

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KOD - 773

**MOŽNOSTI HODNOCENÍ NASÁKAVOSTI TEXTILIE POMOCÍ
TERMOVIZE**

**THE POSSIBILITIES OF EVALUATING THE ABSORBABILITY
OF TEXTILES BY MEANS OF THERMOVISION**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Dr. Ing. Zdeněk Kůs

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 91

Počet obrázků: 30

Počet tabulek: 11

Počet grafů: 45

Originální zadání DP

ODLOŽENÍ DP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským). Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 3.1.2008

.....

Podpis

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří mi pomohli ke zpracování této diplomové práce.

Děkuji především panu profesorovi Kůsovi za odborné vedení. Své poděkování bych také ráda vyjádřila panu Doc. Havelkovi, který mi byl nápomocen při experimentálním měření dat. A v neposlední řadě bych také ráda poděkovala panu Ing. Svobodovi, který mě zasvětil do tajů termografie.

ANOTACE

Diplomová práce je rozdělena na dvě základní části – **na část teoretickou**, kde je provedena rešerše téma nasákavosti plošných textilií, popis souvisejících dějů se současným sledováním tepelných efektů, pozornost je zde též věnována principům termografie a bezkontaktních měřících systémů.

V **části experimentální** je navržen experiment samotný, popsána jeho příprava a jsou sledovány a zaznamenány teplotní změny u zkoumané textilie za pomocí metody termovize.

Závěrem je pojednáno o tom, jak struktury jednotlivých textilních materiálů ovlivňují tepelné efekty, které jsou spojeny s navlhčením textilie.

ANNOTATION

The dissertation is divided to two basic parts - **a theoretical part**, in which a research on absorbability of the surface textiles as well as a description of relevant occurrences and the observation of thermal effects is included. Attention in this part is also given to the fundamentals of thermography and non-contact measuring systems.

In **the experimental part** the design of the experiment itself is included, its preparation is described and the changes in temperature of the examined fabric are observed and recorded through the thermovision method.

In the conclusion, the observation of how the structures of different textile materials influence the thermal effects interconnected with the wetting of the fabric is included

Klíčová slova: Termovize, sdílení tepla, bezkontaktní teploměry, nasákavost.
Key words: Thermal vision, heat interchange, non contact thermometers, absorbability.

OBSAH:

Seznam jednotek a označení	10
Seznam použitých jednotek	11
1 Úvod	12
2 Nasákavost plošných textilií	13
2.1 Pojem nasákavost	13
2.2 Normy	13
2.3 Zkouška nasákavosti	14
2.3.1 Zkušební pomůcky	14
2.3.2 Postup zkoušky	14
2.4 Záznam o zkoušce	15
2.5 Výpočet nasákavosti	15
3 Teorie kapalin	16
3.1 Struktura a základní vlastnosti kapalin	16
3.1.1 Viskozita	17
3.1.2 Povrchové napětí	18
3.1.3 Mezipovrchové napětí	19
3.2 Kapilární jevy	19
3.2.1 Příčiny kapilárních jevů	21
3.2.2 Smáčení povrchů pevných látek kapalinami	21
3.2.3 Kapilární elevace	23
3.2.4 Kapilární deprese	24
4 Historie termovize (termografie)	26
5 Základy šíření tepla	28
5.1 Nauka o sdílení tepla	29
5.2 Sdílení tepla	29
5.2.1 Sdílení tepla vedením	30
5.2.2 Sdílení tepla prouděním	32
5.2.3 Sdílení tepla zářením	33

