mřížkovému uspořádání látek nejlépe pozorovatelný v pevných látkách (např. v kovech), nicméně je pozorovatelný i v kapalinách a plynech. U kapalin a plynů je však vždy vedení spojeno s dalším způsobem sdílení tepla, například strháváním částic prostorem a tím pádem se jedná o kombinaci s prouděním [4,11].

Při zmínce slova vedení bychom si měli představit koncept atomové či molekulární aktivity, protože právě tyto procesy mají za následek způsob přenosu tepla kondukcí (viz obr.: 4). Na vedení lze pohlížet jako na přenos energie z více energeticky nabitě části na části s menším energetickým nábojem. Fyzikální mechanismus vedení

je nejnadhěji popsateľný u plynů s ohledem na principy známé z termodynamiky. Uvažujeme plyn, ve kterém existuje teplotní gradient a zároveň v něm nedochází k hromadnému nebo makroskopickému pohybu. Plyn zabírá prostor mezi dvěma povrchy, které mají různé teploty. Teplotu v jakémkoli bodě spojujeme s energií molekul v jeho bezprostřední blízkosti. Tato energie souvisí s náhodným translačním pohybem, stejně tak jako s vnitřním rotačním a vibračním pohybem molekul [6,7].



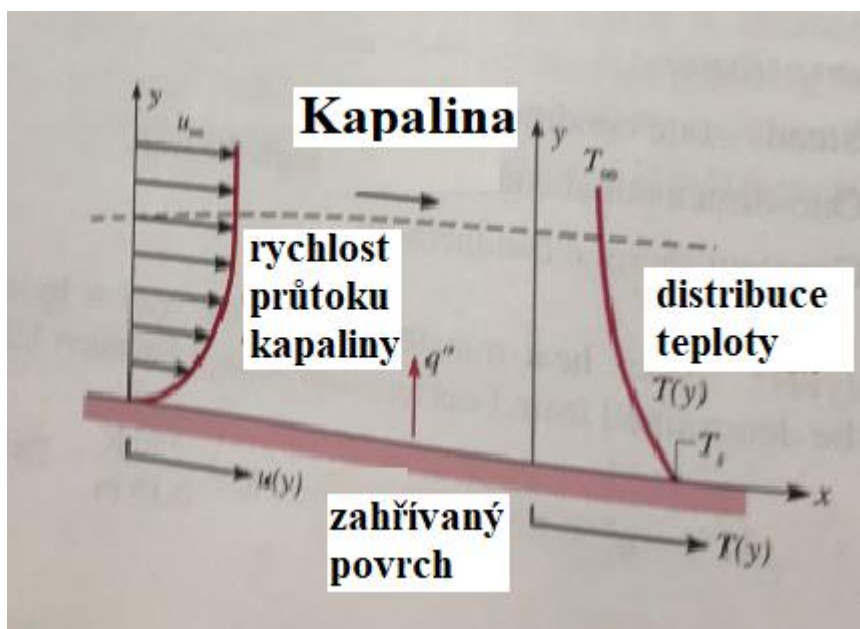
Obrázek 4.: Představa vedení tepla s difuzí energie na základě molekulární aktivity [6]

### 1.2.8. Šíření tepla konvencí (prouděním)

Konvekční přenos tepla se skládá ze dvou mechanismů. Prvním z nich je difuzní pohyb částic, jehož důsledkem dochází k náhodnému molekulárnímu pohybu. Druhou složkou je přemístění větší části hmoty (makroskopických částí), například pohybem kapaliny. Tento pohyb kapaliny je spojován s tím, že se v daném okamžiku pohybuje velké množství molekul stejným směrem a tvoří tak pohyblivý blok. Takový pohyb v přítomnosti teplotního gradientu přispívá k přenosu tepla. Protože molekuly v blocích si udržují svůj běžný pohyb, celkový přenos tepla je tedy superpozicí přenosu energie náhodným pohybem molekul a hromadným pohybem kapaliny. Obvykle se tento kumulativní transport energie označuje jako proudění tepla. Pro princip přenosu prouděním je zásadní výměna energie, ke které dochází mezi pohybující se tekutinou a ohraničujícím povrchem, pokud mají odlišné teploty. Uvažujme tok kapaliny přes zahříváný povrch, jejímž prostřednictvím se rychlost mění od nuly na povrchu

ke konečné hodnotě  $u$ , spojené s tokem. Tato oblast kapaliny je známá jako hydrodynamická nebo rychlostní hraniční vrstva.

Zjednodušeně řečeno, představíme si trubku, kterou protéká kapalina. Tato trubka je zahřívána vnějším zdrojem, průtok kapaliny probíhá ve středu trubky větší rychlostí než u stěn trubky vlivem vnitřního tření kapaliny. Zpomalená vrstva je delší dobu vystavena působení emitujícího tepla, což je i zobrazeno na obrázku (viz obr.: 5). Efekt tepelného přenosu je nejvyšší v místě kontaktu zahříváné trubky s kapalinou a oddalováním se od povrchu se tepelný efekt snižuje. Jak je patrné, tato skutečnost je úzce spjata s rychlostí toku kapaliny [6,9].



Obrázek 5.: Představa proudění tepla kapalinou vedenou podél zahřáté plochy [6].

### 1.2.9. Šíření tepla radiací (zářením)

Tepelné záření je energie emitovaná hmotou, která má nenulovou hodnotu. Ačkoli se primárně zaměřujeme na záření z povrchů pevných látek, může k němu docházet i z povrchu kapalin a plynů. Bez ohledu na formu hmoty může záření způsobovat změny v elektronové konfiguraci molekul nebo atomů. Energie záření je přemístována pomocí elektromagnetického vlnění nebo pomocí fotonů. Zatím co u přenosu energie

vedením či prouděním je vyžadována přítomnost media, pro přenos zářením není medium třeba. K přenosu zářením ve skutečnosti dochází nejlépe ve vakuu[6,7,8].

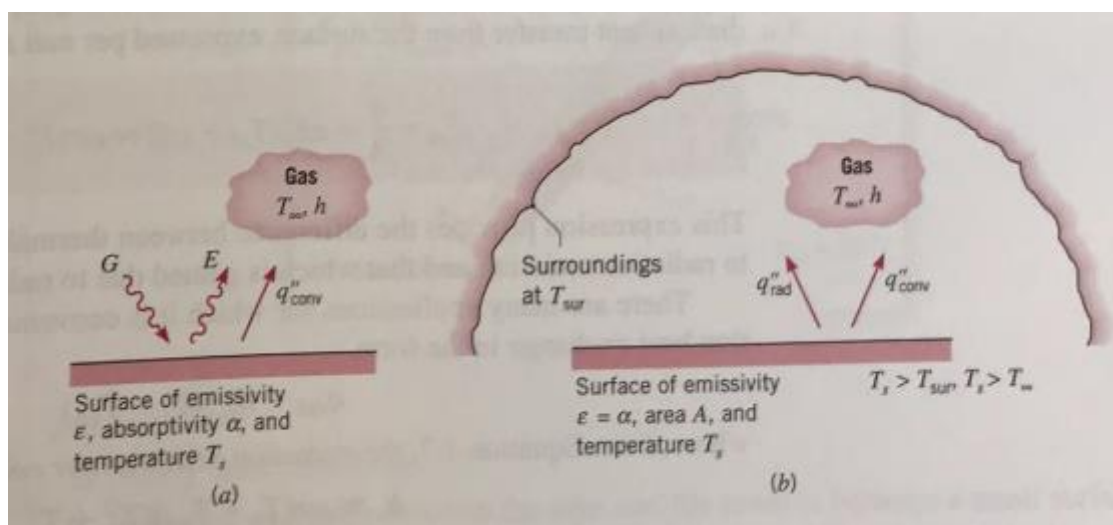
Záření emitované povrchem pochází z tepelné energie hmoty ohraničené povrchem a rychlostí (viz obr.: 6), při které se uvolňuje energie na jednotku plochy. Rychlost s jakou je energie uvolňována se nazývá povrchová emisní energie, kterou popisuje Stefan-Boltzmanův zákon.

$$Eb = \sigma \cdot T_s^4 \quad (6)$$

$E_b$ ... povrchová emisní energie

$\sigma$ ... Stefan-Boltzmanova konstanta ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$ )

$T_s$ ... absolutní teplota povrchu (K) [6].



Obrázek 6.: Výměna tepla zářením: a) povrch odrážející energii záření zpátky do okolí; b) povrch přímo emitující záření [6].

### 1.3. Způsoby měření plošných textilií

Výsledné hodnoty tepelné vodivosti se mění v závislosti na druhu textilie, způsobu její výroby a v neposlední řadě na materiálech použitých vláken. Za plošné textilie se považují netkané textilie, tkaniny a pleteniny, které mají dva rozměry výrazně vyšší než třetí. Jinak řečeno, jejich tloušťka se považuje vzhledem k ploše jako malá.

Analyzování tepelné vodivosti se provádí pomocí dvou metodik měření. První metodikou je analýza při splnění stacionárních podmínek, tedy pokud pozorujeme ustálený tok tepla. Druhým případem se potom může stát přestup tepla za nestacionárních podmínek, tedy v případě proměnlivého toku tepla v čase [8,9,11].

#### ➤ Stacionární metody

Stacionární metody se považují za snadnější, vychází se z předpokladů, že všechno teplo prochází vzorkem. Mělo by se jednat o ustálený stav bez tepelných ztrát (poměrně složité na realizaci). Principiálně se jedná o stejný základ u všech metod a to přestup tepla z vyhřívané desky, válce nebo koule k chladnější přes izolační vrstvu (vzorek). Výsledky získané touto metodikou se považují za poměrně přesné, z tohoto důvodu se tato metodika většinou využívá pro měření.

Za nevýhodu tohoto typu měření se považuje především jeho časová náročnost. Pro dosažení ustáleného toku tepla musí být vzorek zahřátý a čeká se do doby, kdy hodnoty oscilují okolo výsledné hodnoty. Při zpracování většího počtu vzorku a měření na více místech může být doba testování nepřiměřená.

Při měření je podstatné znát tloušťku zkoumaného vzorku, některé z metod mají přímo možnost odečtení tohoto parametru. Z pravidla se měření zakládá na rozdílu teplot emitující a přijímací desky a úbytek teploty po ustálení je charakterizován tepelnou izolační vlastností materiálu [8,11].



➤ **Nestacionární metody**

Při nestacionárních metodách měření dochází ke změně teploty během měření. Měření se musí provést ve více časových intervalech. Předností tohoto typu měření je menší časová náročnost a menší ovlivnitelnost výsledků, pokud dojde k tepelným ztrátám

## **1.4. Stacionární metody měření tepelných vlastností**

Při použití stacionárních metod, u kterých nedochází ke změně teploty, ani k tepelným ztrátám během měření, prochází tepelný tok jen a přímo zkoumaným materiálem. Stacionární metody se dělí na tři základní typy.

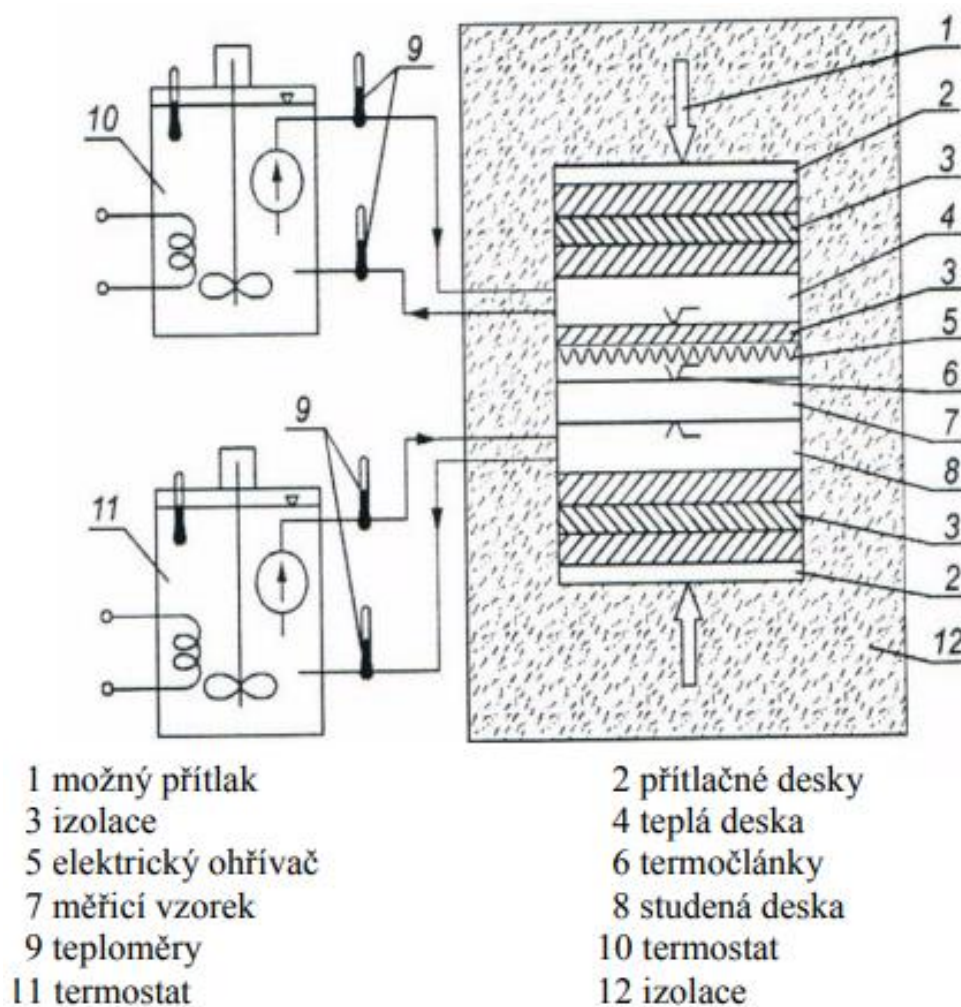
- Přístroje podle Poensgena a Blocka - deskový
- Přístroj podle Van Rinsuma – válcový
- Přístroj podle Nusselta – Kulový [14,17]

### **1.4.1. Měřicí přístroj podle Poensgena**

Přístroj se používá k měření tepelné vodivosti vzorku ve tvaru desek. Umožňuje měření vlákných, ale i sypkých materiálů. Mezi emitující a chlazenou deskou přístroje se utvoří tepelné pole, ve kterém je tepelný tok orientován ve všech místech stejně a to kolmo na zkušební desku. Zkouška je založena na měření tepelného toku a rozdílu teplot na povrchu vysílací a přijímací desky při stabilizaci tepelné výměny. Pro výpočet tepelné vodivosti slouží zjištění hodnot měrné plochy a tloušťky desky (vzorku) [8].

Přístroj je složen z vyhřívané desky, která se zahřívá elektrickou výhřevnou mřížkou. Dále pak z chladicí desky připojené k vodnímu oběhu opatřenému termostatem pro řízení teploty a teploměry pro odčítání hodnot. Celé zařízení se nachází ve skříni obklopené izolací (viz obr.: 7), pro zamezení vstupu vnějších tepelných vlivů z okolí.

Cirkulace vody je zajišťována pomocí čerpadel a její teplota je regulována termostatem. Elektrický příkon spotřebovaný na ohřev je sledovaný z hodnot napětí a proudu. Samotné měření teplotního spádu se provádí pomocí sady zbudovaných termočlánků, které se nacházejí na povrchu desek a jsou v přímém kontaktu se vzorkem [8,14].



Obrázek 7.: schéma měřícího zařízení dle Pongena [14].

#### 1.4.1. Měřicí přístroj podle Bocka

Přístroj vychází z podobného principu, jak tomu bylo při Pongenově způsobu měření. Znovu se tedy měří průtok tepla z vyhřívané desky skrz zkoušený materiál k chladicí desce. Jedná se o stacionární metodu. Měření probíhá za ustáleného stavu. Zařízení umožňuje měření vlákných materiálů.

Aparatura byla sestrojena tak, aby její obsluha a nastavování ustálených podmínek bylo co nejjednodušší a nejefektivnější. Zařízení je z části automatizováno a bylo navrženo jako jednoúčelový laboratorní stůl (viz obr.: 8). Funkční část horní desky má kruhový tvar a slouží k zahřívání vzorku a jeho měření. Funkční část je obklopena kompenzační deskou, kvůli eliminaci vnějších tepelných vlivů. Spodní deska je chlazená průtokem kapaliny[14,16].



*Obrázek 8.: Fotografie měřícího zařízení podle Bocka [16].*

Vzorky připravované pro měření musí mít přesah minimálně 20 mm oproti funkční části horní vyhřívané desky, která má průměr 120 mm. Z toho vyplývá, že tvar vzorku musí být buď kruhový, kopírující funkční tvar s přídatkem nebo čtvercový, kde musí být splněna stejná podmínka. Deskové metody jsou citlivé na paralelitu. Ta se projevuje převážně u pevných materiálů, kde může dojít ke vzniku mezery mezi měřícími segmenty a vzorkem. Díky tomu by mohlo v měření dojít k velkým nepřesnostem [14,16].

#### **1.4.2. Měřicí přístroj podle Van Rinsuma**

Měřicí metoda podle Rinsuma využívá dutou trubičku, ve které je elektrický zdroj tepla. Na ní se upevní izolační materiál, tedy zkoumaný vzorek. Na okrajích trubičky se používají boční čela, která eliminují tepelné ztráty. Měří se elektrický příkon

po ustálení, teplota na zahříváné trubičce a teplota na povrchu zkoušeného materiálu. Z tloušťky vzorku a předchozích hodnot se vypočítá součinitel tepelné vodivosti. Povrchové teploty se měří pomocí termočlánků, a to buď přímou metodou, nebo pomocí kompenzačních měření. Určení tepelné vodivosti se provádí zásadně v ustáleném stavu [14,16,17].

### **1.4.3. Měřicí přístroj podle Van Nusselta**

Nusseltova aparatura se skládá ze dvou kulových ploch vyrobených z velmi dobře tepelně vodivých materiálů například z mědi. Ve vnitřní kulové ploše se nachází keramické tělísko s topnou odporovou spirálou, která je rozmístěna rovnoměrně tak, aby teplo bylo emitováno rovnoměrně po celém povrchu. Druhá kulová plocha se nazývá plášť a je opatřena termočlánky, které měří teploty odizolované odvážené množství materiálu vzorku. Z teplotního rozdílu obou koulí a množství prostupujícího tepla se vypočítá tepelná vodivost vzorku.

Zařízení je využíváno k měření sypkých a vlákných materiálů, které se vytvarují dle tvaru vnitřního zařízení do kulové vrstvy. Důležité je, aby byl materiál roz distribuován rovnoměrně po celé ploše. Teplo emitované vyhříváním vnitřní koule prostupuje testovaným materiálem bez ztrát až k vrchní vrstvě, kde se zaznamenává pomocí wattmetru [14,16].

Ze základních typů měřících zařízení se postupem času inspirovala celá řada dalších měřících zařízení.

## **1.5. Nestacionární metody měření tepelných vlastností**

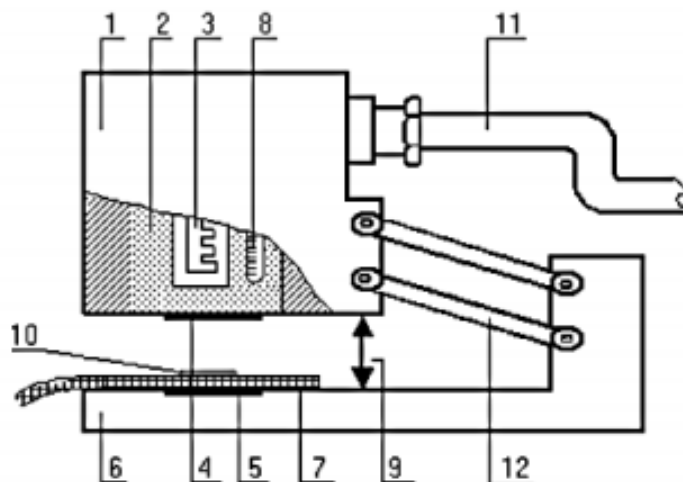
Dynamické metody měření tepelné vodivosti se zakládají na podobných principech jako je tomu u statických s tím rozdílem, že není třeba čekat na ustálení děje. Z toho vyplývá kratší časová náročnost těchto měření. Lze tak měřit i vliv vlhkosti na tepelnou vodivost

materiálu. Nicméně se tyto metody využívají spíše u tenkých plošných textilií [12,14,17].

### **1.5.1. Měřicí přístroj Alambeta**

Měřicí aparatura Alambeta je poloautomatické zařízení, které je schopné provádět měření a zároveň i vyhodnocení získaných výsledků. Vyhodnocení dat probíhá ve vlastním digitálním rozhraní zařízení, čímž je možné předejít chybám při zpracování dat. Přístroje měří vlastnosti vzorku jako je tepelná vodivost ( $\lambda$ ), tepelná jímavost ( $b$ ), tepelný odpor ( $r$ ), tloušťka materiálu ( $h$ ), teplotní vodivost ( $a$ ), maximální tepelný tok ( $q$ ) nebo poměr mezi maximálním a ustáleným tepelným tokem ( $p$ ). Může být tedy používán k měření jak statických, tak dynamických tepelných vlastností [14,16].

Alambeta měří tepelný tok skrze vzorek. Měření začíná v neustáleném stavu, je možné měřit až po ustálení. Měřený vzorek se vloží na spodní desku přístroje, která je temperována na teplotu okolí. Textilie se přimáčkne hlavicí, která je zpravidla vyhřívána na teplotu o deset stupňů vyšší než spodní deska. Po přitlačení hlavice se spouští senzor tepelného toku (viz obr.: 9). Zároveň se měří tloušťka vzorku, která je definována vzdáleností horní a spodní plochy zařízení. Před měřením je třeba hlavicí naprázdno zavřít a zkalibrovat tak nulový bod bez vzorku [16].