6	Teorie termografie	35
6.1	Infračervené záření – spektrum	35
6.2	Záření reálných těles	36
6.2.1	Záření absolutně černého tělesa	38
6.3	Základní zákony záření	39
6.3.1	Kirchhoffův zákon	39
6.3.2	Planckův vyzařovací zákon	40
6.3.3	Stefan – Boltzmannův zákon	41
6.3.4	Wienův posunovací zákon	41
6.4	Emisivita	42
6.4.1	Součinitel (koeficient) emisivity	42
6.4.2	Jak zjistit hodnotu součinitele emisivity	43
6.5	Odrážející se zdánlivá teplota (teplota pozadí, okolí)	44
6.5.1	Doporučení pro měření odražené zdánlivé teploty	44
6.6	Atmosféra	44
6.6.1	Přenos atmosférou	44
6.6.2	Teplota atmosféry	45
7	Termografie	46
7.1	Pojem termografie	46
7.2	IČ termografie – zobrazení	47
7.3	Základní principy termografie	48
8	Měřící technika	49
8.1	Základní typy měřící techniky	49
8.2	Optické systémy	50
8.2.1	Optické materiály	50
8.2.2	Zorné pole a skutečné (okamžité) zorné pole	51
9	Měřící systémy	52
9.1	Bezkontaktní teploměry	53
9.2	Skenovací liniové systémy	53
9.3	Termografické zobrazovací systémy	54

10	Experimentální část	57
10.1	Návrh experimentu	57
10.2	Charakteristika použitého materiálu	58
10.3	Charakteristika použitého zařízení	58
10.3.1	ThermaCAM™ S60	58
10.3.2	Upínací ráma	60
10.4	Postup měření	60
10.5	Výsledky měření	60
11	Závěr	88
12.	Seznam použité literatury	89

Seznam jednotek a označení

Veličina	značka	jednotka
hmotnostní nasákavost	n_m	%
objemová hmotnost suchého materiálu	ρ_s	kg/m^3
tečné napětí	σ	Pa.s
povrchové napětí	γ	N.m^{-1}
síla	F	N
kmitočet, frekvence	f, ν	Hz
úhlový kmitočet, úhlová frekvence	ω	rad/s
vlnová délka	λ	m
vlnočet	σ	m^{-1}
zářivá energie	Q, W	J
zářivý tok, zářivý výkon	P, Φ	W
zářivost, intenzita záření	I	W/sr
(intenzita) vyzařování	M	W/m^2
ozářenost, intenzita ozáření	E	W/m^2
Stefanova – Boltzmanova konstanta	σ	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
emisivita	ε	1
spektrální emisivita	$\varepsilon(\lambda)$	1
směrová spektrální emisivita	$\varepsilon(\lambda, \tau, \phi)$	1
spektrální činitel pohlcení, spektrální pohltivost	$\alpha(\lambda)$	1
spektrální činitel odrazu, spektrální odrazivost	$\rho(\lambda)$	1
spektrální činitel prostupu, spektrální propustnost	$\tau(\lambda)$	1
energie	E	J
termodynamická teplota	T, Θ	K
Celsiova teplota	t, ϑ	°C
teplo, množství tepla	Q	J
tepelný tok	Φ	W
(plošná) hustota tepelného toku	q, ϕ	W/m^2
součinitel tepelné vodivosti	λ	$\text{W}/(\text{m.K})$
součinitel prostupu tepla	K	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
součinitel přestupu tepla	$h, (\alpha)$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
tepelný odpor	R	K/W

tepelná vodivost

 G

W/ K

součinitel tepelné vodivosti

 α m^2/s

Seznam použitých zkratk

KOD – katedra oděvních materiálů

TUL – technická univerzita

atd. – a tak dále

IČ – infračervené záření

°C – stupeň celsia

ČSN – ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA

tj. – to jest

resp. – respektive

obr. – obrázek

tab. – tabulka

1. Úvod

Svět moderních technologií s sebou každý den přináší řadu nových objevů, poznatků, změn a dalších zdokonalování v rozličných oblastech našeho života. S něčím novým se setkáváme téměř na každém našem kroku. V oblasti oděvnictví a textilního inženýrství byla za posledních několik let učiněna řada objevů, které našly své uplatnění v praktickém životě. A právě zde se nachází smysl vědecké práce. Objevy nemají zůstat pouze na papíře, ale mají být hmatatelným přínosem pro nás, lidskou rasu i přes to, že od nápadu k realizaci vede někdy velmi dlouhá a složitá cesta.

Doba, kdy textilie byly spojovány pouze s oděvy, je již velmi dávno pryč. Současný trend využívá textilií v nesčetném množství oborů. Vždyť, dokázali byste si dnes představit zdravotnický, potravinářský nebo stavební průmysl bez textilií?

Fascinována současnými technickými možnostmi, rozhodla jsem se podívat na hodnocení nasákavosti textilií očima termovize. Aby to vůbec bylo možné, bylo zapotřebí pochopit řadu pojmů, zákonitostí, vzájemných souvztažností a samozřejmě principů nezbytných pro samotné provedení výzkumu. Začala jsem tím, že jsem se snažila získat co nejvíce poznatků o samotné termovizi. První krůčky jsem učinila v Praze, kde jsem navštěvovala přednášky pro absolventy ČVUT, kde jsem se seznámila s panem Ing. Jiřím Svobodou z firmy TMV SS spol. s r.o., který mě zasvětil do tajů termovize jak po teoretické, tak i po praktické stránce. Dozvěděla jsem se zde o základních zákonech záření těles, infračerveném záření, záření černého tělesa, emisivitě a celkově o principech přenosu tepla. Bylo mi též umožněno, abych si prakticky vyzkoušela termovizní měření na různých textiliích. Měření však neprobíhalo v laboratorních podmínkách a proto jsem samotný „ostrý“ experiment provedla v Laboratoři komfortu na katedře oděvnictví Technické univerzity v Liberci. Ještě před provedením experimentu jsem si však pečlivě nastudovala konkrétní informace týkající se nasákavosti, vlastností kapalin, šíření tepla, termografie, měřící techniky, měřících systémů aj.

V této práci se nejprve popisně věnuji nezbytné teoretické základně, na které jsem posléze stavěla svůj experiment. Jak se vše povedlo a k jakým poznatkům jsem dospěla, o tom se zmiňuji níže. Snažně doufám, že má práce pomůže nahlížet na hodnocení nasákavosti textilií z jiného úhlu a umožní tak lépe pochopit některé zákonitosti, které platí pro nasákavost dané textilie.

2 Nasákavost plošných textilií [Absorbability of flat textiles]

2.1 Nasákavost [Absorbability]

Norma ČSN 80 0831 definuje nasákavost jako schopnost plošné textilie přijímat a fyzikálně vázat vodu při ponoření za stanovené teploty a doby. Nasákavost vyjadřujeme v procentech [1,2].

Rozeznáváme nasákavost:

a) hmotnostní n_m

$$n_m = (m_v - m_s / m_s) * 100 \quad (2.1)$$

kde: m_v – hmotnost vlhkého materiálu [kg],

m_s – hmotnost suchého materiálu [kg],

b) nasákavost objemovou n_v

$$n_v = (V_v / V_s) * 100 = n_m * (\rho_s / 1000) \quad (2.2)$$

kde: V_s – objem suché látky [m³],

V_v – objem vody [m³],

ρ_s – objemová hmotnost suchého materiálu [kg/m³].

2.2 Normy [Standards]

Obdobné zahraniční normy, které souvisí s nasákavostí plošných textilií jsou:

- německá norma DIX 53 923 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens von textilen Flächengebilden,
- japonská norma GOST 3816-61,
- norma BS 3449:1961 Method for testing the resistance of fabrics to water absorption
- norma ASTM D 583-63 Standard methods of test for water resistance of textile fabrics [1].

2.3 Zkouška nasákavosti [Absorbability test]

Klimatizované vzorky se po zvážení ponoří za definovaných podmínek do destilované vody předepsané teploty. Po uplynutí stanovené doby se vzorky vyjmou, nechá se z nich okapat přebytečná voda a znovu se zváží. Z rozdílu obou hmotností se vypočítá nasákavost [1].

2.3.1 Zkušební pomůcky [Testing accessories]

Ke zkoušce nasákavosti textilie se používá:

- nádoba s průhlednými stěnami,
- stojánek s ojhlenými rameny z nekorodujícího materiálu (metoda 1),
- těžítko z nekorodujícího materiálu o hmotnosti asi 30 g (metoda 2),
- svorka z nekorodujícího materiálu (metoda 2),
- stopky,
- analytické váhy,
- váženky,
- destilovaná voda.

2.3.2 Postup zkoušky [Test procedure]

Pro zkoušku nasákavosti existují podle normy ČSN 80 0831 dvě metody a použití jedné nebo druhé metody stanoví předmětové normy.

Metoda 1

Klimatizované vzorky se jednotlivě váží s přesností 0,1 % hmotnosti.