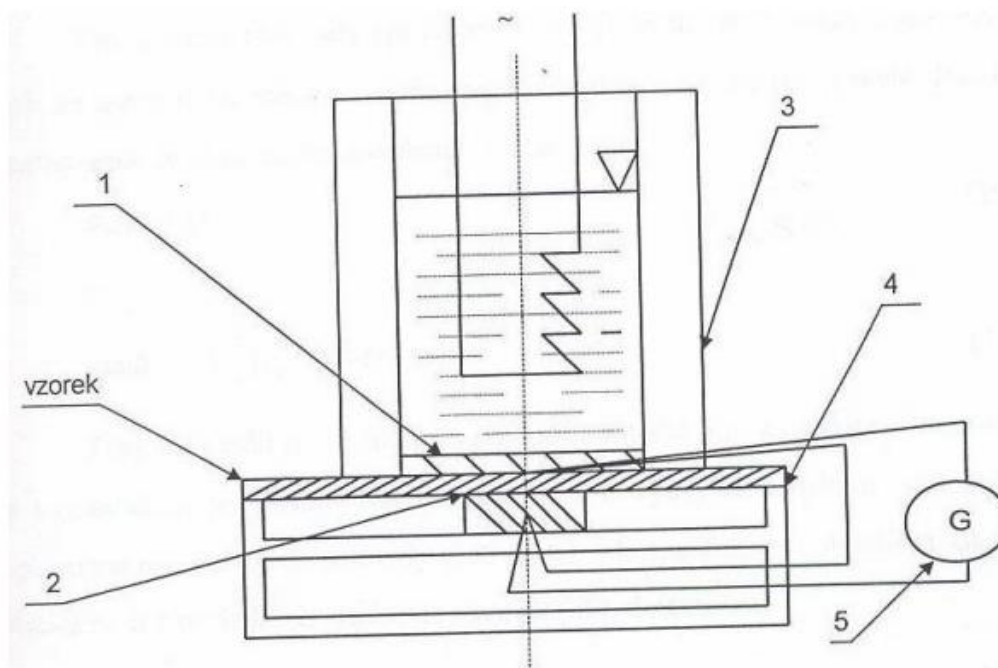


- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 1 - hlava přístroje       | 6 - spodní část                                  |
| 2 - termostat             | 7 - vzorek materiálu                             |
| 3 - topné těleso          | 8 - teploměr                                     |
| 4 - snímač tepelného toku | 9 - prostor mezi hlavou přístroje a spodní částí |
| 5 - vzorek materiálu      | 12 - paralelní vedení                            |

Obrázek 9.: schéma měřícího zařízení Alambeta [14].

### 1.5.2. Měření přístroj podle Fitcheho

Měření vodivosti podle Fitcheho se zakládá na proudění tepla z ohřivané nádoby na měrný válec skrz zkoušený materiál. Používá se pro tenké vzorky, jako jsou například usně a pryže. Vzhledem k malé tloušťce vzorku, lehké nepřesnosti vnášené termočlánky a malému rozdílu teplot mezi nádobami, je tato metoda méně přesná než ty statické. Přístroj se skládá z dvou válcových nádob (viz obr.: 10). Ve spodní části se nachází váleček přesahující nad izolační vrstvu zařízení, ve kterém je uložen termočlánek. Celý přístroj je izolován proti ztrátám do okolí a tepelným vlivům z okolí. Teplota se udržuje pomocí termostatu. V horní části nádoby je uložen druhý termočlánek. Po uplynutí doby určené pro měření se odečítá odchylka z galvanometru [12,14,16].



- 1 - měděná deska
- 2 - měděný váleček
- 3 - horní nádoba
- 4 - krabice v níž je izolován měděný váleček
- 5 - galvanometr

Obrázek 10.: schéma měřícího zařízení dle Fitcheho [14].

## 1.6. Druhy vláken

Netkané textilie zažívají poslední dobou velkou expanzi využití napříč všemi odvětvími. Tomu napomáhá to, že pro výrobu netkaných textilií je možno zpracovávat takřka všechny známé typy konvenčních vláknenných materiálů. Vlastnosti vláken jsou jedním z určujících faktorů pro výsledné vlastnosti finální netkané textilie. Základní suroviny, tedy vlákna i celá technologie jejich zpracování, se volí dle účelu použití. Vlákna mohou být jak přírodního tak i syntetického původu. Syntetická vlákna jsou velmi populární vzhledem k jejich nízké ceně. Základní členění vláken dle původu si rozebereme dále.

➤ **Přírodní vlákna**

- **Živočišného původu:** například ovčí vlna, kašmír
- **Rostlinného původu:** například bavlna, konopí

Vlákenný materiál získaný záběrem v přírodě nebo stříháním a zpracováním chlupů zvířat.

➤ **Vlákna z přírodního polymeru**

- například viskózová, acetátová vlákna

Vlákna připravená chemickou cestou z přírodních materiálů, typicky macerací kůry stromů

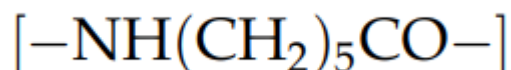
➤ **Vlákna ze syntetického polymeru**

- například polyamidová, polypropylen

Vlákna připravena ze synteticky získaného polymeru [18].

### 1.6.1. Polyamid - PA 6

Polyamidová vlákna se v textilním průmyslu objevují hojně, nejčastěji se používají vlákna vyrobená z polyamidu 6 (viz obr.: 11) a polyamidu 66. Tyto vlákna jsou tvořena lineárními řetězci, které obsahují amidové skupiny. Hlavním rozdílem mezi nimi je právě počet amidových skupin, což ovlivňuje i výsledné vlastnosti vlákna. Nejčastěji se zpracovávají termoplasticky. Je stálý v běžných rozpouštědlech, ale je rozpustný ve fenolech, kyselině mravenčí nebo octové [18]. Těchto vlastností bylo využito při přípravě vlákenné vrstvy z polyamidu 6 v experimentální části.



Obrázek 11.: Vzorec strukturní jednotky polyamidu 6 [19].

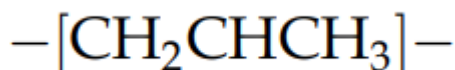


### **Vlastnosti PA 6:**

- Dobrá odolnost vůči olejům a rozpouštědlům
- Dobrá pevnost, houževnatost a odolnost vůči oděru
- Polyamidy jsou navlhavé
- Dobrá pevnost i za mokra
- Dobrá stálost na světle (odolnost proti ultra fialovému záření )
- Teplota tání u PA 6 - uvádí se 220 °C [18,19]

### **1.6.2. Polypropylen - PP**

Polypropylen se vyrábí polymerizací propenu za přítomnosti katalyzátorů. Pro výrobu vláken se využívá pouze jedné ze tří konformací a to izotaktická. To znamená stejně orientované částice v makromolekule. Přibližně 20 % světové produkce se zpracovává do formy vláken. V číslech to znamená produkci zhruba 6 milionů tun ročně. Pro výrobu polypropylenu (viz obr.: 12) se využívá vedlejších produktů při zpracování ropy. Tím je vysvětlena relativně nízká pořizovací cena tohoto materiálu. Polymerizovaný polotovár se taví v extruderech a vytlačuje přes trysku. Výsledné jemnosti se zpravidla dosahuje dlužením a velikostí trysek extrudéru [18].



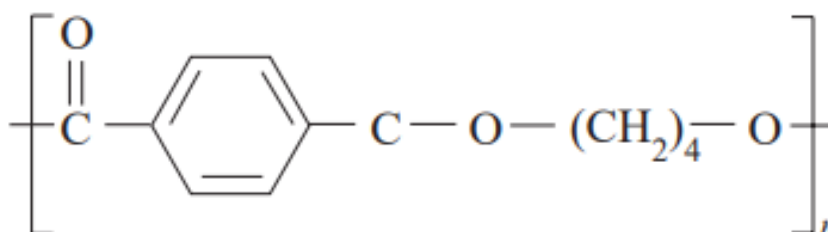
*Obrázek 12.: Vzorec strukturní jednotky polypropylenu [19].*

### **Vlastnosti PP:**

- Výborná odolnost vůči chemikáliím, dlouhodobou expozicí vůči olejům dochází k degradaci
- Minimální navlhavost vláken
- Horší odolnost vůči ultrafialovému záření
- Horší zotavovací vlastnosti po namáhání
- Teplota tání TT – uvádí se okolo 170 °C [18,19].

### 1.6.3. Polyester - PES

Polyester mezinárodně označovaný zkratkou PES se vyrábí chemickou metodou zvanou polykondenzace. Vzniká reakcí dvou vstupních prvků, dimethyltereftalátu a glykolu. Pro zpracování do formy vláken se polykondenzát taví a zvlákňuje vytlačováním přes speciální lišty (trysky). Dle parametrů trysek a následného dloužení se definuje jejich geometrie a průměr. Vyrobená vlákna se dále stříhají, popřípadě jinak oddělují, podle požadavku na jejich délku. Polyesterová vlákna (viz obr.: 13) se vyznačují poměrnou tuhostí, která je vhodná při následném procesu zpracování na mykacím stroji [18].



Obrázek 13.: Vzorec strukturní jednotky polyesteru [19].

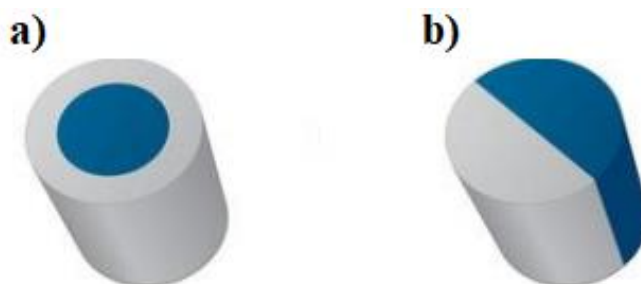
#### Vlastnosti PES:

- Velmi dobré zotavovací vlastnosti po namáhání
- Vysoká objemnost a pružnost
- Dobrá odolnost vůči chemikáliím, s výjimkou expozice silných kyselin a zásad
- Teplota tání TT - uvádí se okolo 255 °C [18,19].

### 1.6.4. Bikomponentní vlákenné pojivové – Bico

Bikomponentní vlákna se nejčastěji vyrábějí z dvou druhů syntetického polymeru, které jsou taveny a vytlačovány z extrudéru skrze speciálně upravené trysky. Tím se docílí jednoho vlákna ze dvou komponent (viz obr.: 14). Trysky mohou vyrábět jednoduchý kulatý průřez vláken nebo různě tvarovaná vlákna. Mezi nejčastěji používané druhy

patří vlákna vyrobená metodou jádro-plášť nebo bok po boku. Vlákna vyrobená těmito metodami se následně používají jako pojivo pro netkané textilie [18].



*Obrázek 14.: Vizualizace bikomponentních vláken: a) připraveno metodou jádro-plášť b) připraveno metodou bok po boku [28].*

Principiálně se využívá dvou polymerů, z nichž jeden má výrazně nižší teplotu tání než druhý. Nejpoužívanější kombinací je polyester/kopolyester, kde polyeester má teplotu tání vyšší než je tomu u kopolyesteru. Při expozici tepla dochází k roztavení kopolyesteru, který přechází do míst křížení vláken, čímž vznikají bodové spoje. Bikomponentní vlákna můžeme používat samotná, kde se po zahřátí roztaví kopolyester a polyester zůstane nezměněný nebo častěji ve směsi s dalšími vlákny. Spoje vznikají pouze místně a tím textilie zůstává objemná a pružná. Soudržnost takového výrobku je dostačující, nicméně není vhodná do všech aplikací [18,19].

## **1.7. Netkaná textilie**

Oficiální definice netkané textilie prochází vývojem tak, aby do ní bylo možné zařadit všechny materiály, které tomu odpovídají a zároveň byly vyseparovány materiály za hranou, jak se uvádí ve zdroji:

*„ Netkaná textilie je vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, spojených třením, kohezí nebo adhezí s výjimkou papíru a výrobků vyrobených tkaním, pletením, vsíváním, proplétáním nebo plstěním ” [18].*

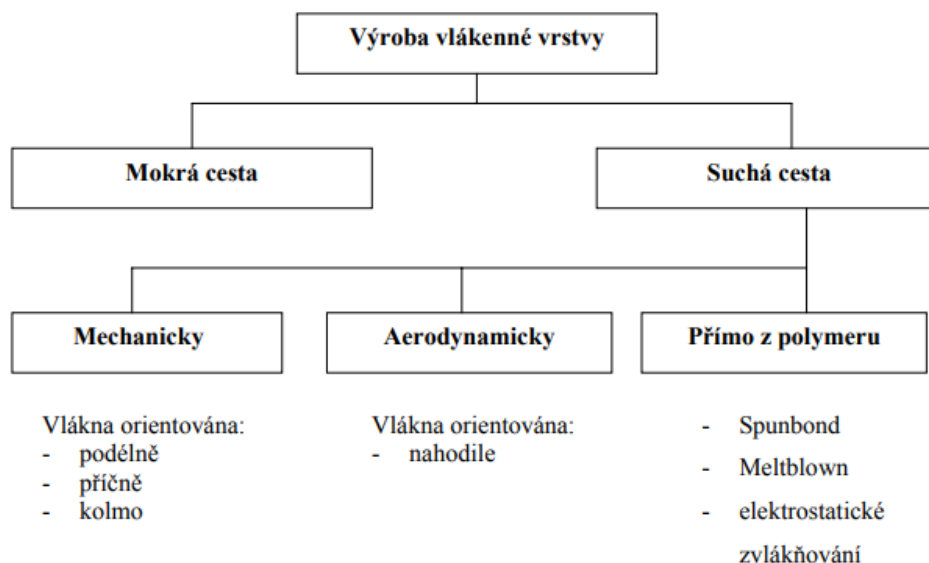
Pod tímto označením se ukrývá nepřeberná paleta variací. Netkané textilie v poslední době stále více expandují do všech možných odvětví a aplikací. Mezi jejich devízu patří zejména jejich nízká cena a efektivita produkce. Jejich hojné využití je reprezentováno výčtem pár zajímavých aplikací, jako jsou například membrány. Dále se v praxi využívá jejich vlastností pro vyztužení materiálů, velké uplatnění nacházejí i v biomedicině či přímo medicíně a výrobě hygienických potřeb. Při oproštění se od jejich účelu použití se dále zkoumají a sledují se jejich vlastnosti. To napomáhá k rozvoji stávajících nebo vymýšlení nových lepších vlastností za pomoci různých modifikací ať už vstupních vláken nebo výsledné netkané textilie [18,20,21,22].

Vzhledem k aktuální situaci je netkaná textilie nedílnou součástí jednorázových ochranných prostředků dýchacích cest. Pro netkané textilie lze použít i materiály, které by konvenčními metodami byly obtížně zpracovatelné.

### **1.7.1. Výroba vlákenné vrstvy**

Netkané textilie se dají dělit mnoha způsoby, základním způsobem dělení je dle principu technologie výroby vlákenné vrstvy (viz obr.: 15). Z přiloženého schématu je patrné, že je možno vyrábět netkanou textilií mokrou a suchou cestou. Toto dělení určuje technologické procesy využitě pro vznik vlákenné vrstvy.

Utváření vlákenné vrstvy je prvním a velmi důležitým krokem při výrobě netkané textilie. Jednotlivé metody se mohou různě kombinovat například kombinace vznikající spojením mechanického a aerodynamického účinku [18,22].



Obrázek 15.: *Schéma nastiňující rozdělení technologických způsobů výroby NT [18].*

### **Mokrý cesta**

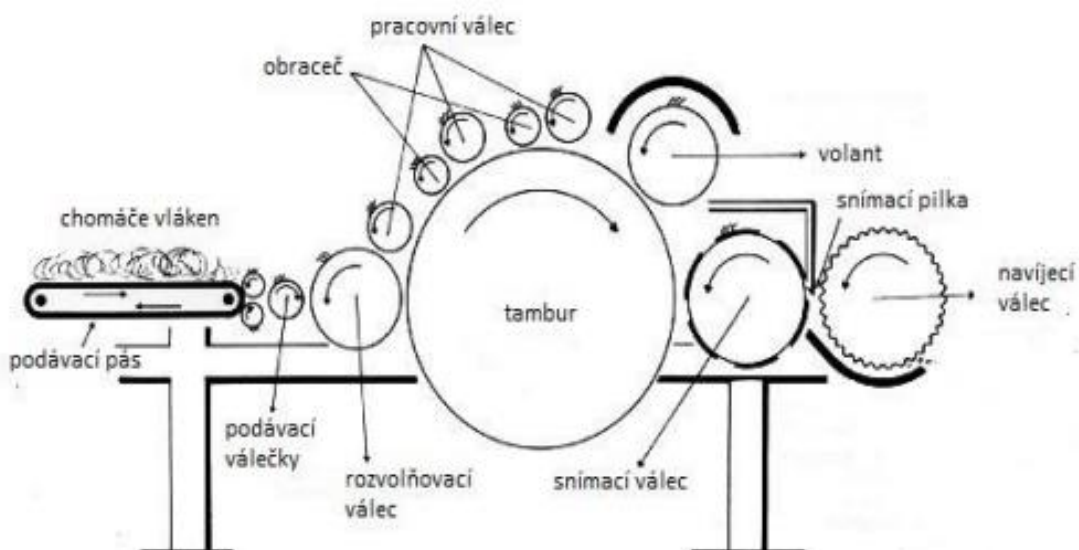
Mezi hlavní zástupce mokré cesty patří naplavování, tedy způsob kdy jsou vlákna rovnoměrně dispergována v kapalném médiu a zachytávána na sběrný kolektor (nejčastěji perforovaný pásový dopravník). Dopravník zároveň určuje, jakou bude mít výsledná netkaná textilie strukturu. Umožňuje vyrábět netkanou textili z krátkých vláken podobnou papíru. Tato technologie je limitována délkou vláken, kde objem kapaliny musí být takový, aby se vlákna mohla volně pohybovat, tedy čím delší vlákna tím může být zpracováván menší poměr vláken vs. medium. Další nevýhodou je nutnost sušení vlákenné vrstvy, která je po zachycení mokrá. Což zvyšuje energetickou náročnost výrobního procesu. Zpravidla se pro sušení využívá vyhřívaných válcových kalandrů, které působením tlaku vymačkávají přebytečnou kapalinu a působením tepla suší vzniklou netkanou textili. Zároveň mohou sloužit i k jejímu pojení vlivem zahřívání vláken s nižší teplotou tání.

## **Suchá cesta**

Suchá cesta je využívána častěji, protože odpadají vysoké energetické nároky na sušení a filtraci media. V důsledku čehož jsou netkané textilie vznikající suchou cestou levnější a tím pádem je jejich aplikace rozšířenější [18,21].

### **1.7.2. Mykání vlákenné vrstvy**

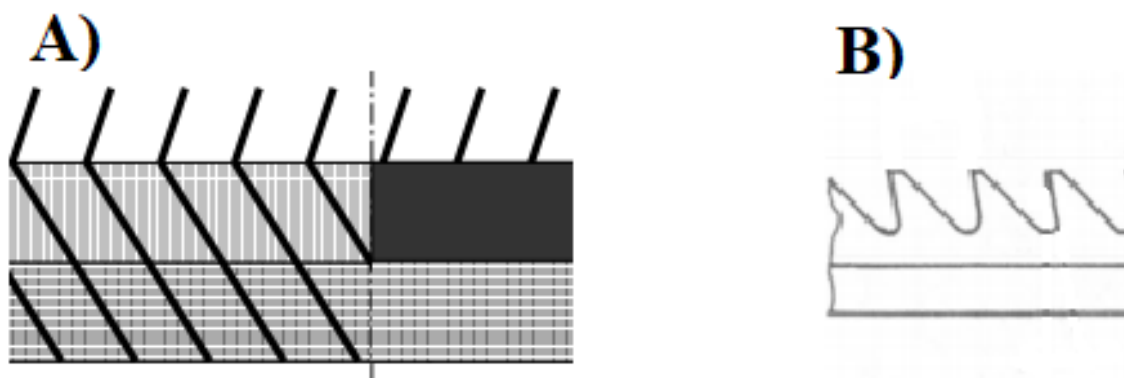
V této části se budeme zabývat výrobou netkané textilie suchou cestou, konkrétně její mechanickou linií. Tento způsob bude rozveden záměrně a to z důvodu, že jej bylo využito v experimentální části této práce. Hlavním principem mechanického principu tvorby vlákenné vrstvy pro netkanou textilií je zpracování vláken na mykacím stroji. Mykání je první operace technologických postupů, kde se z nesourodé směsi chomáček vláken vyrobí délková textilie. Mykací stroje se dělí do dvou skupin dle vlákenného materiálu, který se jim předkládá a to na bavlnářské a vlnářské. Rozdíl mezi nimi je v pracovním ustrojí stroje, bavlnářské využívají víčka, kdežto vlnářské používají válce. Pro výrobu netkané textilie se používají spíše stroje vlnářské s pracovními válci (viz obr.: 16), které mohou mít větší šíři a zároveň jejich rychlost a výkon jsou vyšší. Zároveň jsou vhodnější pro zpracování syntetických vláken, kterých se pro výrobu netkaných textilií využívá hojně [18].



*Obrázek 16.: Schéma válcového mykacího stroje pro zpracování chomáček vláken [28]*

### 1.7.3. Mykací stroj válcový

Mykací stroj mechanicky zpracovává předkládané chomáčky vláken, které se zachytávají na pracovní povrch válců, používají se válce opatřené drátkovým nebo pilkovým povlakem (viz obr.: 17). V poslední době se výrobci více přiklánějí ke konceptu s pilkovým povlakem, který zvyšuje životnost potahů. Potahy válců jsou dimenzovány vzhledem ke zpracovávanému, materiálu výměna povlaku je sice možná nicméně se považuje za velmi nákladnou. Proto je vhodné při poptávání konkrétního zařízení využít doporučení dodavatele, který má zkušenosti a je schopen doporučit vhodný povlak pro konkrétní využití [18,20].