Vzorky upevněné bez napětí na ojhlená ramena stojánku se vkládají do nádoby s destilovanou vodou o teplotě 20 ± 1 °C tak, aby vrchní okraj vzorku byl pod hladinou vody 50 mm. Po uplynutí 60 ± 1 min se rámeček se vzorky z vody vyjme a ponechá ve vertikální poloze po dobu 120 ± 3 s, aby okapala přebytečná voda.

Po okapání se vzorky opatrně sejmou pinzetou z jehel, jednotlivě vkládají do váženky a zváží s přesností 0,1 % hmotnosti klimatizovaného vzorku.

V odůvodněných případech, kdy se předpokládá rychlé nasáknutí vzorku, je předmětovou normou stanovena doba smáčení 60 ± 3 s [1].

Metoda 2

Klimatizovaný vzorek se zváží s přesností 0,1 % hmotnosti. Na okraj rovnoběžný s útky se upevní svorka. Vzorek se svorkou se položí horizontálně na dno nádoby s destilovanou vodou o teplotě 20 ± 1 °C a zatíží těžítkem. Výška vodní hladiny musí být 50 mm. Po uplynutí 60 ± 3 s se vzorek uchopením za svorku opatrně z vody vyjme a ponechá ve vertikální poloze po dobu 300 ± 3 s [1].

2.4 Záznam o zkoušce [Test record]

V zápisu o zkoušce se musí uvést:

- označení vzorku,
- použitá metoda,
- doba smáčení,
- výsledky jednotlivých měření,
- průměrná nasákavost,
- variační koeficient,
- relativní přesnost průměru,
- místo, datum a podpisy pracovníků odpovědných za provedení zkoušky.

2.5 Výpočet nasákavosti [Calculation of absorbability]

Nasákavost vzorku se vypočítá podle vzorce:

$$N = (m_1 - m_0 / m_0) * 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

m_0 – hmotnost klimatizovaného vzorku v g

m_1 – hmotnost mokrého vzorku po okapání v g

Z jednotlivých výsledků se vypočítá aritmetický průměr, variační koeficient a relativní přesnost průměru při 95 % statistické jistotě podle ČSN 80 0301 [1].

3 Teorie kapalin [Fluid theory]

S ohledem na skutečnost, že nasákavost textilií velmi úzce souvisí také s vlastnostmi kapalin, rozhodla jsem se v této práci též pojednat o jejich základních vlastnostech.

3.1 Struktura a vlastnosti kapalin [Structure and basic propensities of fluids]

Kapalina se skládá z molekul, které jsou v neustálém neuspořádaném pohybu, vzájemně si vyměňují místo a působí na sebe přitažlivými nebo odpuzivými silami.

Kapalina má poměrně složitou strukturu. Skládá se z velmi malých skupin (oblastí) molekul nebo podobných stavebních částic. V každé skupině jsou molekuly spolu vázány a pravidelně uspořádány. Jednotlivé skupiny jsou však rozloženy zcela nepravidelně (neuspořádaně) a vzájemně jsou odděleny oblastmi, mezi nimiž se molekuly pohybují chaoticky. Toto uspořádání se označuje jako krátkodosahové uspořádání na rozdíl od dalekodosahového uspořádání u krystalů pevných látek. Vnější projevem této struktury je tekutost kapalin[2,3].

Kapalina má krátkodosahové uspořádání jako amorfni pevná látka. Kolem částice kapaliny je oblast mikroskopického uspořádání, která mění svou polohu. Mluvíme o uspořádání místním, lokálním. Kapalina má tzv. *kvazikrystalickou strukturu*.

Síly mezi částicemi kapaliny, tzv. kohezní síly, jsou v kapalině dosti velké na to, aby ji udržely v kondenzovaném stavu s kvazikrystalickou strukturou. Tyto síly však nejsou dostatečně velké k tomu, aby vytvořily pevnou a s časem neproměnnou strukturu, jak ji známe u pevných látek. Kohezní síly mezi částicemi kapaliny brání částicím kapaliny v získání plné volnosti, jak ji známe u molekul plynů, ale nejsou dostatečně velké, aby mohly zabránit posuvnému pohybu molekul nebo jiných částic, z nichž je kapalina tvořena [3].