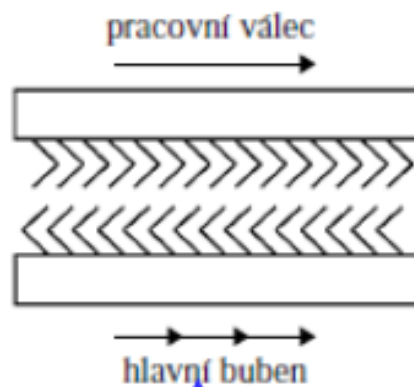
Obrázek 17.: Schéma povlaků mykacích strojů a) drátkový; b) pilkový povlak [18].

Samotné procesy mykání probíhají vždy mezi dvojicemi válců. Postavením povlaků vůči sobě se řídí, jakou roli bude pracovní místo vykonávat. Parametry, které ovlivňují mykání, jsou mezera mezi válci, hustota drátků nebo počet hrotů pilek povlaku a v neposlední řadě rychlost otáčení jednotlivých válců a směr jejich otáčení. Jemnost povlaků a jejich hustota se odvíjí od jemnosti zpracovávaných vláken.

➤ **Poloha na mykání**

Probíhá mezi hlavním válcem (tamburem) a pracovním válcem.

Povlaky jsou špičkami drátků nebo pilek směřovány proti sobě, hlavní válec má výrazně vyšší obvodovou rychlost a oba válce se otáčejí shodným směrem. Vlákna jsou zachytávána, ojednocována a rovnána do směru otáčení (viz obr.: 18).

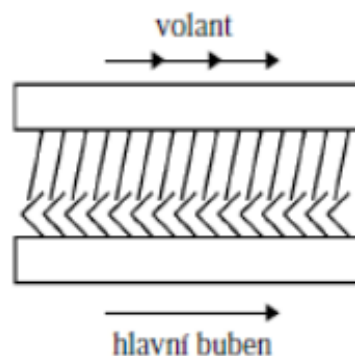


Obrázek 18.: *Schéma drátkových povlaků při poloze na mykání [18].*

➤ **Poloha na povyčesávání**

Probíhá mezi hlavním válcem (tamburem) a volantem

Volant je výrazně rychlejší a otáčí se ve stejném směru jako tambur, čímž dochází k vyzvedávání vláken na povrch povlaku hlavního bubnu. V tuto chvíli jsou vlákna připravena k sejmutí (viz obr.: 19) [18,21].



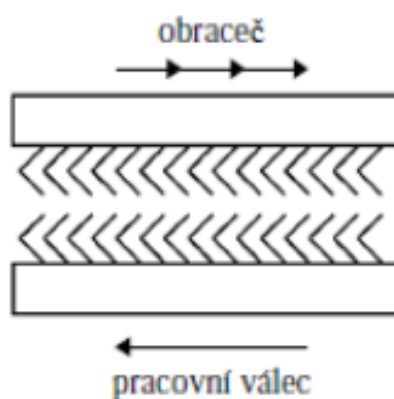
Obrázek 19.: *Schéma drátkových povlaků při poloze na povyčesávání [18].*



➤ **Poloha snímání**

Probíhá mezi pracovním válcem a obracečem

Špičky povlaků směřují stejným směrem, rychlost obraceče válce je výrazně vyšší a válce se vůči sobě otáčejí opačným směrem. Funkcí povlaků tohoto válce je především transport vláken z jednoho válce na druhý. Tedy jejich sejmutí z pracovního válce a přenesení na válec hlavní (viz obr.: 20).



Obrázek 20.: *Schéma drátkových povlaků při poloze na snímání [18].*

Drátkové povlaky se mohou lišit tvarem drátků, jejich tloušťkou a v neposlední řadě jejich hustotou na jednotku plochy. Účinek mykání se zvyšuje s hustším zaplněním povlaku drátky, při zmenšování mezery mezi jednotlivými válci a zvyšováním obvodových rychlostí pracovních válců. Dále značně závisí na délce obloukovitosti vstupních vláken, vlákna se mohou povrchově upravovat pro jejich snazší zpracování. Vyšší obvodová rychlost a menší mezera mezi válci však může vést k poškození většího množství vláken. Při zpracování jemných vláken na hrubším povlaku dochází k tvorbě nesteroměrností ve vzniklé pavučince. Naopak při zpracování hrubších vláken jemným povlakem dochází k jeho rychlejšímu opotřebení. Mykáním vzniká vlákenná pavučinka, ve které jsou vlákna orientována především ve směru otáčení válců, taková struktura se nazývá anizotropní, mechanické vlastnosti jsou rozdílné a závisí na směru namáhání[18,20].

#### 1.7.4. Kladení vlákenné vrstvy

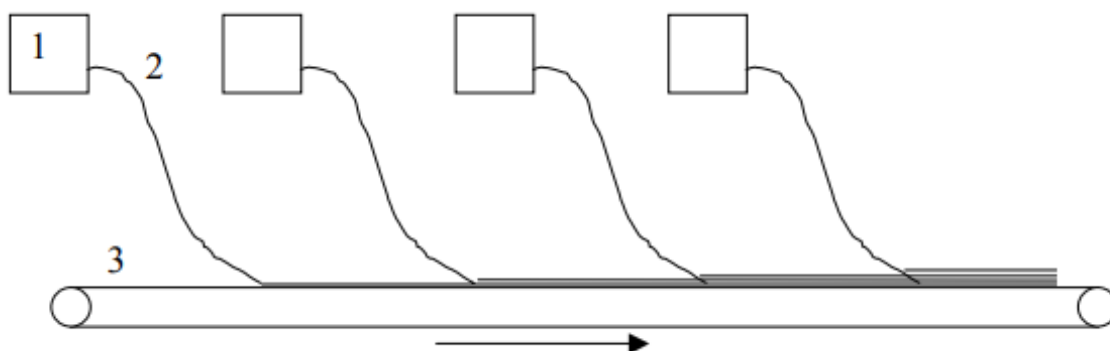
Pavučinka získaná z procesu mykání je velmi tenká a lehká a její soudržnost se zakládá čistě na tření mezi vlákny, tím pádem je náchylná k poškození. Její plošná hmotnost se pohybuje v řádech jednotek až nízkých desítek gramů na metr čtvereční. Z těchto faktů vyplývá potřeba dalšího zpracování vlákenného polotovaru. Nejčastěji se využívá kladení několika vrstev na sebe. Vrstvením několika vrstev pavučinky je docíleno i lepší stejnoměrnosti výsledného produktu. K nestejnoměrnosti by mohlo dojít například špatným ojednocením shluku vláken, které by zapříčinilo v daném místě přebytek vláken. Technologie kladení se s výhodou zařazuje přímo k mykacímu stroji, takzvaně online. Vyrobená pavučinka se tedy rovnou dále zpracovává a eliminuje se tak její znehodnocení. Kladení se dělí dle směru, ve kterém je vlákenná pavučina ukládána a dle směru vláken [18].

##### ➤ Podélné kladení

Principu podélného kladení se využívá především kvůli jednoduchosti jeho procesu. Základním způsobem, získávání podélně kladené vrstvy je sběr vlákenné pavučinky, která se namotává na navíjecí válec. Navíjecí válec se zařazuje přímo za mykací stroj a slouží jako kolektor vyrobené vlákenné pavučinky. Tento způsob kladení není kontinuální, po navinutí určitého množství se musí vlákenný materiál rozstříhnout a sejmut. Z toho vyplývá, že rozměr výsledné vlákenné vrstvy je definován velikostí respektive průměrem válce. Používá se spíše pro laboratorní a výukové účely, kde se nedbá na produktivitu. Na druhou stranu se dá takto připravit vlákenná vrstva o vyšší plošné hmotnosti. Lehkou nevýhodou může být i ovlivnění jemné pavučinky, která ještě není nikterak zpevněná při sejmutí.

V průmyslovém měřítku se častěji používá podélné vrstvení netkaných textilií o malé plošné hmotnosti, udává se do sto gramů na metr čtvereční. To je způsobeno převedením na kontinuální provoz tím, že vrstvení probíhá zařazením několika strojů vyrábějících vlákennou vrstvu za sebe (viz obr.: 21). Finální plošná hmotnost je tedy součtem plošných hmotností jednotlivých pavučinek. Tento koncept se stává

kontinuálním a tím efektivním pro výrobu, to je však vyváženo vysokými náklady na mnoho strojů vytvářejících pavučinku a dále pak na zástavbovou plochu celkové linky [18,22].

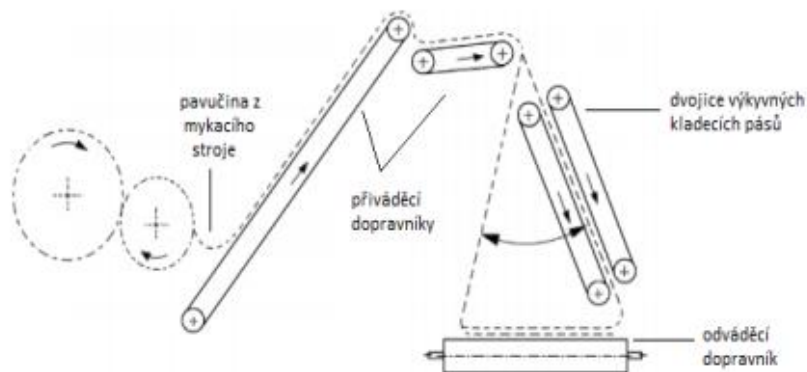


Obrázek 21.: Schéma linky pro podélné kontinuální kladení vláknenné vrstvy [18].

#### ➤ Příčné kladení

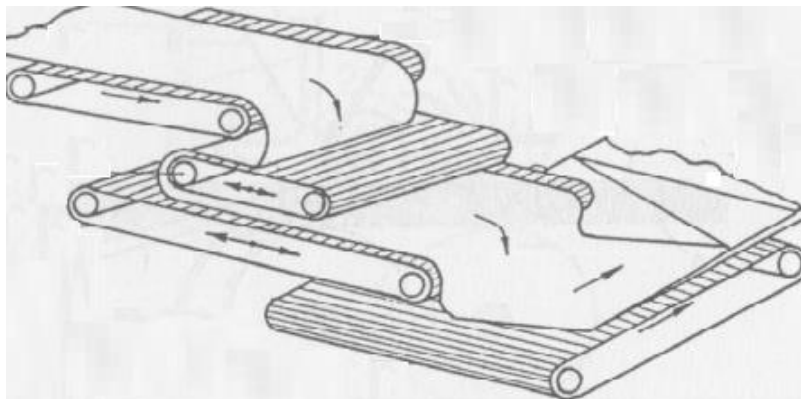
Do příčného kladení patří dva základní způsoby vertikální a horizontální. Plošná hmotnost se vždy odvíjí od plošné hmotnosti vláknenné pavučinky na vstupu, šíři odváděcího pásu, potažmo výsledné vláknenné vrstvy a rychlosti otáčení odváděcího dopravníku.

Vertikální kladeč (viz obr.: 22) je tvořen soustavou přívodních dopravníků vláknenné pavučinky. O ukládání se stará dvojice dopravníků v těsné blízkosti, které kromě rotačního pohybu dopravníku také vykonávají výkyvný pohyb, čímž dochází ke skládání na odváděcí dopravník. Čím větší šíře skladu, tím vyšší musí celý mechanismus být, proto se tento způsob příliš nepoužívá.



Obrázek 22.: *Schéma vertikálního ukládání vlákenné pavučinky [28].*

Horizontální kladeč se skládá ze soustavy čtyř dopravníků (viz obr.: 23). První funguje jako dopravník vlákenné pavučinky, druhý má funkci regulační, zajišťuje aby byla pavučinka stále napnutá a nedocházelo k jejímu přehybu během toho, co další dopravník utváří sklady na odvodový pás.



Obrázek 23.: *Schéma horizontálního ukládání vlákenné pavučinky [18]*

#### ➤ **Kolmé Kladení**

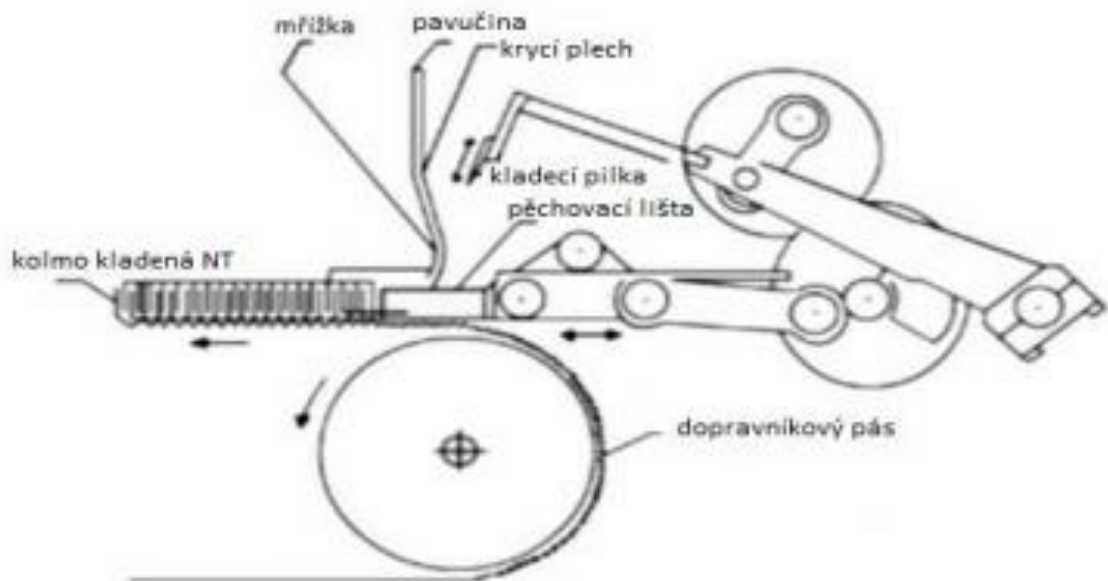
Impulzem pro koncept kolmého kladení bylo získání netkané textilie, která disponuje vysokou objemovou hmotností a zároveň zajišťuje dobré mechanické vlastnosti především pak tuhost a odolnost proti stlačení. Způsob, jak se toho může dosáhnout, je skládat pavučinku kolmo k ploše netkané textilie. Pro výrobu kolmo kladených netkaných textilií se v zásadě používají dva druhy strojů rotační a vibrační [18].

### Rotační kladeč

Princip rotačního kladení se realizuje pomocí pracovního kotouče, který nabírá vláknennou pavučinku pomocí malých hrotů. Pavučinka je hrnuta až k čelu vznikající netkané textilie, tedy k předchozímu skladu, kde je sejmuta z kotouče za pomoci geometrie kotouče a soustavy drátků dopravního roštu [18].

### Vibrační kladeč

Vibrační metoda je pojmenována podle pohybu kladeční pilky (viz obr.: 24), která koná vratný pohyb, během kterého uchopuje vláknennou pavučinku. V horní úvrati zachytí pavučinku a stahuje jí k dopravnímu pásu, kde jí zachytává pěchovací lišta, na které jsou hladké jehly. Jehly napomáhají při sejmutí pavučinky, zároveň přitlačením pěchovací lišty k předchozímu skladu dochází k tvorbě kolmo kladené netkané textilie [18].



Obrázek 24.: Schéma kolmého kladení vláknenné pavučinky vibrační metodou [18].

## 1.8. Nanovláknenná vrstva

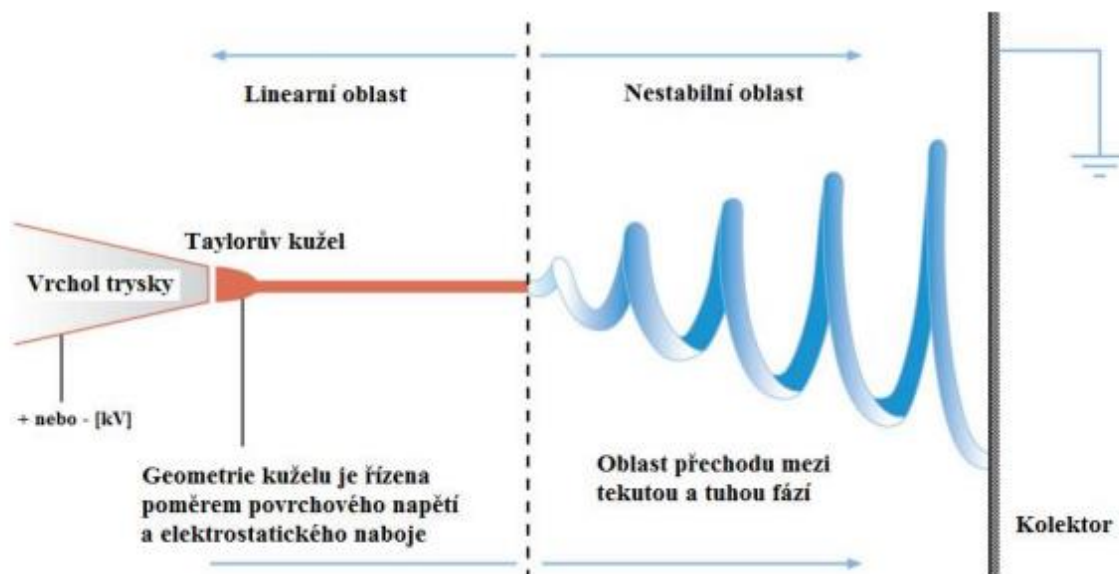
Předpona nano značí rozměr  $10^{-9}$ . Materiály potažmo vlákna, která se mohou označovat za nanovlákna by měla mít průměr vláken v řádu desítek až stovek nm. Přesná definice se liší dle zdroje, ze kterého se čerpá. Nejčastěji se hranicí průměru považuje

do 1  $\mu\text{m}$  [23]. Jsou však i zdroje, které jsou mnohem přísnější a označují tak vlákna do 100 nm [24].

Nanovlákna se považují za slibný materiál budoucnosti. Cílovou skupinou jejich aplikací může být velké množství oborů. Ve zdravotnictví by se mohl využít jejich potenciál jako ochranné bariérové pomůcky, nosiče léčiv či podpůrnou strukturu pro podporu růstu tkáně ve formě scaffoldů. V průmyslu na filtraci kapalin či vzduch, díky jejich velkému měrnému povrchu a miniaturním pórům[24].

### **1.8.1. Elektrostatické zvlákňování**

Při elektrostatickém zvlákňování se využívá vysokého elektrického napětí, které se přivede na kapiláru jehly nebo jinou zásobárnu zvlákňovacího roztoku. Vlivem vysokého rozdílu potenciálů mezi ním a kolektorem dochází ke změně geometrie kapičky u jehlové nebo volné plochy u bezjehlové metody. Vlivem změny geometrie dochází k utváření kužele, který se protahuje až do doby překročení hodnoty kritického napětí, pokud se napětí zvyšuje i nadále, dochází k vytahování vlákna z vrcholu kužele. Tvorba vlákna má dvě části (viz obr.: 25) lineární, kde dochází k zeštíhlování průměru, ale stále se jedná o roztok a druhou nestabilní, kde vlivem kmitání dochází k dalšímu dloužení a zároveň vysychání rozpouštědla. Pro zachytávání vzniklých vláken se používá uzemněný kolektor, nejčastěji železná destička [23].



Obrázek 25.: Schéma fází tvorby nanovláken během elektrostatického zvlákňování z jehly [23].

Za nejvíce známou a dnes již poměrně dobře zmapovanou metodou přípravy nanovláken se považuje elektrostatické zvlákňování. Metoda se vyznačuje velkou univerzálností pro zvlákňované roztoky polymerů. Mezi hlavní zástupce patří jehlové a bezjehlové zvlákňování. Oba způsoby využívají zdrojů vysokého napětí stejnosměrného proudu.

➤ **Jehlová metoda elektrostatického zvlákňování**

Při této metodě dochází k tvorbě pouze jednoho kužele respektive trysky. Z tohoto důvodu je efektivita produkce značně omezená.

➤ **Bezjehlové elektrostatické zvlákňování**

Při bezjehlové metodě, se využívá destabilizace hladiny polymerního roztoku. Dochází k tvorbě mnoha trysek, to zlepšuje efektivitu procesu a zvyšuje se schopnost produkce. Z tohoto principu vychází například Nanospider.

### **1.8.2. Nanospider**

Pod pojmem Nanospider se ukrývá patentovaná technologie elektrospinningu, která byla vyvinuta a patentována na Technické univerzitě v Liberci v roce 2003 týmem profesora Jirsáka a následně odkoupena firmou Elmarco. Patentovaný princip zvlákňování z roztoků či taveniny, založený na využití vysokého elektrostatického pole působící na volnou hladinu roztoku či taveniny. Jak již bylo v předchozím textu zmíněno, zvlákňování z volné hladiny má výhodu, že vzniká více Taylorových kuželů, čímž vzrůstá efektivita výroby oproti jehlovému způsobu. Primární způsob byl založen na brodění válečku zásobním roztokem, kde jeho otáčením docházelo k vynášení tenké vrstvy roztoku. Ke zvlákňování docházelo v místě nejmenší vzdálenosti mezi obvodem válečku, který byl kladně nabitý a kolektorem, jež byl uzemněn. Nad kolektorem se pohybuje netkaná textilie, která zachytává nanovláknennou vrstvu a tvoří ji oporu. Od té doby vzniklo mnoho variant zvlákňovacích elektrod, které vycházejí z totožného principu [25].