Tyto síly jsou větší než u plynného tělesa a naopak menší než u pevného tělesa. Proto má kapalina některé vlastnosti pevné látky (zachování objemu) a některé vlastnosti jsou naopak shodné s vlastnostmi plynů (tekutost)[3,4].

Kapalina má schopnost zachovávat objem působením vnitřních soudržných (kohezních) sil. Tvar nabývá podle nádoby, do které je nalita. Patří do obecnější kategorie tekutin, mezi které zahrnujeme i plyny a sypké látky.

Kapalinu podle svých vlastností je možné zařadit jako fázi, ležící mezi pevnými a plynnými fázemi.

Mimo to se kapalně látky vyznačují *viskozitou, povrchovým napětím, mezipovrchovým napětím, kapilární elevací a kapilární depresí* [3].

3.1.1 Viskozita [Viscosity]

Viskozita (také vazkost) je významným technickým parametrem kapalin, je to fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny.

Viskozita vzniká z vnitřního tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu [3,4,5].

Viskozita z výše uvedené definice se též označuje jako dynamická viskozita, která charakterizuje vnitřní tření kapalin, kromě ní se zavádí také tzv. kinematická viskozita v ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), což je poměr mezi viskozitou μ a hustotou ρ kapaliny:

Při vytékání kapaliny z nádoby klouže horní vrstva molekul po vrstvě spodní a přitom překonává přitažlivé síly. Čím jsou přitažlivé síly větší, tím je vytékání pomalejší a kapalina je viskóznější. Zahříváním kapaliny se její viskozita obvykle snižuje [5]

Viskozita jako míra odporu kapaliny vůči toku se definuje rovnicí:

$$\sigma = \eta * (dv / dx) \quad [\text{Pa.s}] \quad (3.1)$$

kde σ je tečné napětí působící na jednotkovou plochu při vzájemném posunu dvou paralelních vrstev kapaliny /Pa/

dv - rozdíl rychlostí vrstev /m.s-1/

dx - vzdálenost vrstev /m/. NT ŠKOLA

Přehled viskozit pro různé kapaliny: (při 20°C)

- voda 0,001 Nsm⁻²,
- benzín 0,00053 Nsm⁻²,
- etanol (líh) 0,0012 Nsm⁻²,
- glycerín 1,48 Nsm⁻²,
- olej 0,00149 Nsm⁻².

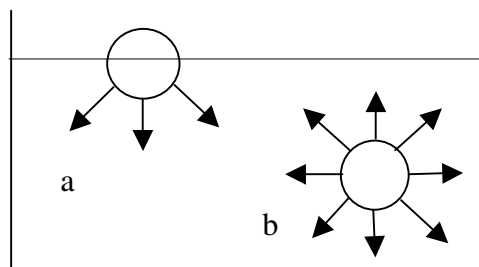
3.1.2 Povrchové napětí [Surface tension]

Charakteristickou vlastností kapalin je povrchové napětí. Povrchové napětí γ je definováno jako síla F , která brání zvětšování povrchu kapaliny a působí kolmo na jednotku délky povrchu l podle vztahu:

$$\gamma = F / l \quad [\text{Nm}^{-1}] \quad (3.2)$$

Povrchové napětí vzniká tím, že molekuly na povrchu kapaliny jsou z jedné strany obklopeny molekulami plynu nebo částicemi pevných látek a z druhé strany molekulami kapalin. Mezimolekulové síly na obou stranách rozhraní kapaliny a jiné látky jsou obvykle různě velké. Proto síly působící na molekulu v povrchové vrstvě kapaliny nebudou shodné se silami, které působí na molekulu uvnitř kapaliny[3,4] Povrchové napětí kapaliny je důsledkem přitažlivých sil mezi molekulami. Jak vyplývá z níže uvedeného obrázku, je vektorový součet mezimolekulových sil působících na molekulu **a** nulový, zatímco výslednice těchto sil působících na molekulu **b** u povrchu částice vtahuje molekulu do vnitřku částice. Výsledkem toho je snaha kapalin zaujmout tvar s minimálním povrchem, tj. tvar koule [4,6].

Ke zvětšování povrchu kapaliny je tedy nutno působit silou a zvětšování povrchu je spjato se zvyšováním energie částice, tzv. povrchové energie



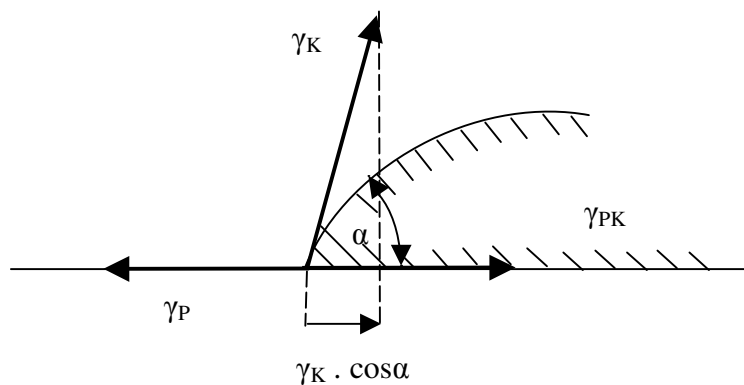
Obr.1 Schéma k pojmu povrchové napětí: **a** – molekula uvnitř, **b** – molekula u povrchu

Povrchové napětí je efekt, při kterém se povrch tekutin chová jako elastická fólie a snaží se dosáhnout co možná nejhladšího stavu s minimálním rozpětím. To znamená, že se povrch tekutiny snaží dosáhnout stavu s nejmenší energií. Čím větší je povrchové napětí, tím „kulatější“ je kapička této kapaliny.

Zvětšíme-li plochu nějaké kapaliny, musíme vykonat práci právě kvůli povrchovému napětí [6].

3.1.3 Mezipovrchové napětí [Intersurface tension]

K silovému působení mezi molekulami dochází i při styku dvou fází. Pak mluvíme o mezipovrchovém napětí, které vzniká mezi kapalinou a tuhou fází nebo mezi dvěma kapalinami. Při styku kapaliny s tuhou látkou (např. stěna nádoby nebo podložka) je tvar kapky, resp. velikost styčné plochy výslednicí působení třech sil, jak je to znázorněno na obr.2,



Obr.2 Poměr při styku kapaliny s tuhou látkou

kde γ_P je síla, která chce zmenšit nepokrytý povrch tuhé látky, γ_K je síla, která chce zmenšit povrch kapaliny, γ_{PK} je síla, která chce zmenšit povrch mezi kapalinou a tuhou látkou [3].

3.2 Kapilární jevy [Capillary phenomena]

Pro správné pochopení šíření kapaliny v textilií na tomto místě pojednávám o kapilárních jevech, jejich příčinách a některých důležitých pojmech z této oblasti.

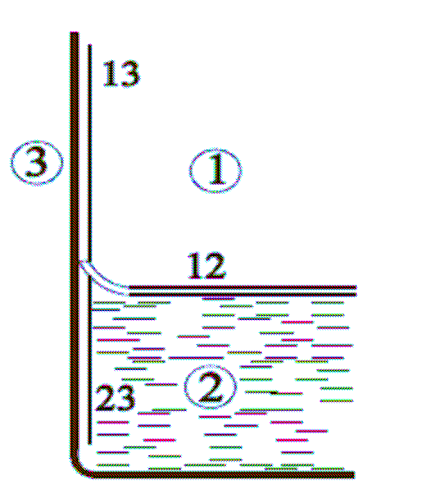
Kapilární jevy jsou jevy způsobené vzájemnými mezimolekulovými silami mezi molekulami dané kapaliny a silami mezi molekulami této kapaliny a pevného tělesa, plynu nebo jiné kapaliny [6,7].

Na obrázku č. 3 se u stěny nádoby stýkají rozhraní tří látek. Volný povrch kapaliny se zakřivuje při pevné stěně. V každém bodě kraje kapaliny se stýkají tři prostředí, 1 – vzduch, 2 – kapalina, 3 - pevná látka. Jedná tedy o tři rozhraní a tři povrchové vrstvy:

- povrchová vrstva 1,2 mezi vzduchem a kapalinou,
- povrchová vrstva 1,3 mezi vzduchem a pevnou látkou a
- povrchová vrstva 2,3 mezi kapalinou a pevnou látkou.