### **1.8.3. Střídavé zvlákňování**

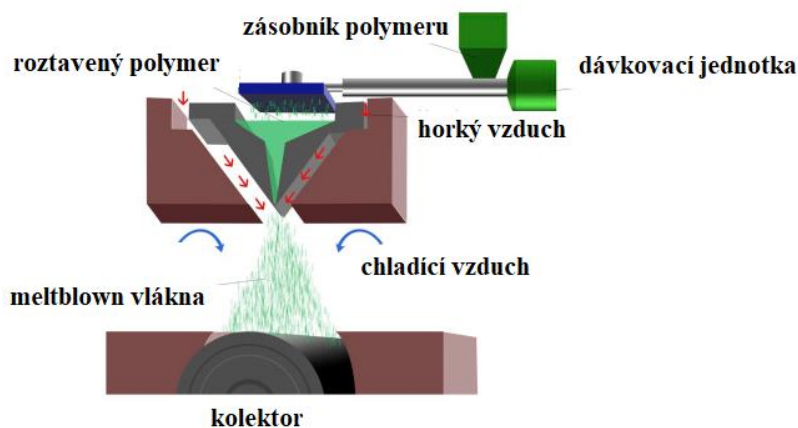
Pro střídavé zvlákňování (AC electrospinning) se využívá elektroda, která je zásobována zvlákňovaným roztokem uvnitř tyčinky. Na jejím vrcholu dochází k tvorbě volné hladiny, ze které dochází k procesu zvlákňování z volné hladiny. Vlivem působení zdroje vysokého napětí dochází k přeorientaci roztoku polymeru a utváření Taylorových kuželů. Zdroj využívá standardní frekvence napětí tedy (50 Hz) a na tyčinku přiváděné efektivní napětí okolo 30 kV. Při střídavém zvlákňování dochází k tvorbě jemných vláken zapletených mezi sebou (při pozorování připomínající mlhu). V literatuře se tento produkt nazývá nanovláknenná vlečka. Vlivem rychle se měnící polarity střídavého proudu dochází k tvorbě úseků vlečky s rozdílným nábojem, předchozí vlákna fungují jako kolektor. Při této metodě není třeba využívat běžné kolektory. Vlečka se vznáší prostorem do doby, než se zachytí a dále zpracovává. Střídavé zvlákňování je v porovnání s jinými metodami používajícími stejnosměrný proud efektivnější [26].



## 1.9. Meltblown

Dalším způsobem přípravy velmi jemných vláken, kde se získávají vlákna v řádech nano až mikrometrů, je metoda meltblown. Standardně se vyrábí vlákna o průměrech dva až čtyři mikrony, optimalizací parametrů se může docílit vláken o průměrech desetiny mikrometru až mikronu. Název technologie pochází z angličtiny, kde melt znamená tavit a blown foukat. Počátek rozvoje zpracování termoplastů touto technologií se datuje do 80. let minulého století. Pro výrobu metodou meltblow jsou polymery speciálně upravovány tak, aby jejich index toku byl vyšší než běžně používané [18,20].

Proces výroby vláken metodou meltblown se skládá z vyhřívaného extrudéru, ve kterém začíná proces plastifikace granulátu. V něm se otáčí šnek, vlivem čehož dochází k tření, které působí jako další zdroj tepla a zároveň se tavenina vlivem otáčení homogenně promísí. Pomocí zubového čerpadla je již dokonale roztavený polymer přiváděn ke zvlákňovací hlavě. Ta se skládá z lišty opatřené mnoha jemnými otvory pro vytlačování polymeru a dvou přívodů horkého vzduchu. Po vytlačení se polymer ztrhává proudem teplého vzduchu, což má za následek dloužení, tedy zmenšování průměru vláken až do momentu, kdy se přetrhnou a následně se rozptýlí na plochu dopravního pásu. Vlákenná vrstva zachycená na páse je objemná a nedisponuje vysokou soudržností, z toho důvodu se přímo za pás zařazuje pojení (viz obr.: 26). Finální výrobek se namotává do role návinu pro snadnější manipulaci [18,27].



Obrázek 26.: Schéma výrobní linky pro průmyslovou výrobu metodou meltblown [27]

## 1.10. Druhy pojení netkaných textilií

Pro výrobu netkaných textilií je velmi důležitou součástí procesu spojení vyrobených vláknenných vrstev materiálů do soudržného útvaru. Za tímto účelem se využívá pojení, v zásadě rozeznáváme tři druhy pojení.

### ➤ Mechanické

- Mechanickým působením dochází k proplétání vláken jednotlivých vrstev, soudržnost je realizována pomocí působením třecích sil mezi vlákny.
- Mezi zástupce této technologie spadá například vpichování nebo proplétání.

### ➤ Termické

- Termickým působením na vláknenný materiál dochází k částečnému natavení vláken, která následně zvyšují místní soudržnost netkané textilie.
- Mezi zástupce této technologie spadá například kalandrování nebo lisování.

### ➤ Chemické

- Chemická pojiva umožňují vytvoření spojů s velkými adhezními silami.
- Zpravidla je obtížné pojit objemnější textilie, kde dochází k ulpívání pojiva na povrchu netkané textilie. Při postřiku je nutné po impregnaci zajistit sušení.
- Mezi zástupce této technologie spadá například impregnace nebo postřik.

V případě, že je zapotřebí materiál s vyšší soudržností, může být využito jejich kombinace. Například chemického a termického pojení, kde kalandr plní funkci termického pojení a zároveň zbavuje netkanou textilií přebytečné kapaliny z impregnace [18,21].

### 1.10.1. Termické pojení lisováním

Termické pojení vláknenné vrstvy se zakládá na principu zvyšování soudržnosti vyvolané působením tepla. Vlivem teploty dochází k roztavení části vláken nebo

k roztavení složky s nižší teplotou tání. Tavící složkou mohou být přídavná pojivá vlákna například rozemletý polymer ve formě prášku a jiné. Hlavními parametry tepelného pojení jsou teplota působící na netkanou textilii, doba expozice tepelnému zdroji a přítlak. Jako zdroje tepla se při tepelném pojení využívá různých metod, například vyhřívané kalandrovací válce, infračervené záření nebo horký vzduch pro kontinuální produkci. Pokud není vyžadována kontinuální výroba, lze zvolit tepelný lis, který působí na vlákennou vrstvu tlakem s pomocí vyhřívaných topných desek. Po skončení pojení dochází k ochlazení roztaveného pojiva a vytvoření spoje [23, 28].

Pojení pomocí hydraulického lisu vyhřívaného odporovými topnicemi se považuje za metodu, kdy se dají snadno ovlivňovat parametry pojení. Vrchní i spodní deska obsahuje sadu topnic, z nichž se každá může regulovat. Tím se zajišťuje přesně regulovatelná teplota, symetrická v celé ploše lisu. Při lisování se může regulovat i samotná tloušťka netkané textilie, to je vhodné pro objemné textilie, kde požadujeme snížení výsledné tloušťky. Omezení této metody vyplývá z rozměru lisovacích desek.

Pojení vláken pomocí tepla je vhodné pro netkané textilie, kde se vyžaduje rozměrová stabilita. Výhodou je, že zahřátí vláken odstraňuje vnitřní pnutí v nich vložené z předchozích technologií, což napomáhá minimalizovat jejich smrštění [18,21].

## **1.11. Metody použité při analyzování a zaznamenávání vlastností**

### **1.11.1. Plošná hmotnost netkané textilie**

Zjišťování plošné hmotnosti netkané textilie se provádí dle definice v normě. Kde se odebere vzorek o stanovené velikosti, který se zváží na přesné laboratorní váze a dále se přepočítá na obecnou jednotku plochy. Plošná hmotnost se tedy uvádí jako hmotnost v gramech na metr čtverečný.

$$m_s = \frac{m}{s} \quad (7)$$

$m_s$ ... plošná hmotnost

$m$ ... hmotnost netkané textilie

$s$ ... plocha netkané textilie [18].

### 1.11.2. Tloušťka netkané textilie

Tloušťka materiálu byla měřena pouze orientačně, neboť finální tloušťka byla určena polohou nosníku měřicího zařízení. Tloušťka bez zatížení byla zpravidla vyšší než požadovaná, proto při měření docházelo k lehkému zhutnění vzorku.

Pro zjištění tloušťky se využívá mnoho metod a zařízení. V praktické části bylo orientační měření provedeno tloušťkoměrem s názvem Elcometer 456 [28].

### 1.11.3. Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie je základním nástrojem pro analýzu morfologie, v tomto případě pro analyzování průměrů jemných vláken. Pomáhá při analyzování rozměrů, které jsou velmi malé a pouhým okem není jejich pozorování a popis možný. V případech, kde je zapotřebí rozlišení více než 200 nm, je používána elektronová mikroskopie. U takovýchto mikroskopů se optická čočka nahrazuje elektromagnetickou, protože elektrony mají menší vlnovou délku než viditelné světlo u optických mikroskopů. Elektronové mikroskopy dělíme na tři typy: skenovací, transmisní a rastrovací [22].

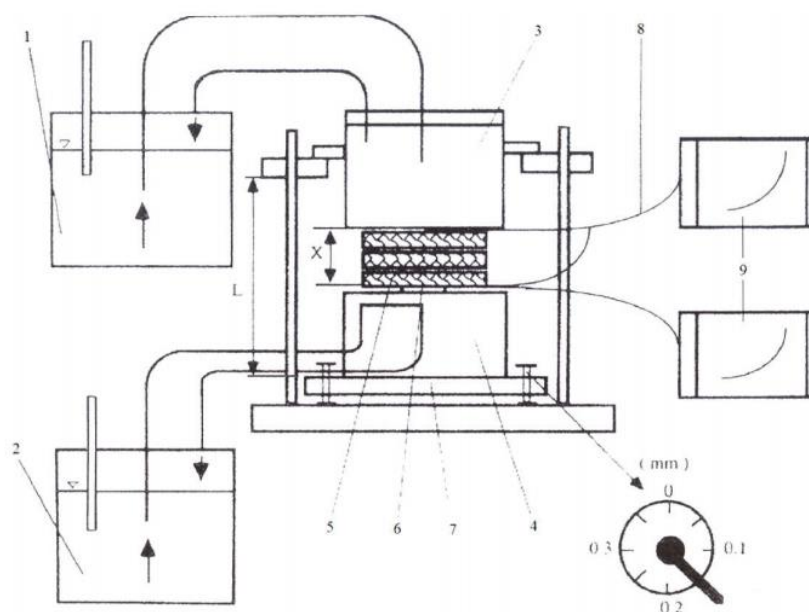
- SEM - povrch objektů je sledován pomocí odražených či sekundárních elektronů
- TEM - elektrony procházejí velmi tenkým materiálem, který se pozoruje
- SPM – používá se skenovací sonda, kterou se pohybuje po zkoumaném povrchu

Elektronové mikroskopy jsou připojené k počítači vybavenému softwarem umožňujícím následnou analýzu získaných snímků [22].

#### 1.11.4. Statická metoda měření tepelné vodivosti objemných materiálů

Při experimentální části byla využita statická metoda měření tepelné vodivosti. Zkušební přístroj byl sestaven ze dvou nádob (viz obr.: 27), obě nádoby byly připojeny na cirkulaci vody, která zajišťovala konstantní teplotu v celém okruhu regulovanou termostatem. Voda byla v okruhu poháněna pomocí čerpadel rychlostí 5 l/min.

Vzorek se vždy vkládal do mezikruží, které sloužilo jako bariéra a zabraňovalo úniku tepla mimo zkoušený vzorek. Horní nádoba byla zahřívána na stálou teplotu 30 °C a byla opatřena termočlánkem pro měření tepelného toku. Druhá nádoba měla teplotu okolí, na začátku měření byl teplotní rozdíl 10 °C a během měření se lehce zmenšoval. Rozdíl teplot  $\Delta t$  mezi dny nádob se zjišťoval pomocí dvojice termočlánků[14,17].



- (1) termostat pro horní nádobu, (2) termostat pro spodní nádobu, (3) ohřívaná horní nádoba s horkou cirkulující vodou, (4) spodní nádoba s cirkulující vodou o teplotě okolí, (5) vzorek textilie, (6) senzor tepelného toku, (7) nastavitelné opěry, (8) diferenciální termočlánek, (9) zapisovací zařízení

Obrázek 27.: *Schéma měřícího statického stroje [17].*

Signál vyvedený z termočlánků se odečítal na milivoltmetru. Konkrétně byl použit HP kanálový multiplexor Agilent 34901A. Ten umožňuje měření více hodnot současně. Získaná hodnota odečtená z termočlánku se zapíše a přepočítá dle vztahu uvedeného v kalibračním listu konkrétního termočlánku.

Tepelná vodivost se poté vypočítá z obecného vztahu rovnice. Rovnice byly zaneseny do počítače a pomocí Excelu dále zpracovány.

$$\lambda = \frac{K U h}{\Delta t} \quad (8)$$

$\lambda$ ... efektivní tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

K... kalibrační hodnota použitého termočlánku

U... napětí na diferenciálním termočlánku [ $\mu\text{V}$ ]

h... tloušťka vzorku (vzdálenost nosníků) [m]

$\Delta t$ ... rozdíl teplot nádob [ $^{\circ}\text{K}$ ] [17].

#### 1.11.5. Termoelektrické teploměry - termočlánky

Termočlánky se řadí mezi aktivní senzory vytvářející napětí při vystavení tepelnému působení. Aktivní senzor přeměňuje neelektrické veličiny (mechanické a teplotní) přímo na elektrické signály. Většinou je elektrický signál slabý a pro jeho změření je třeba použít zesilovač. Termočlánek udává hodnotu pro porovnání. Jeden z nich funguje jako referenční a druhý jako porovnávaná hodnota.

Jejich funkce vychází z termoelektrického jevu na rozhraní dvou různých materiálů, které jsou elektricky vodivě spojeny. Vlivem rozdílů teplot na měřícím a referenčním

konci termočlánku vzniká v obvodu termoelektrické napětí, které je možno odečítat na milivoltmetru [29].

## **2. Experimentální část**

V experimentální části bylo dle zadání stanoveno použití materiálů pro výrobu vzorku netkané textilie. Metodiky pro jeho zpracování a přípravu jako základního materiálu. Příprava nanovlákněné vrstvy. Způsob propojení jednotlivých vrstev vláken tak, aby byl vzorek soudržný a bylo možné jej následně podrobit analýze.

### **2.1. Postupy přípravy zkoušených materiálů**

Pro přípravu vzorku z netkané textilie byla zvolena polyesterová vlákna v kombinaci s vlákny bikomponentními. Základní vlákna polyesteru měla jemnost 3,3 dTex, vlákna bikomponentní pak jemnost 2,2 dTex. Bikomponentní vlákna byla připravena metodou jádro-plášť, přičemž plášť sloužil jako pojivo vlákněné vrstvy.

Nanovlákněná vrstva byla v prvním pokusu připravena metodou střídavého elektrostatického zvlákňování. Tato metoda byla vybrána pro její relativně lepší výrobní možnosti oproti metodě, při které se používá jehlové zvlákňování stejnosměrným proudem. Zvlákňování bylo provedeno na zařízení KOMES, které bylo vyvinuto na Technické univerzitě v Liberci. Toto zařízení bylo primárně navrženo pro přípravu kompozitních nanovlákněných membrán.

Pojení probíhalo vlivem expozice vlákněného materiálu a tepelného působení v tepelném lisu. Vlivem překročení teploty tání co-polyesterových vláken, došlo k jejich transformaci v pojivé body.

### 2.1.1. Příprava základní netkané textilie

Základní netkaná textilie byla připravena z polyesteru (viz obr.: 28) a bikomponentních vláken v poměru 70:30. Jako optimální navážka bylo zvoleno 80 g vláknenného materiálu, tedy 56 g polyesteru a 24 g vláken jádro-plášť. Pro přípravu vstupního materiálu a opakovatelnost jeho vlastností byla použita stolní laboratorní váha s přesností  $\pm 0,1$  g.

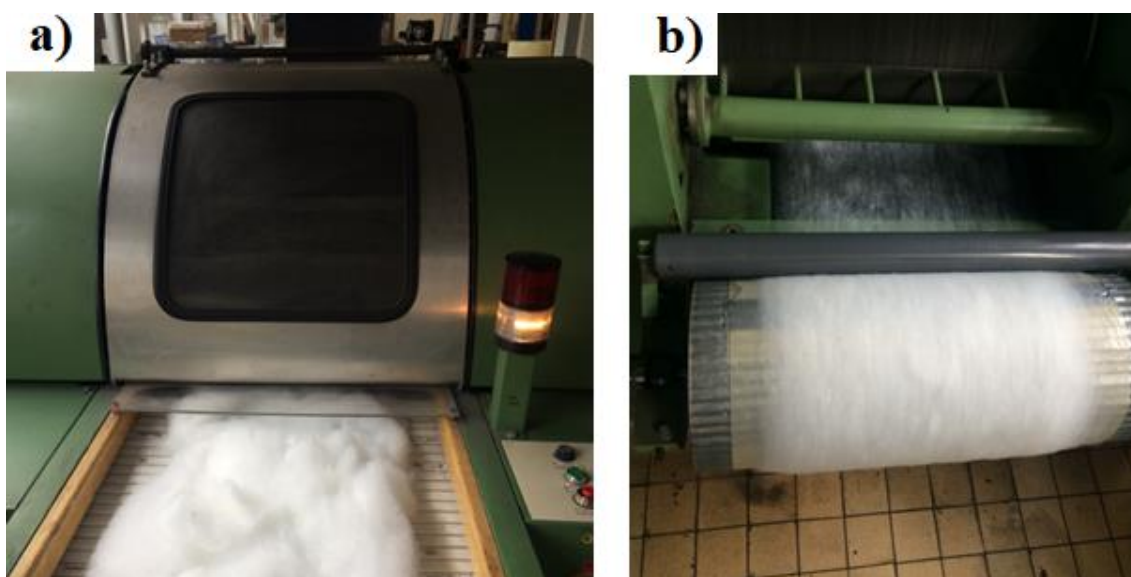


Obrázek 28.: *Snímek chomáče základních polyesterových vláken pro výrobu NT*

K docílení homogenity vstupního materiálu, byly jednotlivé vláknenné složky ručně rozvolněny a zamíchány. Připravená směs vláken byla co nejrovnoměrněji rozložena na podávací dopravníkový pás válcového mykacího stroje. Pás byl opatřen ryskami (viz obr.: 29a), které určovaly plochu, na kterou bylo nutné materiál vměstnat tak, aby bylo možné docílit porovnatelných výsledných netkaných textilií. Spuštěním mykacího stroje docházelo k otáčení jednotlivých funkčních částí v rozdílných rychlostech, a tím k narovnávání a přenášení vláknenné pavučinky stojem. Každá funkční část byla opatřena povlakem, ten plnil jak transportní tak i orientační funkci. Výsledná vláknenná pavučinka byla zachytávána na navíjecím válci a tloušťka netkané textilie byla redukována samotíhou přítlačného válce. Netkaná textilie po prvním mykání jevila známky nestejnomyěrnosti a preferované orientace vláken ve směru návínou



(viz obr.: 29b). Z toho důvodu byl návin z navíjecího válce sejmут, rozstřížen a stejným způsobem vložen na podávací dopravník tentokrát pootočen o 90°. Materiál byl objemnější a bylo třeba mu pomoci stlačováním pod ochranné plexisklo. Po druhém průchodu mykacím strojem navinutá vlákenná vrstva, splňovala předpoklady pro přípravu vzorku. Návin byl opatrně rozstříhnut a přemístěn na stůl k dalšímu zpracování.



*Obrázek 29: a) Snímek podávacího dopravníku mykacího stroje s rýskami vymezující nákladku; b) Snímek pavučinky zachytávané na navíjecím válci válcového mykacího stroje*

### **2.1.2. Příprava nanovlákné vrstvy**

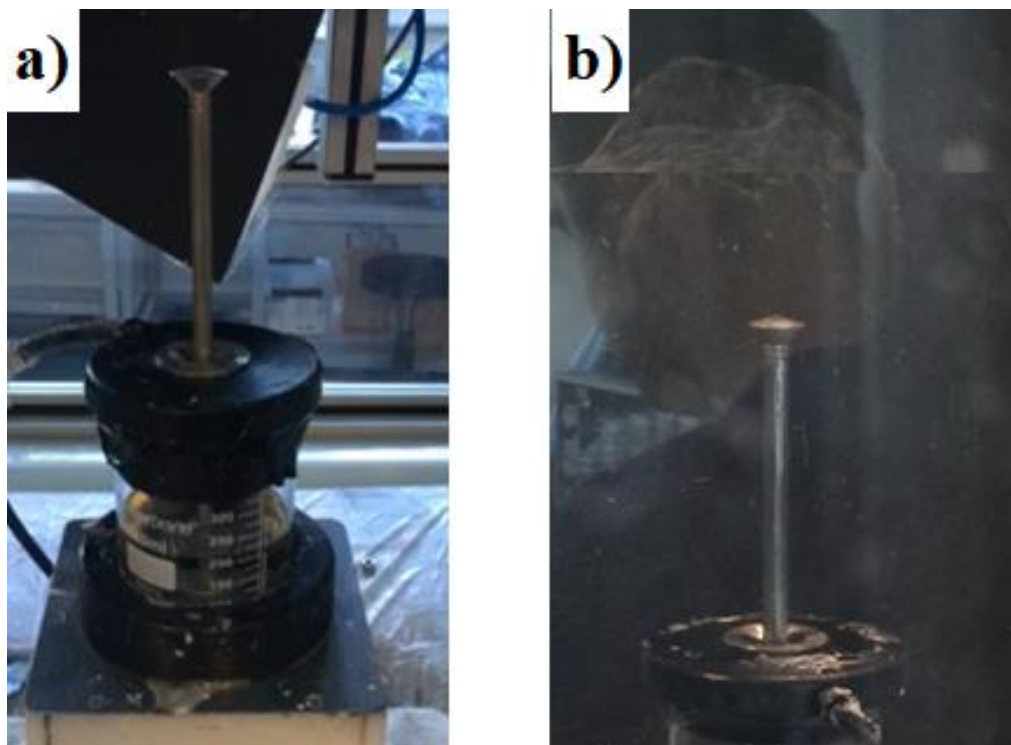
Nanovlákná vrstva byla připravena z roztoku Polyamidu 6. Tento roztok byl získán přípravou 10% hmotnostního roztoku tuhého polyamidu 6. Polyamid se špatně rozpouští v běžných rozpouštědlech, proto byl jako solvent zvolen roztok kyseliny mravenčí s kyselinou octovou v poměru 1:1.

Bylo připraveno 300 g 10 % hmotnostního roztoku PA 6. Roztok byl připraven tak, že se na laboratorní váhu připravila velká kádinka, její hmotnost byla odečtena tárováním váhy. Pro docílení popsaného hmotnostního poměru bylo vypočteno, že bylo potřeba připravit 90 % solventu z hmotnosti celku tedy 270 g. Solvent se skládal

ze dvou složek a to kyseliny mravenčí a kyseliny octové, při poměru 1:1. Do kádinky bylo opatrně přiléváno  $\frac{1}{2}$  hmotnosti rozpouštědla tedy tak, až byla hodnota zobrazená na váze 135 g kyseliny mravenčí, to stejné bylo opakováno i s kyselinou octovou. Tím byl připraven hmotnostní roztok rozpouštědel 1:1. Kádinka obsahovala roztoky o celkové hmotnosti 270 g. Do připraveného roztoku bylo přisypáno PA 6 ve formě vloček do celkové hmotnosti 300 g. Vločky byly usazené na dně, bylo vhodné kádinku přemístit na magnetické míchadlo a pomocí vložení magnetické kapsle (míchadélka) homogenizovat. Vlivem změny polarity magnetické desky docházelo k rotačnímu pohybu kapsle a tím k promísení všech složek roztoku. Po dvou hodinách působení míchání byl roztok homogenní a prostý usazenin PA 6. Došlo k jeho rovnoměrnému rozdispergování v celém objemu roztoku. Z takto připraveného roztoku bylo odlito 250 ml do druhé kádinky, která byla připravená ke zvlákňování. Do zvlákňovacího roztoku byla vložena dutá elektroda s vnitřním šnekovým podáváním roztoku a připojena k zdroji vysokého napětí.

Nanovlákná vrstva byla připravena na zařízení KOSMOS v laboratořích CXI. Zařízení využívalo ke zvlákňování tyčinky (elektrodu viz obr.: 30a), připojenou ke zdroji vysokého střídavého proudu. Díky střídání polarity nebylo třeba využívat kolektor. O pravidelné zásobování vrcholu tyčinky se staral šnekový dopravník uvnitř tyčinky a elektromagnetické pole, které jím otáčelo. Docházelo tak k vyplavování roztoku na vrchní plochu tyčinky, kde vznikala rezervoár, ze kterého docházelo ke zvlákňování nanovláken. Přebytečný roztok se vyplavoval přes okraj funkční plochy a stékal zpátky do kádinky se zásobou roztoku. Pro výrobu bylo jako optimální parametr napětí tyčinky zvoleno 32,4 kV, tím docházelo k tvorbě zapletených nanovláken, která připomínala mlhu či jemný kouř. Toto se označuje jako nanovlákná vlečka (viz obr.: 30b). Vlečka vlivem změny polarity lehce pulzovala, kdy každá změna vytvořila část vláken nabitých opačně a tím docházelo k vzájemnému přitahování mezi po sobě jdoucími vlákny. To vysvětluje, proč není potřeba kolektor pro výrobu nanovláken metodou střídavého elektrického pole. Vlákna se ukládala na válcový

navíjecí mechanismus, který se otáčel rychlostí 20 m/min a jeho příčný posuv byl nastaven na 25 cm. Potřebný rozměr vzorku byl 20 x 20 cm, bylo však předpokládáno, že okraje budou kvalitativně jiné než většina plochy.



*Obrázek 30:a) Snímek duté elektrody s vnitřním šnekovým podáváním roztoku; b) Snímek nanovlákněné vlečky po spuštění procesu zvlákňování z roztoku PA*

Po odzkoušení metody byl zvolen referenční čas 10 minut, po kterém byl vystřižen vzorek 20 x 20 cm, ten byl zvážen a následně byla odečtena hmotnost podkladového spunbondu. Z přepočtu vyšlo, že po 10 minutách zvlákňování střední část netkané textilie měla plošnou hmotnost  $0,9 \text{ g/m}^2$ . Byly stanoveny tři požadované plošné hmotnosti a to  $0,5; 3; 5 \text{ g/m}^2$ . Jednoduchou aritmetickou metodou zvanou trojčlenka byl dopočítán potřebný čas pro přípravu těchto vzorků (viz tab.: 2).

**Tabulka 2.:** Výpočet časové náročnosti výroby jednotlivých plošných hmotností nanovlákněné vrstvy

$$0,9 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots 600 \text{ s}$$

$$0,5 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots x \text{ s}$$

---


$$\frac{x}{600} = \frac{0,5}{0,9} \rightarrow x = \frac{0,5}{0,9} * 600 \doteq \mathbf{333s = 5min a 33s}$$

$$0,9 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots 600 \text{ s}$$

$$3 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots x \text{ s}$$

---


$$\frac{x}{600} = \frac{3}{0,9} \rightarrow x = \frac{3}{0,9} * 600 \doteq \mathbf{2\ 000s = 33min a 20s}$$

$$0,9 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots 600 \text{ s}$$

$$5 \text{ g/m}^2 \dots\dots\dots x \text{ s}$$

---


$$\frac{x}{600} = \frac{5}{0,9} \rightarrow x = \frac{5}{0,9} * 600 \doteq \mathbf{3\ 333s = 55min a 33s}$$

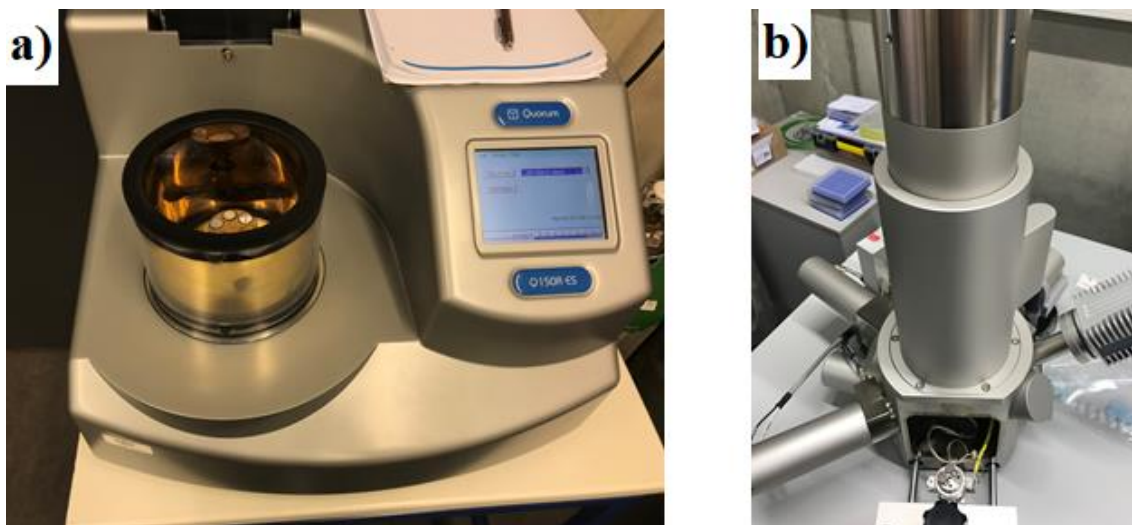
Dle nastíněného výpočtu, byly připraveny tři vzorky nanovlákněné vrstvy o různých plošných hmotnostech tak, aby splňovaly zvolené hodnoty.

### 2.1.3. Optická analýza připravených částí vzorků

#### Zlatička Q150 ES

Jednotlivé části pro přípravu kompozitního vzorku byly podrobeny obrazové analýze pomocí elektronového mikroskopu. Z každého vzorku byl odebrán malý vzorek, který byl pomocí oboustranné pásky přilepen k terčíku. Pro lepší kontrast a ostrost

výsledných snímků byl vzorek vždy pozlacen. Zlacení probíhalo pomocí zařízení Zlatička Q150 ES. Parametr povlaku byl nastaven na 10 mm, jako ochranná atmosféra byl zvolen Argon, na základě těchto parametrů bylo možno určit čas potřebný pro splnění definovaných podmínek na 20 minut. Tři připravené terčíky byly vloženy do zařízení a následně naprášeny zlatým povlakem (viz obr.: 31a).



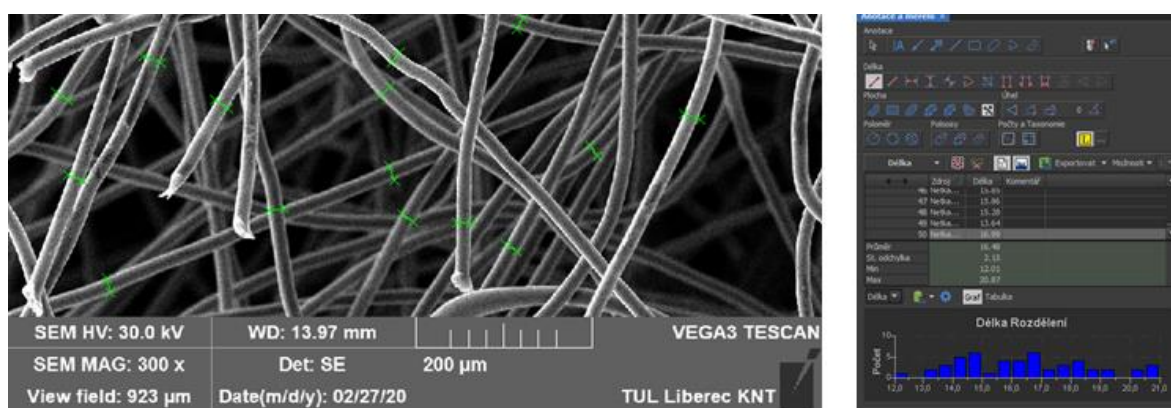
*Obrázek 31: a) Založené terčíky se vzorky k pozlacení Zlatička Q150 ES; b) Elektronový mikroskop TESCAN*

### **Elektronový mikroskop Tescan**

Pořízení snímků pro následnou analýzu průměrů bylo provedeno na elektronovém mikroskopu TESCAN (viz obr.: 31b). Tento parametr nebyl rozhodující, bylo však dobré znát morfologii jednotlivých vlákných vrstev, především pak průměry vláken a zdokumentovat je. Pozlacené terčíky se vzorky byly vloženy do elektronového mikroskopu, z funkčního prostoru mikroskopu byl pod tlakem odsát vzduch tak, aby v komoře vzniklo vakuum a emitované elektrony nebyly ovlivňovány. Vizuální prostředí v připojeném počítači umožňovalo vzorek zacílit a následný snímek doostřit pomocí softwarových funkcí. Pro každý vzorek byla vytvořena série snímků, pro získání objektivnějších výsledků.

### Výpočetní software Vega 3

Pořízené snímky z elektronového mikroskopu byly dále přeneseny do počítače disponujícím matematickým softwarem Vega 3, který umožňoval měření a další analýzy na základě přepočítávání měřítka snímku a počtu pixelů v daném rozmezí. Ke každému vzorku byl pořízen soubor pěti snímků, ze kterých bylo možné analyzovat průměry vláken (viz obr.: 32). Aby byl výsledek co možná nejvíce vypovídající, bylo provedeno 50 měření z pěti snímků, výsledky byly zaznamenány.




Obrázek 32: Měření průměrů vláken pomocí software Tescan Vega


Stejnou metodikou byly analyzovány všechny vzorky, z výsledků byla sestavena tabulka (viz tab.:3), určující průměry vláken jednotlivých vzorků

Tabulka 3.: Výpočtová tabulka pro určení průměrů vláken jednotlivých vzorků sestavená vždy ze série 50-ti měření


Meltblown těžký					95% IS	
Veličina	Průměr	St.odch	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Rozměr [μm]	4,25	2,51	0,75	10,41	3,55	4,95

Meltblown lehký					95% IS	
Veličina	Průměr	St.odch	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Rozměr [μm]	3,16	1,66	0,93	7,93	2,70	3,62

Nanovláknenná vrstva					95% IS	
Veličina	Průměr	St.odch	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Rozměr [μm]	0,15	0,04	0,1	0,24	0,14	0,16



#### 2.1.4. Pojení jednotlivých vrstev vzorků

Pojení jednotlivých vrstev bylo realizováno na základě rozdílných teplot tání základní textilie a pojivých vláken. Vzorek byl vložen mezi pečící papír tak, aby nedošlo k natavení a ulpívání vzorku na topných deskách. Vzorky byly připraveny několika způsoby, ať už jako slepý vzorek (pouze základní a pojivá vlákna), nebo jako vrstvená textilie základních vláken, mezi kterou byla vkládána další vrstva nanovláken popřípadě nanovláken se spunbondem nebo meltblown.

Vzorek byl vložen mezi dvě ocelové desky tepelného lisu (viz obr.: 33a), desky byly vyhřívány pomocí trubice transformujících elektrický odpor na tepelnou energii (topnice). Teplota v řídicím PLC systému Siemens byla nastavena tak, aby překročila teplotu tání co-polyesterových vláken, ale zároveň nepoškodila vlákna základní. Teplota vytápění byla proto zvolena na 130 °C. Vzorek byl před pojením objemnější, bylo tedy potřeba redukovat tloušťku tak, aby nevznikal problém při následném měření. Měřicí laboratorní aparatura byla nastavena na vzorky o tloušťce 18 mm, z tohoto důvodu byl odstup mezi zahříványmi deskami zvolen totožný. Expozice kompresi a tepelnému účinku probíhala po dobu 30 s. Výsledný vzorek byl soudržný díky přeměně pojivých vláken v pojivé body (viz obr.: 33b). Materiál měl tendenci se po odlehčení lehce vracet, tudíž tloušťka 18 mm nebyla zcela přesná, nicméně při měření byl vzorek opětovně zmáčknut na tuto hodnotu.



Obrázek 33: a) Pojení vzorků pomocí tepelného lisu; b) Pojení netkané textilie bodové [18].

## 2.2. Laboratorní aparatura pro měření tepelné vodivosti vláknenných materiálů

Laboratorní aparatura se skládala ze dvou tlakových nádob (viz obr.: 34a), u kterých dna sloužila jako teplosměnné plochy, mezi kterými bylo měření tepelné vodivosti prováděno. Kde vrchní nádoba byla opatřena čidlem tepelného toku, v této měřící stanici bylo využito termočlánku Huksenflux HFP 01-05. Mezera mezi teplosměnnými plochami byla regulovatelná dle tloušťky vzorku. A to díky distančnímu stavěcímu šroubu, který byl propojen s horní konzolí nesoucí tlakovou nádobu, jehož otáčením byl otvor pro vzorek zvětšován či zmenšován. Nosník byl spojen s digitálním měřidlem, které zaručovalo snadné odečtení hodnoty vzdálenosti ploch.



*Obrázek 34: A) Tlakové nádoby laboratorní aparatury pro měření tepelné vodivosti objemných materiálů; B) Měřicí přístroj HP kanálový multiplexor Agilent 34901A*

Každá z nádob byla připojena na izolovaný vodní okruh, kde bylo použito čerpadlo pro docílení rovnoměrného promísení kapaliny a tím jejího prohřátí v celém objemu. V prvním okruhu byl zároveň zásobník vody s termostatem, díky kterému bylo docíleno rozdílné teploty oproti druhé straně. Každá strana dále disponovala teploměrem pro zjištění aktuální teploty kapaliny.

Zařízení bylo připojeno k měřicímu přístroji HP kanálový multiplexor Agilent 34901A, který umožňoval sledování vývoje napětí na čidle tepelného toku (viz obr. 34b).



Po ustálení a zaznamenání hodnoty se přepnulo na druhý kanál a bylo zaznamenáno napětí na diferenciálním termočlátku. Doba ustalování hodnot na čidle tepelného toku byla rozdílná, ve většině případech však platilo, že se muselo čekat zhruba 5 minut.

### 2.3. Měření tepelné vodivosti vlákných materiálů stanovení metodiky

V prvním kroku šlo především o ověření způsobu výroby vzorků, jejich komplectaci a seznámení se s laboratorní aparaturou pro měření tepelné vodivosti. Připravený vzorek dle postupu z předchozích odstavců měl velikost šíře navíjecího válce mykacího stroje. Bylo zamýšleno vytvořit sadu třech vzorků s vložením nanovlákné vrstvy. Jednotlivé vzorky netkané textilie byly opatrně rozděleny zhruba v polovině tak, že se oddělovaly mezi vrstvami návínů.

Lehký problém nastal v momentě, kdy měla být oddělena nanovlákná vrstva od podkladového spunbondu. Vlivem velmi malé plošné hmotnosti u prvního vzorku ( $0,5 \text{ g/m}^2$ ), nebylo možné oddělit vrstvu tak, aby nedošlo k jejímu poškození. Adhezní síly převyšovaly soudržné síly struktury. Z toho důvodu byl záhy proveden pokus o separaci druhého vzorku o plošné hmotnosti  $3 \text{ g/m}^2$ , tento vzorek byl o poznání lepší, nicméně stále docházelo k jeho poškozování při snaze o oddělení. Separace bez komplikací proběhla až u vzorku s plošnou hmotností  $5 \text{ g/m}^2$  (viz tab.:4).

Tabulka 4.: *Hodnocení možnosti separace nanovlákné vrstvy od podkladového spunbondu*

Nanovlákná vrstva	Plošná hmotnost	Komentář separace	Úspěšnost
1.	$0,5 \text{ g/m}^2$	Docházelo k odtržení po malých kouscích	✘ ✘
2.	$3 \text{ g/m}^2$	Odrhávání bylo snazší, nebylo však možné oddělit celý požadovaný rozměr 20x20cm	✘
3.	$5 \text{ g/m}^2$	Odrhávání proběhlo bez komplikací	✔

Vzhledem k těmto problémům byl přehodnocen původní záměr a bylo rozhodnuto, že i když se nejednalo o úspěch, vzorky se daly dále využít. Byl tedy změněn plán a to tak, že v rámci zachování stejných parametrů u všech vzorků, byla vložena nanovláknenná vrstva i se spunbondem. Tím vznikly tři vzorky. Vzhledem k tomu, že nanovláknennou vrstvu o plošné hmotnosti  $5 \text{ g/m}^2$ , bylo možné bezpečně oddělit, připravil se jeden další vzorek tak, jak bylo původně plánováno (viz obr.: 35). Z toho tedy vyplývá, že byly připraveny celkem čtyři vzorky, které se zpevnily v tepelném lisu. Z materiálu byl vystřižen čtverec o rozměru  $20 \times 20 \text{ cm}$ . Prvotní měření proběhlo na vzorku o tloušťce  $11 \text{ mm}$ .



*Obrázek 35: Vzorky připravené pro první měření čtverec  $20 \times 20 \text{ cm}$ , tloušťky  $11 \text{ mm}$ .*

### **2.3.1. Příprava aparatury pro měření**

Hotové vzorky byly podrobeny měření tepelné vodivosti objemných vláknenných materiálů v laboratoři CXI. Před začátkem měření se musela aparatura nejdříve zprovoznit. Pro oba díly tlakové nádoby byla zapnuta čerpadla oběhového systému pro ustálení teploty. Zároveň byl okruh emitující tlakové nádoby ohříván termostatem na hodnotu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , ohřev realizovala odporová topná spirála. Zpočátku bylo potřeba zvýšit teplotu okruhu o více než  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , z jeho aktuální teploty prostředí. K tomuto účelu byl zvolen výkon topného tělesa  $1000 \text{ W}$ . Po natopení na požadovanou teplotu byl

termostat přepnut na 240 W, pro udržování teploty. Pokaždé, když teplota v oběhu překročila hodnotu, termostat vypnul odporový ohřev a pokud teplota kapaliny klesla, automaticky došlo ke spuštění ohřevu. Vypínání a zapínání bylo možné pozorovat na červené signalizační kontrolce. Po zhruba 20 minutách vytápění a zároveň soustavné cirkulace byla strana vysílače připravena k měření (ověřeno na rtuťovém teploměru).

Souběžně s tím byl zprovozněn i druhý oběh, tedy přijímací. Zde byla zapnuta pouze cirkulace kapaliny.

### **2.3.2. Vložení vzorku do měřícího zařízení**

Před vložení vzorku bylo důležité provést kalibraci digitálního měřidla. Kalibrace proběhla po zapnutí posuvného měřidla vložení polystyrenového kalibru o tloušťce 18mm, po přiblížení na dotek se musela tato hodnota zároveň zobrazit na displeji. Pokud tomu tak nebylo, muselo se měřidlo přenastavit na správnou hodnotu.

Otáčením distančním stavěcím šroubem docházelo k rozevírání mezery mezi teplosměnnými plochami tlakových nádob z 18 mm na mezeru, která umožnila bezpečné vložení vzorku. To znamenalo dostatečně na to, aby nedošlo k poškození termočláňkového snímacího proužku. Vzorek byl vložen do zařízení a otáčením proti směru předchozího otáčení se mezera pomalu zmenšovala. Vzorek byl lisován v tepelném lisu na 11 mm, z toho důvodu se musela stejná hodnota objevit i na displeji digitálního měřidla.

### **2.3.3. Nastavení měřícího přístroje HP kanálový multiplexor Agilent 34901A**

První nastavení bylo provedeno za asistence profesora. Měřící ústředna Agilent 34970A umožňovala měření více fyzikálních veličin na různých místech současně. Nastavení bylo provedeno dle návodu ke cvičení s tímto zařízením. Byl nastaven měřící kanál 106, ze kterého byla odečítána hodnota napětí čidla tepelného toku a kanál 105 mapující napětí na diferenciálním termočláňku. Zařízení bylo nastaveno na stejnosměrný proud

(DC), energie proudila z emitující nádoby, která byla zahřívána ke chladnějšímu kolektoru. Dále byl nastaven rozsah digitů (počet míst na displeji).

#### **2.3.4. Měření vzorku**

Pro dosažení dostatečné mezery mezi dny tlakových nádob bylo otáčeno k tomu určeným šroubem, který vzájemně oddaloval teplosměnné plochy, vzorek byl vložen mezi ně. Poté se otáčelo šroubem v protisměru do doby, kdy na displeji posuvného měřidla byla zobrazena hodnota 11 mm. Založený vzorek zmačknutý mezi tyto dvě plochy, byl připraven k měření. Docházelo v něm k přenosu energie z vyhřívané nádoby na druhou nádobu. Vzorek vyplňoval mezeru mezi nimi. Vytvořil tak tepelný most, na kterém mohlo být provedeno měření tepelné vodivosti objemného vlákného materiálu za pomoci snímání hodnot proudu procházejícího přes termočlánek.

Během prvních cca 2 minut se pozorovaná hodnota napětí čidla tepelného toku U2 na kanále 106 měřicího přístroje rapidně měnila, z toho důvodu bylo vyčkáváno, než se pozorovaná hodnota ustálila. To trvalo zhruba další 3 minuty. Následně hodnota oscillovala kolem stejné hodnoty, to byl signál pro její zaznamenání. Bylo důležité hodnotu zaznamenat a neprodleně přepnout sledovaný kanál na 105, který monitoroval hodnotu napětí na diferenciálním termočlátku U1.

Takto pořízená data byla prvotně zaznamenána na papír, následně byla sestavena tabulka 5. v Excelu, která umožňovala naměřené hodnoty dále zpracovávat (viz tab.:5). Za účelem vyšší objektivity byl každý vzorek měřen ve třech nahodile zvolených místech. Vždy bylo bráno v potaz, aby byla celá kontaktní plocha tlakových nádob zakrytá i po posunutí vzorkem a zároveň, aby nebylo měření provedeno příliš blízko předchozímu.

Tabulka 5.: *Naměřené hodnoty U1 a U2 zadané do tabulky*

Vzorek	Měření	Hodnota U2(105) [mV]	Hodnota U1(106) [mV]
NT + nano 0,5g.m-2+ podkladový spunbond	1	163	0,775
	2	165	0,782
	3	161	0,767
NT + nano 3g.m-2+ podkladový spunbond	1	154	0,642
	2	156	0,639
	3	152	0,633
NT + nano 5g.m-2+ podkladový spunbond	1	145	0,586
	2	143	0,573
	3	143	0,59
NT + nano 5g.m-2	1	175	0,89
	2	178	0,887
	3	174	0,902

Naměřené dvojice dat, byly zpracovány dle vztahů uvedených v návodu ke cvičení pro měřící aparaturu. Tyto rovnice byly zavedeny do tabulky 6. v Excelu, pro usnadnění práce. Po naprogramování vzorců, stačilo vložit pouze hodnotu U1 a U2, zbylé hodnoty se pak automaticky přepočítaly dle uvedených vztahů.

Byla použita rovnice pro výpočet rozdílu teplot ( $\Delta T$ ) mezi teplosměnnými plochami. Z návodu k obsluze aparatury byl odvozen vztah na základě kalibračního listu použitého termočlánu. V rovnici byla použita změřená hodnota U2 pro dopočítání výsledku.

$$\Delta T = 0,0252 * U2 - 0,1504 \quad (9)$$

$\Delta T$ ... rozdíl teplot nádob [ $^{\circ}K$ ]

$U_2$ ... napětí na diferenciálním termočlánu [ $\mu V$ ]

Číselné konstanty .... hodnoty uváděny pro konkrétní termočlánek z kalibrace

Další hodnotou, kterou bylo možné měřením získat, byla efektivní tepelné vodivosti ( $\lambda$ ). Pro výpočet bylo využito modifikovaného rovnice 8. Modifikace spočívala v tom, že do obecného vztahu byla přidána konkrétní kalibrační konstanta použitého termočlánu.

Hodnota  $U_1$  byla změřena, tloušťka vzorku se nastavila přitlakem nosníku a hodnota rozdílu teplot  $\Delta T$  z předchozího vztahu.

$$\lambda = \frac{15,94 * U_1 * L}{\Delta T} \quad (10)$$

$\lambda$ ... efektivní tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$U_1$ ... napětí na diferenciálním termočlánku [ $\mu\text{V}$ ]

$h$ ... tloušťka vzorku (vzdálenost nosníků) [m]

$\Delta t$ ... rozdíl teplot nádob [ $^{\circ}\text{K}$ ]

Číselná konstanta .... hodnota uváděny pro konkrétní termočlánek z kalibrace

Díky těmto vztahům mohla být naměřená dvojice dat zpracována a tím zkoumány trendy termických vlastností vzorků, vyvozených změnou v jejich složení. Dle předpokladu bylo patrné snižování efektivní tepelné vodivosti v závislosti na zvyšující se plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. U všech vzorků byla nastavena stejná rozteč mezi nosníky (konstantní tloušťka vzorku), tudíž změna plošné hmotnosti byla přímo úměrná změně objemové hmotnosti. Nižší hodnoty vzorku 1-3 (viz tab.: 6) oproti vzorku 4 byly přisuzovány tomu, že první 3 vzorky byly vloženy i s podkladovou vrstvou sunbondu, vzorek se tedy skládal ze tří vrstev. Vzorek 4 měl sice vyšší plošnou hmotnost, ale byla vložena pouze nanovlákněná vrstva. Z výše zmíněného faktu bylo zřejmé, že mohou být porovnávány pouze první 3 vzorky a 4. vzorek byl spíše jen pro zajímavost.

Tabulka 6.: *Hodnoty U1 a U2 zadané do tabulky pro výpočet efektivní tepelné vodivosti*

Vzorek	Měření	Hodnota U2(105) [mV]	Hodnota U1(106) [mV]	$\Delta T$ [°K]	$\lambda$ [W.m-1.K-1]	půměr
NT + nano 0,5g.m-2+ podkladový spunbond	1	163	0,775	3,9572	0,034339558	0,034325678
	2	165	0,782	4,0076	0,034213963	
	3	161	0,767	3,9068	0,034423513	
NT + nano 3g.m-2+ podkladový spunbond	1	154	0,683	3,7304	0,032103051	0,030875995
	2	156	0,655	3,7808	0,030376561	
	3	152	0,633	3,68	0,030160386	
NT + nano 5g.m-2+ podkladový spunbond	1	145	0,586	3,5036	0,029326761	0,029459785
	2	143	0,573	3,4532	0,029094701	
	3	143	0,59	3,4532	0,029957894	
NT + nano 5g.m-2	1	175	0,89	4,2596	0,036635506	0,036620412
	2	178	0,887	4,3352	0,035875295	
	3	174	0,902	4,2344	0,037350435	

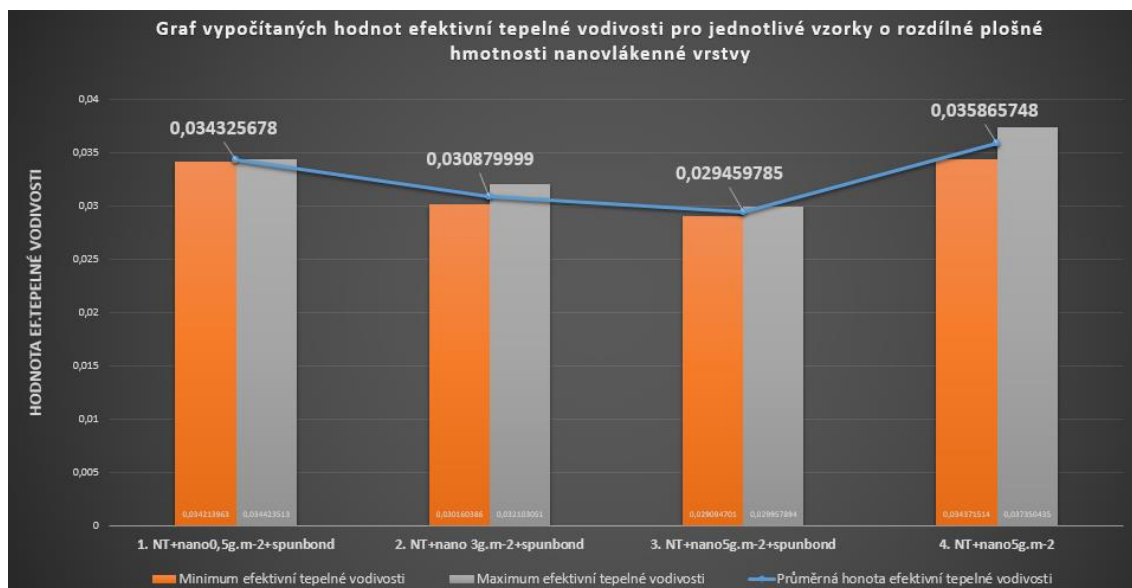
	Bílá hodnota určuje vzorek + pořadí měření
	Oranžová hodnota změřené vstup provýpočet
	Zelená hodnota vypočtená vzorcem
	Světle modrá - Použité vzorce
	Tmavě modrá nadpisy

Tloušťka	11	0,011
Vzorce:		
$\Delta T$ [°K]=0,0252*U2-0,1505		
$\lambda$ [W.m-1.K-1]=15,94*U1(mV)*L(m)/ $\Delta T$ [°K]		

Vypočítané hodnoty byly zaneseny do grafu, který znázorňuje efektivní tepelnou vodivost vlákenného materiálu u jednotlivých vzorků. Každý ze čtyř vzorků byl změřen ve třech místech a získaná data byla dosazena do předchozí tabulky. Pro zpřehlednění byla v grafu vynesena střední hodnota ze souboru tří měření, zároveň byla zaznamenána nejvyšší a nejnižší hodnota jednotlivých vzorků. Při vynechání posledního, tedy čtvrtého vzorku vyneseno v grafu, měli zbylé tři vzorky konstantní složení, jediným rozdílem byla plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy. Z grafu bylo patrné, že předpoklad o vlivu této veličiny na výslednou efektivní tepelnou vodivost byl potvrzen. Byla pozorována závislost těchto dvou parametrů, rostoucí plošná hmotnost snižovala hodnotu tepelné vodivosti (viz graf: 1). Jinak řečeno přidáním nanovláken se z materiálu stával lepší izolant, což byl záměr experimentu.

Vzorek 4. udává hodnoty, které jsou oprostěny od vlivu podkladového spunbondu. Tedy kdyby vše šlo dle naplánovaného postupu, byla by to nejnižší hodnota, která by byla naměřena. To ukazuje na to, že vkládání jakéhokoliv materiálu má podobný efekt jako ověřovaný předpoklad.

Graf 1.: Graf pro výpočet efektivní tepelné vodivosti v závislosti na plošné hmotnosti



\*V příloze č.1 je graf zvětšený na celou stránku pro přehlednější vizualizaci vypočítaných hodnot a čitelnost popisků

### 2.3.5. Less and learn z první přípravy vzorků a jejich měření



Z pilotního pokusu bylo definováno pár pilířů toho, co se podařilo a čeho se příště vyvarovat.

Pro další měření byl definován postup přípravy základního materiálu netkané textilie z polyesteru a bikomponentních vláken v poměru 70:30 v navážce 80 g. Výroba nanovlákněné vrstvy byla rovněž úspěšná, zjistilo se jaké parametry při zvlákňování využít. Dále bylo zjištěno, že způsob zpevnění vrstveného vzorku pomocí termického pojení v tepelném lisu vyvodilo dostatečnou soudržnost vzorku jako celku. Bylo definováno, že vzorek pro měření má mít tvar čtverce o straně 20 cm. Vyrobené vzorky byly proměřeny na laboratorní aparatuře, měřilo se napětí na diferenciálním termočlátku. Z odečtených hodnot byla dopočítána efektivní tepelná vodivost jednotlivých vzorků. Data byla zpracována pomocí softwaru a následně znázorněna v grafické podobě.



Pro jednodušší obsluhu aparatury a možnost využití uvedených výpočetních vztahů, bylo dle zadání rozhodnuto o změně tloušťky vzorku na 18 mm. Bylo zjištěno, že pro měření musí být využito nanovláknenné vrstvy o vyšší plošné hmotnosti, aby bylo možné její bezpečné oddělení od podkladové textilie. Poznatky byly bodově shrnuty (tabulka 7.) pro lepší přehlednost

Tabulka 7.: *Bodové zhodnocení pilotního pokusu*

<p><b>Povedlo se:</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Výroba netkané textilie mykáním</li> <li>• Výroba nanovláknenné vrstvy</li> <li>• Způsob pojení</li> <li>• Potřebný rozměr vzorku 20 x 20 cm</li> <li>• Zprovoznění měřicí aparatury</li> <li>• Měření napětí na diferenciálním termočládku</li> <li>• Vypočítání efektivní tepelné vodivosti</li> <li>• Vyhodnocení dat</li> <li>• Vynesení výsledků do grafu</li> </ul>	<p><b>Nepovedlo se:</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tloušťka vzorku bude lepší, jako tloušťka kalibru tudíž 18 mm (Není podmínkou pouze usnadnění)</li> <li>• Oddělování nanovláknenné vrstvy od podkladového spunbondu při menší plošné hmotnosti</li> </ul>
--	--

#### 2.4. Souběžné testování NT o dvou plošných hmotnostech s přidávkou nanovláken

V dalším experimentu se vycházelo z předchozích poznatků. Byl zvolen stejný netkaný textilní materiál, tedy směs polyesteru a bikomponentních vláken v poměru 70:30, jak již bylo popsáno. Množství vyrobené netkané textilie a její tloušťka byla optimální. Bylo připraveno šest stejných hromádek o hmotnosti 80 g. Každá z nich byla stejným způsobem ručně rozvolněna, promísena a následně předložena mykacímu stroji. Po prvním průchodu mykacím strojem byla vláknenná pavučinka sejmuta z navíjecího válce, pootočená o devadesát stupňů a předložena k druhému promykání. Po druhém navinutí byl materiál opatrně rozstříhnut a sejmuto tak, aby docházelo k co nejmenšímu ovlivnění vzorku. Stejný postup byl opakován u všech šesti vzorků, vzniklo tedy šest stejných základních netkaných textilií.

### 2.4.1. Plošná hmotnost základní netkané textilie

Pro odebrání vzorku byl sestrojen etalon z tvrdého papíru čtverec, o straně 20 cm. Etalon byl přiložen na netkanou textilii, obkreslen a následně vystřižen. Z každého pásu byl odebrán vzorek 20 x 20 cm, pro zjištění plošné hmotnosti (viz tab.: 8). Drobné rozdíly byly přisuzovány nepřesnosti při stříhání vzorku. Tímto způsobem byla zjištěna plošná hmotnost základní netkané textilie, která byla  $190 \text{ g.m}^{-2}$ . Tento parametr byl v předchozím experimentu opomenut.

Tabulka 8.: Zjišťování plošné hmotnosti základní netkané textilie

Odebíraný vzorek 20 x 20 cm				
	Rozměr [m-2]	Hmotnost[g]	Plošná hmotnost [g.m-2]	Průměr plošné hmotnosti [g.m-2]
vzorek 1	0,04	6,9	172,5	190
vzorek 2	0,04	7,8	195	
vzorek 3	0,04	8,4	210	
vzorek 4	0,04	7,6	190	
vzorek 5	0,04	7	175	
vzorek 6	0,04	7,9	197,5	

K dalšímu experimentu bylo na základě předchozí špatné zkušenosti s oddělováním nanovlákněné vrstvy rozhodnuto o změně. Ta spočívala v přechodu na nanovlákněnou vrstvu vyrobenou pomocí stejnosměrného zvláknění (DC metoda). Nanovlákněná vrstva byla vyrobena na zařízení Nanospider o jehož konstrukci a výrobu se postarala firma Elmarco v úzké spolupráci s Technickou univerzitou. Zvlákněný materiál byl znovu polyamid 6 a nanovlákněná vrstva měla plošnou hmotnost  $2 \text{ g.m}^{-2}$ . Pro eliminaci ovlivnění v důsledku nerovnoměrného ukládání nanovláken na krajích pásu, byla nanovlákněná vrstva odebrána z prostředku pásu poskytnutého materiálu.

### 2.4.2. Popis vzorků pro experiment







Byla vytvořena série šesti vzorků, skládající se ze dvou paralelních větví. První větev se skládala ze základní netkané textilie o plošné hmotnosti  $190 \text{ g.m}^{-2}$ . Prvním vzorkem byl slepý vzorek netkané textilie (pouze základní NT). Třetí vzorek byl stejný vzorek opatrně rozdělený po vrstvě cca v polovině a následně do něho byla vložena nanovlákněná vrstva o plošné hmotnosti  $2 \text{ g.m}^{-2}$ . Pátý vzorek byl opět jednoduchá

netkaná textilie tentokrát rozdělená zhruba na třetiny, mezi které byly vloženy dvě nanovláknenné vrstvy, každá o plošné hmotnosti  $2 \text{ g.m}^{-2}$ .

Druhá větev byla založena na zdvojení netkané textilie, čímž bylo docíleno plošné hmotnosti  $380 \text{ g.m}^{-2}$ . Druhý vzorek byl paralelně, jako v první větvi slepý. Čtvrtý vzorek byl ze dvou základních NT, mezi které byla vložena nanovláknenná vrstva. Šestý vzorek byl připraven tak, že základní NT byla rozdělena na půl, dovnitř byla vložena nanovláknenná vrstva a stejný postup byl proveden i pro druhou polovinu. Následně byly vrstvy obou polovin vzorku navrstveny na sebe.

- První větev vycházela z netkané textilie  $190 \text{ g.m}^{-2}$
  - Druhá větev byla analogií pouze se zdvojenou netkanou textilií tedy  $380 \text{ g.m}^{-2}$
- První dvojice vzorku bez nanovláknenné vrstvy
  - Druhá dvojice s vložením nanovláknenné vrstvy ( $2 \text{ g.m}^{-2}$ )
  - Třetí dvojice s vložením dvou nanovláknenných vrstev (po  $2 \text{ g.m}^{-2}$ , tedy  $\Sigma 4 \text{ g.m}^{-2}$ )

Tabulka 9.: *Přehledová tabulka složení jednotlivých vzorků*

Vzorek	Popis složení	Vizualizace	Plošná hmotnost NT [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	Plošná hmotnost nano [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	Celková plošná hmotnost [ $\text{g.m}^{-2}$ ]
1	Slepý vzorek NT		190	---	190
2	Slepý vzorek NT dvojitý		$2 * 190 = 380$	---	380
3	Jednoduchý vzorek rozdělený na půl a vložená vrstva nanovláken		190	2	192
4	Dvojitý vzorek mezi, mezi které byla vložena vrstva nanovláken		$2 * 190 = 380$	2	382
5	Jednoduchý vzorek rozdělený na třetiny a vloženy dvě vrstvy nanovláken		190	$2 * 2 = 4$	194
6	Dvojitý vzorek, každý vzorek rozdělený na půl a vložená vrstva nanovláken		$2 * 190 = 380$	$2 * 2 = 4$	384

### 2.4.3. Tepelné pojení jednotlivých komponent

Vzorky připravené dle popsaných parametrů v předchozí kapitole byly dále pojeny. Vzhledem k rozdílnému rozměru etalonu měřicí aparatury, bylo rozhodnuto změnit i tloušťku vláknenné vrstvy během pojení a to na 18 mm. To byla právě tloušťka etalonu

a zároveň i hodnota v odvozeném vzorci pro výpočet hodnoty efektivní tepelné vodivosti vlákných materiálů. Parametry pojení byly použity z předchozího experimentu, teplota vytápění desek tepenného lisu tedy byla 130 °C. Doba působení teploty a tlaku lisu byla 30 s. Vzorky z první větve, tedy jednoduché NT, převzaly nastavenou tloušťku celkem snadno. U vzorků z druhé větve bylo po odlehčení (snížení přítlaku) pozorováno lehké nabývání oproti nastavené tloušťce, tudíž snaha objemnějšího vlákného vzorku vrátit se k původnímu stavu.

#### **2.4.4. Měření tepelné vodivosti vlákných materiálů**

Druhé měření bylo cíleno na zmapování výsledných parametrů vzorků, v závislosti na změně plošné hmotnosti jak základní netkané textilie, tak nanovlákné vrstvy. Z toho důvodu bylo vytvořeno šest pruhů NT, které se rozdělily do dvou skupin (větví) a každá skupina tedy obsahovala tři vzorky (viz tab.: 9). Větve byly rozděleny v závislosti na základní plošné hmotnosti NT na jednoduché a zdvojené (tedy na 190 a 380 g.m<sup>-2</sup>). První dvojice byl slepý vzorek tedy, vzorek bez použití nanovlákné vrstvy. Druhá dvojice obsahovala jednu nanovláknou vrstvu a třetí dvojice obsahovala dvě vrstvy nanovláken.

Příprava laboratorní měřicí aparatury probíhala obdobně jako u předchozího měření. Byla zapnuta cirkulace obou vodních okruhů s tím, že první byl vyhříván a udržován na teplotu cca 30 °C a druhý byl zhruba o 5 °C chladnější. Po temperaci vody ve vysílacím okruhu, došlo k oscilaci hodnoty teploty kolem té požadované. To byl signál, že je zařízení připraveno k měření. Dle stejné posloupnosti jako v předchozím měření byl zprovozněn a nastaven měřicí přístroj kanálový multiplexor Agilent 34901A. Následně bylo zapnuto posuvné měřidlo reprezentující rozestup mezi teplosměnnými plochami, které se překalibrovalo pomocí založení etalonu o tloušťce 18 mm.

Pro zvýšení vypovídající hodnoty měření, byl každý z připravených vzorků podroben deseti měřením napětí na čidle tepelného toku U1 a napětí na diferenciálním termočlátku U2. Tento fakt nutně vedl k nutnosti úpravy výchozí tabulky pro výpočet.

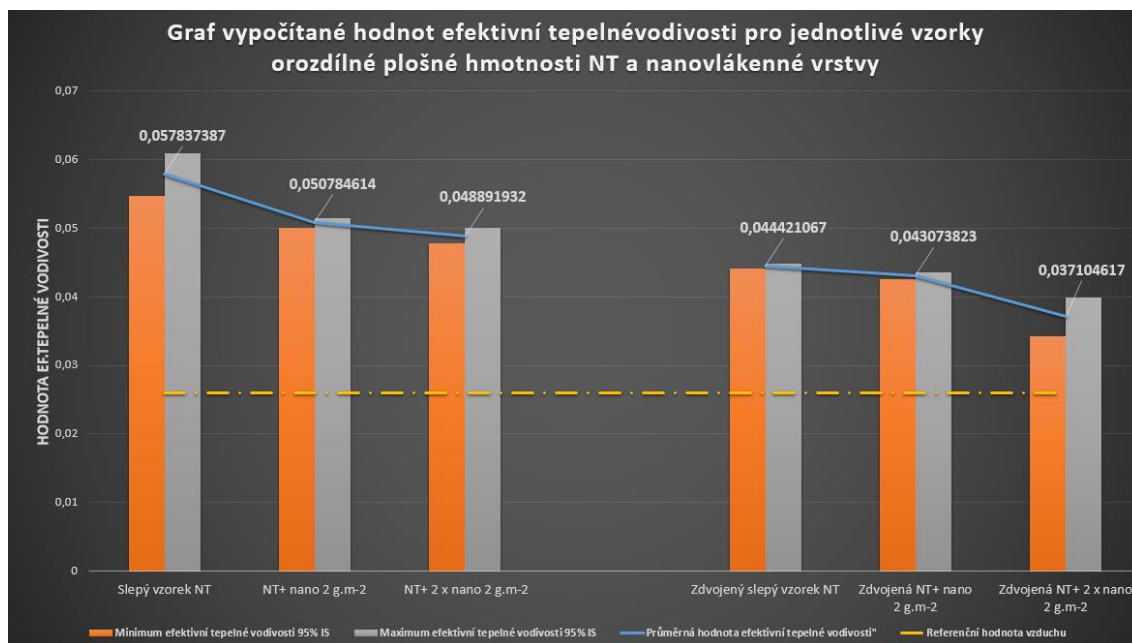
Byla použita rovnice pro výpočet rozdílu teplot  $\Delta T$  mezi teplosměnnými plochami. K výpočtu byl využit vztah z kalibračního listu použitého termočlánu. V rovnici byla použita změřená hodnota  $U_2$  pro dopočítání výsledku. Další dopočítanou hodnotou byla efektivní tepelná vodivost materiálu  $\lambda$  (viz tab.:10). Pro výpočet bylo použito změřené hodnoty  $U_1$  nastavené tloušťky vzorku (18 mm) a dopočítané hodnoty rozdílu teplot  $\Delta T$ .

Tabulka 10.: *Tabulka vypočítaných hodnot rozdílu teplot  $\Delta T$  a efektivní tepelná vodivost materiálu  $\lambda$*

VZOREK 1 - Slepý vzorek NT														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	6,2252	6,2504	6,2756	6,2	6,1244	6,0992	6,0488	5,9984	6,0236	6,0236	6,12692	0,098538123	6,065845439	6,187994561
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,058075	0,067112	0,056053	0,051877	0,054626	0,055181	0,055593	0,056969	0,056683	0,056207	0,05783739	0,005066559	0,054697101	0,060977673
VZOREK 2 - Zdvojený slepý vzorek NT														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,8976	5,8976	5,8724	5,822	5,7968	5,7968	5,7212	5,7212	5,696	5,696	5,79176	0,07626904	5,74448796	5,83903204
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,044856	0,044758	0,043875	0,044354	0,044596	0,044646	0,043029	0,044182	0,045033	0,044882	0,04442107	0,000571572	0,044066803	0,044775331
VZOREK 3 - NT + nano 2 g.m-2														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,6708	5,6204	5,5952	5,57	5,4944	5,4944	5,4692	5,4944	5,4188	5,4188	5,52464	0,081111124	5,474366805	5,574913195
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,050039	0,050182	0,04969	0,049245	0,049871	0,050393	0,051254	0,05175	0,052843	0,052578	0,05078461	0,001186767	0,050049048	0,05152018
VZOREK 4 - Zdvojená NT + nano 2 g.m-2														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,3936	5,3432	5,318	5,318	5,2424	5,192	5,192	5,1416	5,1416	5,1164	5,23988	0,092556413	5,182512941	5,297247059
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,042078	0,043227	0,043486	0,043108	0,043347	0,043491	0,043325	0,041071	0,043583	0,044022	0,04307382	0,000816324	0,04256786	0,043579786
VZOREK 5 - NT + 2 x nano 2 g.m-2														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,0408	4,9904	4,9652	4,9148	4,8896	4,8644	4,8392	4,814	4,688	4,6628	4,86692	0,116275542	4,794851673	4,938988327
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,045251	0,047548	0,049927	0,047112	0,051169	0,048956	0,051642	0,048754	0,048656	0,049904	0,04889193	0,001820843	0,047763362	0,050020502
VZOREK 6 - Zdvojená NT + 2 x nano 2 g.m-2														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	4,4864	4,4612	4,436	4,2596	4,2344	4,2092	4,2092	4,184	4,184	4,1588	4,28228	0,120565607	4,207552663	4,357007337
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,03025	0,031	0,030076	0,040415	0,041265	0,036877	0,038581	0,04094	0,041351	0,040291	0,03710462	0,004550299	0,034284312	0,039924921

Vzhledem k většímu objemu dat, v porovnání s předchozím měřením, bylo možné využít statistickou analýzu. Do tabulky byla tedy zanesena průměrná hodnota ze všech deseti měření každého vzorku. Statistika byla reprezentována vypočítáním směrodatné odchylky a intervalu spolehlivosti. U intervalu spolehlivosti bylo vycházeno z devadesáti pěti procentní pravděpodobnosti. To znamenalo, že s pravděpodobností 95% byla změřená hodnota v intervalu mezi spodní a vrchní hranicí uvedenou ve výpočtu tabulky. Takto získaný souhrn dat byl zpracován a zanesen do vizuální podoby grafu (viz graf: 2).

Graf 2.: Graf pro výpočet efektivní tepelné vodivosti v závislosti na plošné hmotnosti



\*V příloze č. 2 je graf zvětšený na celou stránku pro přehlednější vizualizaci vypočítaných hodnot a čitelnost popisků

Vypočítané hodnoty byly zaneseny do grafu, který znázorňuje efektivní tepelnou vodivost vlákenného materiálu u všech šesti vzorků. Grafické znázornění měření bylo realizováno vynesemím průměrné hodnoty ze souboru deseti měření v grafu jako modré body propojené spojnicí. Dále byl vynesena 95 % interval spolehlivosti, který udával meze, mezi kterými se naměřené hodnoty s touto pravděpodobností pohybovali. Kde oranžový sloupec znázorňuje minimum a šedý maximum. Do grafu byla zároveň oproti předchozímu grafu zanesena přerušovaná čára, která zobrazila referenční hodnotu pro tepelnou vodivost vzduchu.

Při pohledu na graf bylo patrné, že vzorky znázorněné v levé části grafu tedy ty s jednoduchou netkanou textilií měly vypočítané hodnoty o poznání výše. Vyšší koeficient efektivní tepelné vodivosti znamenal, že materiál hůře izoloval průchod tepla mezi teplosměnnými plochami. Bylo pozorováno, že energie při průchodu vlákennou vrstvou o menší plošné hmotnosti lépe proniká skrz. Čím více vláken ať už netkané

textilie nebo přidané vrstvy nanovláknenného materiálu, tím více se snižovala hodnota tepelné vodivosti. Více překážek v průchodu energie znamenalo, že byla menší její změřená hodnota na opačné straně vzorku, část zanikala vlivem zahřívání vláken, která stála průchodu energie v cestě. Čím více a jemnějších vláken vzorek obsahoval, tím více bylo ve vzorek jemných pórů obsahujících vzduch. Pokud vlákno absorbovalo energii, bylo zahříváno a zároveň čím více bylo obklopeno malými póry obsahující vzduch, tím menší mělo možnost předat energii sousednímu vláknu (tím probíhaly vyšší ztráty). Z toho důvodu byla hodnota tepelné vodivosti nižší.

Tento předpoklad platí do doby, kdyby se vzorek stlačil natolik, že se z vnitřních pórů vytlačí vzduch nebo se jeho procento sníží natolik, že zahřáté vlákno přenáší tepelnou energii na vlákna okolní. Došlo by k zlomu a vzorek by se začínal přibližovat chování pevné látky. Trochu paradoxně by byla hodnota pro čistý a pevný PA 6 vyšší, neobsahovali by mikro kapsle vzduchu (póry), které sloužily jako retardéry šíření tepelné energie. Pouze by doba nahřívání a ustálení hodnot měření trvalo delší časový interval.

#### 2.4.5. Less and learn z druhé přípravy vzorků a jejich měření

V druhém experimentu probíhalo ověření metodiky pro přípravu vzorků. S přihlédnutím k předchozím zkušenostem a částečným nedostatkům bylo pár bodů v přípravě upraveno (viz tab.:11). Bylo doplněno měření plošné hmotnosti základní netkané textilie. Změněna tloušťka finálního vzorku na 18 mm. A dále byl rozšířen rozsah měření pro zlepšení vypovídající hodnoty získaných dat.

Tabulka 11.: *Bodové zhodnocení druhého experimentu*

<b>Povedlo se</b> 	<b>Nepovedlo se</b> 
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ověření předchozích poznatků přípravy vzorků</li><li>• Měření plošné hmotnosti NT</li><li>• Rozdílný způsob přípravy nanovláken</li><li>• Změna tloušťky vzorku na 18 mm</li><li>• Výpočet efektivní tepelné vodivosti</li><li>• Zhodnocení pomocí grafu</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Nebylo nic zásadního, co by se nepovedlo</b></li></ul>

## **2.5. Porovnávání tepelné vodivosti nanovlákněné vrstvy s meltblownem**

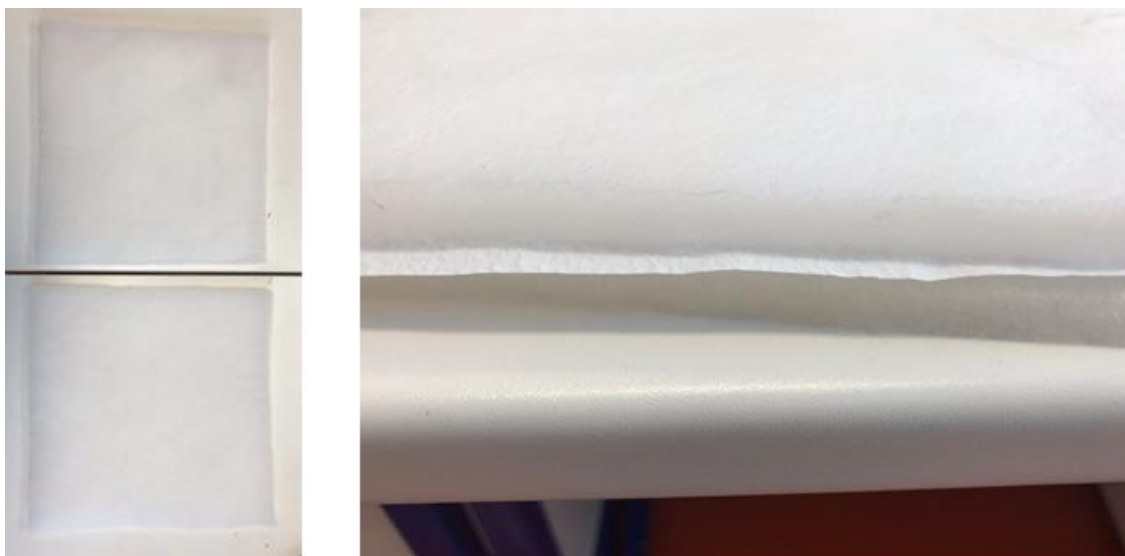
Účelem třetí části experimentu bylo prozkoumat vliv vložení různých vlákněných vrstev do stejného vzorku NT. K tomuto postupu byl experiment směřován z důvodu eliminace nepřesnosti měření způsobené rozdílem v konzistenci NT. Tímto postupem byl ověřován pouze rozdíl vnitřních vlastností v závislosti na změně vložené vrstvy. Navíc byl zkoumán i jiný materiál, v tomto případě vlákněná vrstva získaná metodou meltblown. To umožnilo komplexnější pohled na analyzovanou situaci.

K přípravě vzorku netkané textilie byla použita stejná metodika, která byla definována při prvním a zároveň ověřena v druhém experimentu. Dvakrát promykaná vlákněná vrstva byla sejmuta z navíjecího válce. Následně byla opatrně rozdělena po vrstvě v polovině a mezi obě poloviny byl vložen pečicí papír, který fungoval jako separátor při tepelném pojení. Tento vzorek byl vložen mezi pečicí papír, který zabránil nataveným vláknům ulpívat na desce tepelného lisu. Následně byl vzorek vložen mezi desky tepelného lisu, kde uvnitř docházelo k pojení vláken ve vrstvu.

Vyrobená vlákněná vrstva byla složena ze dvou samostatných částí, které vznikly vyndáním pečicího papíru ze středu textilie. Po expozici tlaku a tepelnému působení desek zahřátých na 130 °C, měl vzorek tloušťku 18 mm.

Základní netkaná textilie byla připravena dle popsaného postupu, na připravenou NT byl obkreslen čtvercový etalon, který byl využíván již dříve pro stanovení plošné hmotnosti vzorku. Dle připraveného obrysu byl vzorek vystřížen (viz obr.: 36) a z přepočtu byla získána plošná hmotnost, která pro aktuální vzorek byla 185 g.m<sup>-2</sup>. Takto získaná NT byla brána jako referenční vzorek, tudíž byl vzorek konstantní pro všechna měření a měnila se pouze vložená vlákněná vrstva.

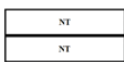
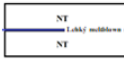
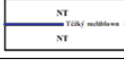
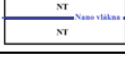




Obrázek 36: a) Přípravený vzorek rozdělený na dvě poloviny před vložením vláknenné vrstvy; b) Detail připraveného vzorku netkané textilie po vložení nanovláknenné vrstvy

Pro měření byl pořízen soubor čtyř porovnatelných vzorků. První vzorek byl z prosté NT, obě poloviny byly přiloženy k sobě a vloženy do měřicí aparatury. Příprava druhého vzorku spočívala ve vložení lehkého spunbondu ( $4,5 \text{ g.m}^{-2}$ ). Do třetího vzorku byl vložen těžký spunbond ( $6,5 \text{ g.m}^{-2}$ ). Poslední vzorek byl připraven vložением nanovláknenné vrstvy o plošné hmotnosti  $2 \text{ g.m}^{-2}$ . Pro lepší přehlednost byly jednotlivé vzorky shrnuty a popsány (viz tab.: 12).

Tabulka 12.: Přehledová tabulka složení jednotlivých vzorků

Vzorek	Popis složení	Vizualizace	Plošná hmotnost vzorku [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	Materiál vložené vrstvy
1	Slepý vzorek NT		185	---
2	Vzorek NT s vložением lehkého spunbondu		$185 + 4,5 = 189,5$	Lehký meltblown
3	Vzorek NT s vložением těžkého spunbondu		$185 + 6,5 = 191,5$	Těžký meltblown
4	Vzorek NT s vložением vrstvy nanovláken		$185 + 2 = 187$	Nano

Měření bylo provedeno na každém vzorku v deseti různých místech. Odečítané hodnoty byly zaznamenány do výpočtové tabulky (viz tab.: 13), která je následně zpracovávala

dle nastavených vzorců a tím byly získány hodnoty rozdílu teplot nádob a tepelné vodivosti.

Tabulka 13.: *Tabulka změřených hodnot s výpočtem rozdílů teplot a tepelné vodivosti*

Vzorek 1					0,057628075
1	213	1,071	5,2172	0,0589	
2	213	1,065	5,2172	0,05857	
3	210	1,064	5,1416	0,059375	
4	219	1,098	5,3684	0,058684	
5	211	1,029	5,1668	0,057142	
6	215	0,999	5,2676	0,054414	
7	213	1,047	5,2172	0,05758	
8	209	1,016	5,1164	0,056976	
9	208	1,039	5,0912	0,058554	
10	211	1,01	5,1668	0,056087	

Samotná NT

Vzorek 3					0,042179478
1	246	0,893	6,0488	0,042358742	
2	245	0,884	6,0236	0,042107258	
3	244	0,872	5,9984	0,041710163	
4	243	0,859	5,9732	0,041261682	
5	243	0,866	5,9732	0,041597924	
6	242	0,871	5,948	0,042015353	
7	239	0,874	5,8724	0,042702827	
8	239	0,87	5,8724	0,042507391	
9	238	0,867	5,8472	0,042543378	
10	234	0,861	5,7464	0,042990067	

NT+Spanbond Těžký

Vzorek 2					0,043394589
1	225	0,832	5,5196	0,043249	
2	221	0,821	5,4188	0,043471	
3	222	0,823	5,444	0,043375	
4	223	0,819	5,4692	0,042966	
5	226	0,831	5,5448	0,043001	
6	225	0,84	5,5196	0,043665	
7	220	0,818	5,3936	0,043515	
8	219	0,809	5,3684	0,043238	
9	218	0,811	5,3432	0,043549	
10	217	0,814	5,318	0,043917	

NT+SPANBOND Lehký

Vzorek 4					0,041611975
1	256	0,929	6,3008	0,042303942	
2	261	0,92	6,4268	0,041072758	
3	261	0,922	6,4268	0,041162046	
4	262	0,928	6,452	0,041268097	
5	260	0,919	6,4016	0,041189621	
6	261	0,926	6,4268	0,041340624	
7	260	0,924	6,4016	0,041413722	
8	261	0,936	6,4268	0,041787067	
9	255	0,924	6,2756	0,042245216	
10	255	0,926	6,2756	0,042336656	

NT+NANO vrstva

Pro vyšší přehlednost dosažených výsledků byl proveden export získaných dat do další tabulky, která zobrazovala pouze výsledky výpočtů. Získaná data bylo možné podrobit statistické analýze. Do tabulky byla zanesena průměrná hodnota ze všech deseti měření každého vzorku. Byla vypočítána směrodatná odchylka a interval spolehlivosti pro jednotlivé hodnoty (viz tab.: 14).

Tabulka 14.: *Tabulka hodnot rozdílů teplot a tepelné vodivosti doplněné o statistiku.*

VZOREK 1														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,2172	5,2172	5,1416	5,3684	5,1668	5,2676	5,2172	5,1164	5,0912	5,1668	5,19704	0,07626904	5,14976796	5,24431204
$\lambda [W.m-1.K-1]$	0,0589	0,05857	0,059375	0,058684	0,057142	0,054414	0,05758	0,056976	0,058554	0,056087	0,05762807	0,001445517	0,056732134	0,058524016

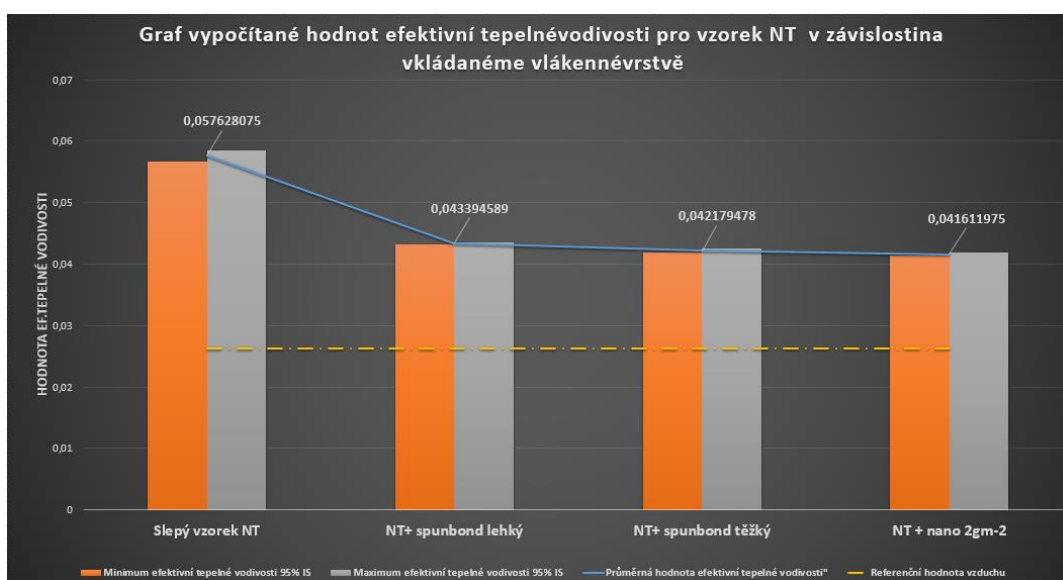
VZOREK 2														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	5,5196	5,4188	5,444	5,4692	5,5448	5,5196	5,3936	5,3684	5,3432	5,318	5,43392	0,074924986	5,387481012	5,480358988
$\lambda [W.m-1.K-1]$	0,043249	0,043471	0,043375	0,042966	0,043001	0,043665	0,043515	0,043238	0,043549	0,043917	0,04339459	0,000278542	0,043221946	0,043567231

VZOREK 3														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	6,0488	6,0236	5,9984	5,9732	5,9732	5,948	5,8724	5,8724	5,8472	5,7464	5,93036	0,088774131	5,875337223	5,985382777
$\lambda [W.m-1.K-1]$	0,042359	0,042107	0,04171	0,041262	0,041598	0,042015	0,042703	0,042507	0,042543	0,04299	0,04217948	0,00051342	0,041861258	0,042497699

VZOREK 4														
MĚŘENÍ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X - Průměr	S - Sm.odch	95% IS min	95% IS max
$\Delta T [^{\circ}K]$	6,3008	6,4268	6,4268	6,452	6,4016	6,4268	6,4016	6,4268	6,2756	6,2756	6,38144	0,06552	6,340830283	6,422049717
$\lambda [W.m-1.K-1]$	0,042304	0,041073	0,041182	0,041268	0,04119	0,041341	0,041414	0,041787	0,042245	0,042337	0,04161197	0,00048357	0,041312255	0,041911694

Takto zpracované hodnoty byly předlohou pro vytvoření grafu, který znázorňuje efektivní tepelnou vodivost vlákenného materiálu u všech čtyř vzorků. Grafické znázornění měření (viz graf: 3) bylo realizováno vynesemím průměrné hodnoty ze souboru deseti měření v grafu jako modré body propojené spojnicí. Dále byl vynesem 95 % interval spolehlivosti, který udával meze, kde se hodnoty s touto pravděpodobností pohybovaly a čárkovanou čarou referenční hodnota tepelné vodivosti pro vzduch.

Graf 3.: *Graf efektivní tepelné vodivosti v závislosti na vkládané vrstvě jemných vláken*



\*V příloze č. 3 je graf zvětšený na celou stránku pro přehlednější vizualizaci vypočítaných hodnot a čitelnost popisků

Z hodnot zakreslených do grafu je patrné, že počáteční měření netkané textilie se hodnotami podobá předchozím měřením. Výsledky po přidání lehkého meltblowu se i přes malou plošnou hmotnost ( $4,5 \text{ g.m}^{-2}$ ) výrazně snížily oproti měření slepého vzorku. Vzorek s těžkým meltblowem ( $6,5 \text{ g.m}^{-2}$ ) dosahoval ještě lepších izolačních vlastností. Nicméně poslední vzorek s vložením nanovlákné vrstvy o plošné hmotnosti ( $2 \text{ g.m}^{-2}$ ) izoloval nejlépe. Z pokusu vyplynulo, že jemnost vláken spojená s mikrokapslemi ve struktuře hraje velkou roli na výsledné hodnoty. Vzorek těžkého meltblowu se začal přibližovat vlastnostem s nanovláknou při více jak trojnásobné plošné hmotnosti.

## 2.6. Diskuze výsledků měření

Měřením se prokázalo, že zvyšující se plošná potažmo objemová hmotnost má zásadní vliv na tepelnou vodivost netkané textilie. Tento předpoklad se potvrdil napříč všemi měřeními.

- V prvním experimentu bylo trochu neúmyslně přistoupeno k měření vzorku složeného ze tří částí (NT/spunbond/nanovlákná), v tomto složení se podařilo docílit nejnižší hodnoty tepelné vodivosti. Vzorek byl tedy nejlepším izolantem ze všech provedených měření.
- V druhém experimentu se testovaly vzorky se zvyšujícím se obsahem nanovláken. Zároveň měření probíhala na vzorcích o dvou plošných hmotnostech netkané textilie. Bylo prokázáno, že ani vložení dvou vrstev nanovláken nebylo docíleno izolačních vlastností, kterými disponoval slepý vzorek netkané textilie o dvojnásobné plošné hmotnosti.
- V posledním experimentu byl ověřován vliv plošné hmotnosti a jemnosti vláken na finální tepelnou vodivost. Bylo zjištěno, že jemnost vláken může mít zásadní vliv na tepelnou vodivost. Což bylo přisuzováno mikro kapslím vzduchu ve struktuře vrstvy. Parametrům s nanovláknem se bylo možné přiblížit i s vložení meltblownu, byť za cenu trojnásobně vyšší plošné hmotnosti.
- Bylo možné se parametrům nanovláknem přiblížit i s vložení meltblownu, za cenu trojnásobně vyšší plošné hmotnosti.

### 3. Závěr

V rámci této diplomové práce a jejího zadání bylo provedeno seznámení s tematikou prostupu tepla. Jednotlivé způsoby přenosu tepelné energie byly popsány v teoretické části tak, aby čtenář měl základní povědomí o daném tématu. Dále bylo vybráno pár základních pojmů používaných při popisu dějů během sdílení tepla. Byl proveden popis základních metodik pro zjišťování prostupu tepla u plošných textilií. Z nichž jedna byla zvolena pro ověřování výsledků v experimentální části. Ta byla zvolena s ohledem na objemnost zkoušeného vlákenného materiálu a dostupnost zařízení v laboratořích TUL.

Byla stanovena metodika pro výrobu netkané textilie, která spočívala ve výrobě vlákenné pavučinky na válcovém stroji. Vlákna byla vybrána tak, že se kombinovala základní vlákna polyesteru s vlákny pojivými vyrobenými metodou jádro plášť. Pavučinka byla vrstvena na navíjecí válec, odkud byla následně sejmuta. Tím vznikla netkaná textilie, u které byly patrné jednotlivé vrstvy. To bylo žádoucí při rozdělování netkané textilie za účelem vkládání jednotlivých vrstev jemných vláken, ať už nanovláken nebo vrstvy získané metodou meltblown. Po vložení vrstvy byl vzorek pro zvýšení soudržnosti a tvarové stálosti vložen do tepelného hydraulického lisu. Expozicí bikomponentních vláken tepelnému namáhání došlo k natavení pláště s nižší teplotou tání a roztavený materiál se dostal do míst křížení, kde po vychladnutí fungoval jako pojídlo. Ze zpevněné textilie byl dle etalonu tvaru čtverce o rozměru strany 20 cm obkreslen a vystřižen vzorek pro měření tepelných vlastností.

Při zachování parametrů základní netkané textilie a její tloušťky se s vložení vrstvy změnila jak plošná tak i objemová hmotnost. Z tohoto popudu bylo přistoupeno ke zjednodušení a tloušťka se při dílčích experimentálních měřeních brala jako konstanta. Toto zjednodušení vycházelo z předpokladu, že nosník měřicího zařízení vyvíjel dostatečnou sílu, aby objemný materiál zmáčkl na požadovanou tloušťku. To se bez problému dělo a rozdíl nebyl tak veliký, aby to činilo problém.

Tento experiment byl založen na myšlence zmapování termických vlastností netkané textilie s přídavkem jemných vláken. Před započítím experimentu byla vyvozena hypotéza že:

***„ Vložením jemných vláken dojde ke zvýšení objemové hmotnosti vzorku, což bude mít za následek zlepšení tepelně izolačních vlastností vzniklé vlákenné vrstvy”.***

Z výsledků všech dílčích experimentálních měření se tento předpoklad potvrzuje. Zvyšující se plošná (v tomto případě i objemová) hmotnost má za následek snižující se součinitel tepelné vodivosti vzorku. Tento jev byl dle měření pozorován i při zvyšování plošné potažmo objemové hmotnosti samotné netkané textilie. Nicméně přidáním jemných vláken toho bylo docíleno již přidáním vrstev o velmi malé plošné hmotnosti. Kdež to při zachování pouze netkané textilie musel být vzorek téměř dvojnásobné plošné hmotnosti.

Stejně tak byl zajímavý i poznatek z posledního měření, kde se ukázalo, že použitím vlákenné vrstvy lehkého meltblownu o plošné hmotnosti  $4,5 \text{ g.m}^{-2}$  nebylo docíleno podobné hodnoty jako tomu bylo u nanovlákné vrstvy o plošné hmotnosti  $2 \text{ g.m}^{-2}$ . Rozdíl byl relativně znatelný. To bylo přisuzováno rozdílu průměru vláken a s tím spojenému množství otvorů vyplněných vzduchem, tedy množstvím pórů. Při použití těžkého meltblownu o plošné hmotnosti  $6,5 \text{ g.m}^{-2}$  se hodnoty začínaly blížit hodnotám s vloženými nanovláknami. Z čehož plyne i plnění posledního bodu zadání a tím bylo navrženo dalšího postupu.

Jako další postup pro pokračování v této práci bych navrhnul vytvoření vlákenné vrstvy, připravené metodou meltblown o vyšší plošné hmotnosti než byl poslední připravený vzorek tedy  $6,5 \text{ g.m}^{-2}$ . U takového vzorku by mohlo být provedeno opětovné měření tepelné vodivosti a pokud by měření ukázalo shodné nebo velmi podobné vlastnosti, zkusit měření validovat i jinou metodou měření pro vyšší robustnost výsledků. Dále by bylo zajímavé vytvořit finanční a časovou analýzu obou metod výroby jemných vláken. Popřípadě vymyslet možnost aplikace takové textilie s nanovláknami. Ta by mohla

směřovat do izolační výplně oblečení nebo lehkých spacích pytlů pro extrémní sportovce či armádu.

#### 4. Použité zdroje

- [1] PRŮŠA, D.: Ověřování metodiky měření materiálových charakteristik tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek. Bakalářská práce, VUT v Brně, Brno 2017,
- [2] KREMPASKÝ, J.: Meranie termofyzikálných veličin. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1969
- [3] Vedení tepla. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): [online] [cit.dne .2020-2-13], dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD\\_teplo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_teplo)
- [4] H. LIENHARD IV, John. A heat transfer: Textbook fifth edition. 2019. University of Houston. ISBN 9780486837352.
- [5] Šíření tepla z místa na místo [online] [cit. 2020-04-22], dostupné z: <http://fyzika.weebly.com/zaacuteepisky.html>
- [6] INCROPERA, P. Frank. Introduction to Heat Transfer. 5th Edition. Wiley, 2006. ISBN 978-0470055533.
- [7] MALINA, T.: Měření tepelné vodivosti přírodních a syntetických materiálů nestacionární metodou. Fakulta technologická, VUT Brno, Zlín 1998.
- [8] BITTNER, J.: Měření tepelných vlastností materiálů. Bakalářská práce, fakulta technologická, UTB ve Zlíně, Zlín 2006
- [9] KREMER, R.: Tepelná technika. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1970, s. 212-213. ISBN 04-401-70.
- [10] ŠORIN, S. N. Sdílení tepla. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1968, s. 124-125. ISBN 04-014-68.
- [11] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2002. ISBN 80-7204-248-3
- [12] ONDRÁŠ, J.: Nestacionární metody měření tepelné vodivosti. Diplomová práce, fakulta technologická, VUT Brno, Gottwaldov 1983
- [13] BRZOBOHATÝ, P.: Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů.
- [14] KUNA, L. Tepelné izolácie a meranie tepelných strát. Edícia energetickej literatúry. Slov. vyd. techn. lit., 1963.

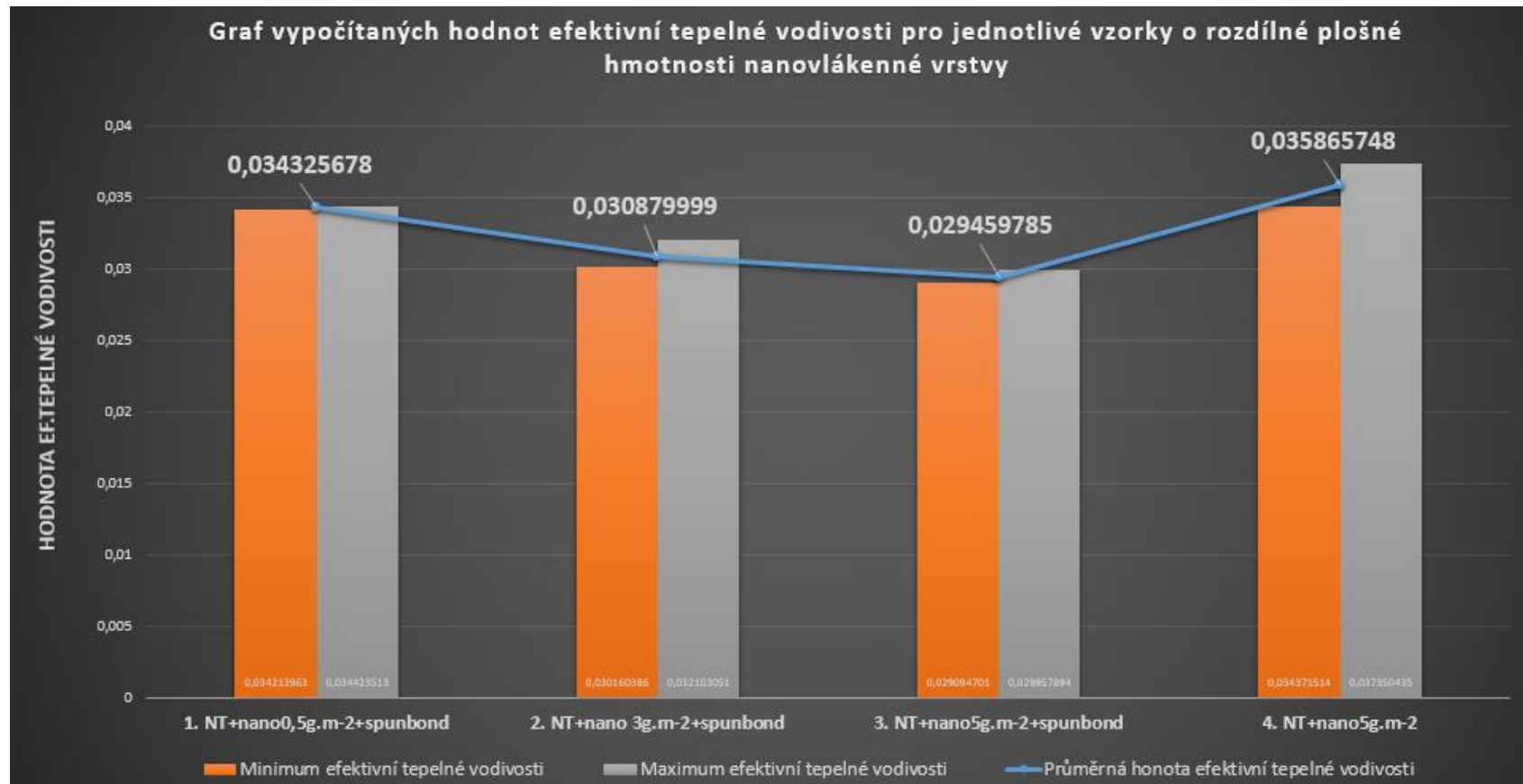


- [15] Yondea, M., Kawabata, S.: Analysis of Transient Heat Conduction and its Applications, Part 1, Journal of the Textile Machinery Society of Japan, Vol. 29 No.4, 1983, s. 73-83
- [16] SPORKA, M.: Stanovení tepelné vodivosti pevných látek. Bakalářská práce, fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, VŠB v Ostravě, Ostrava 2013
- [17] SITTEOVÁ, J.: Metodika měření tepelné vodivosti plošných textilií. Diplomová práce, fakulta textilní, TUL v Liberci, Liberec 2010
- [18] JIRSÁK, O. a KALINOVÁ, K. Netkané textilie. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2003. 129 s. ISBN 80-7083-746-2.
- [19] MARK, J. E. *Polymer Data Handbook*. 2nd. ed. New York: Oxford University Press, 2009. 1264 s. ISBN 978-0-19-518101-2.
- [20] ALBRECHT, W., FUCHS, H., KITTELMANN, W. Nonwovens Fabrics, WileyVCH, Weinheim 2003. ISBN: 3-527-30406-1
- [21] RUSSEL, S. J. Handbook of nonwovens. North America: Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2007. ISBN 1-85573-603-9.
- [22] Kovář, R.: Struktura a vlastnosti plošných textilií. 1. vyd, Liberec 2002, ISBN: 80-7083-676-8
- [23] RŮŽIČKOVÁ, J. Elektrostatické zvlákňování nanovláken. Vyd. 2., nezměn. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-066-3.
- [24] Technická norma ISO/TS 80004-1 [2020-06-11]
- [25] ELMARCO - Nanospider [online] Technologie Nanospider, [06-22-2020] Dostupné online: <https://www.elmarco.cz/ns-technologie>
- [26] AC ZVLÁKŇOVÁNÍ [online]. TUL v Liberci, Nanoed, [06-27-2020]. Dostupné online:[https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/5383/mod\\_resource/content/0/V\\_AC%20zvlaknovani%2010\\_6\\_2015.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/5383/mod_resource/content/0/V_AC%20zvlaknovani%2010_6_2015.pdf)
- [27] RAJENDRAN, S. Advanced Textiles for Wound Care: A volume in The Textile Institute Book Series. Woodhead Publishing, 2019. ISBN 978-0-08-102192-7.
- [28] HODKOVÁ, Z.: Studium hoření kolmo kladených netkaných textilií. Diplomová práce, TUL v Liberci, Liberec 2019.

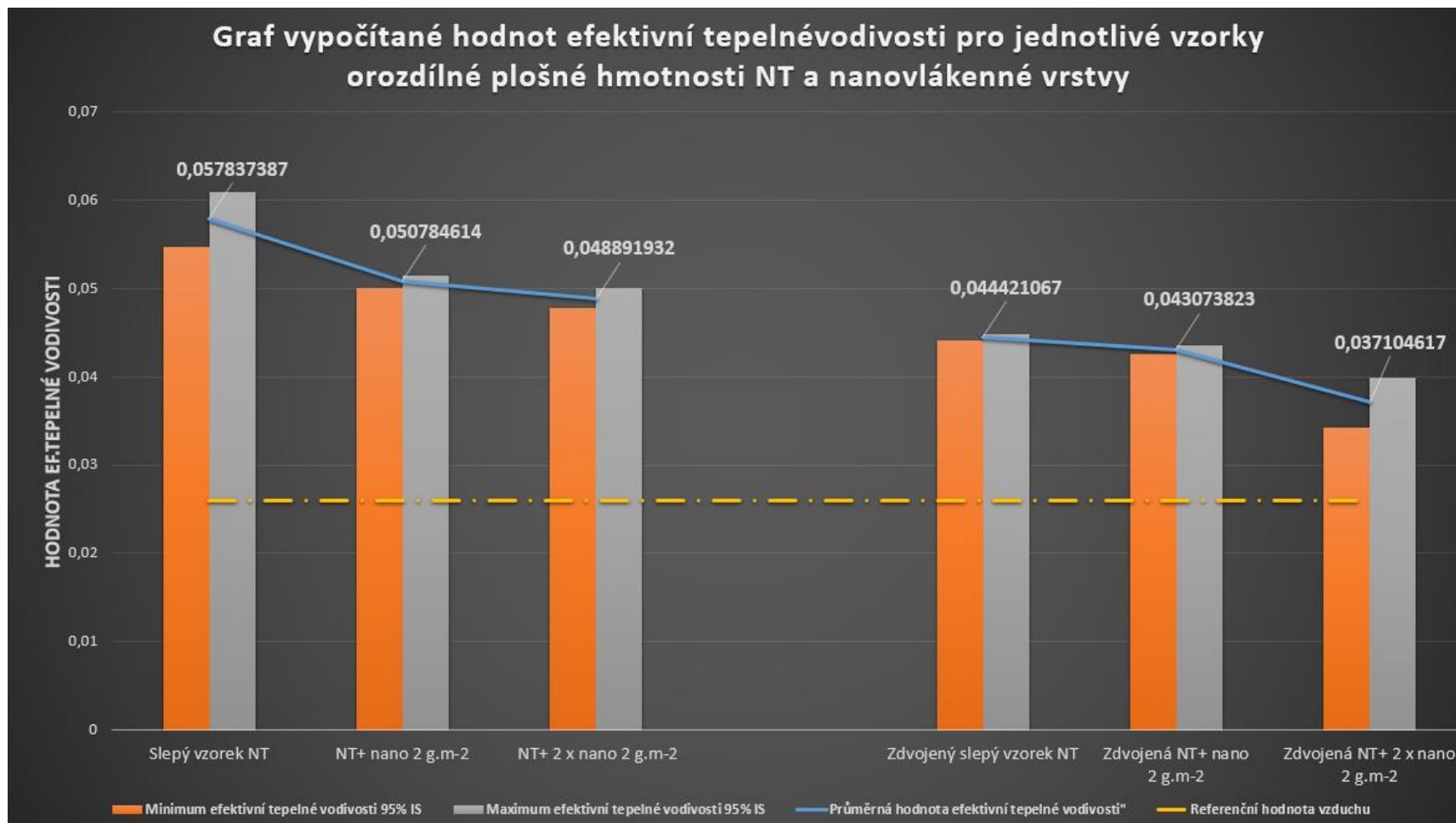
[29] SOUKUP, J. Technická měření. 2., opr. a dopl. vyd. Ústí n. L.: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2014. ISBN 9788074147302.

## 5. Přílohy

*Příloha č. 1: Dosažené výsledky z prvního experimentu zvětšený graf pro vyšší přehlednost, tloušťka vzorku 11mm*



Příloha č. 2: Dosažené výsledky z druhého experimentu zvětšený graf pro vyšší přehlednost, tloušťka vzorku 18mm



*Příloha č. 3: Dosažené výsledky ze třetího experimentu zvětšený graf pro vyšší přehlednost, tloušťka vzorku 18mm*