Kapilární jevy se projevují

- zakřivením hladiny kapaliny u stěn nádob,
- změnou polohy hladiny v kapilárách a
- tvořením kapek kapaliny na hladině jiné kapaliny [6,7].



Obr.3 Povrchové vrstvy na rozhraní tří prostředí – vzduchu, kapaliny a pevné látky

3.2.1 Příčiny kapilárních jevů [Capillary phenomena causes]

U stěn nádoby se jedná o rozhraní mezi kapalinou, pevnou látkou a plynem. Na molekuly v povrchové vrstvě kapaliny u stěny nádoby působí kromě kohezních sil (sil soudržnosti) vlastní kapaliny také adhezní síly (síly přilnavosti) vzhledem k pevné látce [6]. Budeme uvažovat krajní případy, potom výslednice těchto sil

- může směřovat do stěn nádoby (síly adhezní jsou větší než kohezní), nebo
- může směřovat do kapaliny (síly kohezní jsou větší než adhezní).

V obou případech se povrch kapaliny u stěn zakřivuje tak, aby tečna k němu byla kolmá na výslednici všech působících sil na molekulu v povrchu kapaliny (viz krajní úhel). Při zakřivení povrchu kapaliny vzniká dodatečný kapilární tlak.

U stěn nádob se toto projeví pouze zakřivením povrchu kapaliny a

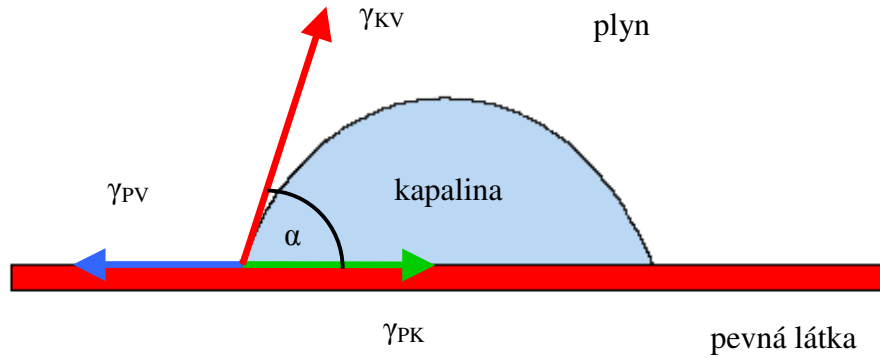
- smáčivostí kapaliny nebo
- nesmáčivostí kapaliny,

v kapilárách se toto projeví

- kapilární elevací kapaliny nebo
- kapilární depresí kapaliny [6,7].

3.2.2 Smáčení povrchů pevných látek kapalinami [Soaking of solid surface textiles/fabric/matter]

Dosud bylo popsáno v podstatě povrchové napětí založené na představě kapalně fáze obklopené druhou fází, kterou může být plyn, jiná nemísitelná kapalina nebo tuhá látka. Prakticky se však setkáváme se soustavami třech různých fází, pevné, kapalně a plynné (např. vnitřní povrch kapiláry, kapalina, vzduch) – viz obr. č.4. Jestliže je v této soustavě povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází větší než mezi pevnou a kapalnou fází, bude snaha soustavy zvětšovat povrch pokrytý kapalinou na úkor povrchu pevná látka – vzduch. Kapka bude mít snahu smáčet větší povrch, úhel α se bude zmenšovat [4].



Obr. 4 Tvar kapky na pevném povrchu

Nalijeme-li kapalinu na povrch pevné látky, vytvoří se z kapaliny na povrchu nejrůznější útvary. Nejběžnější z nich je část povrchu válce znázorněný v řezu na obr.2. V něm šipkami jsou vyznačeny jednotlivá povrchová napětí mezi pevnou látkou a vzduchem γ_{PV} , mezi pevnou látkou a kapalinou γ_{PK} , mezi kapalinou a vzduchem γ_{KV} , symbol α označuje úhel dotyku mezi pevnou látkou a kapalinou (úhel smáčení) [4].

Z podmínek rovnováhy pro všechny tři povrchová napětí vyplývá Youngova rovnice:

$$\gamma_{PV} = \gamma_{PK} + \gamma_{KV} \cdot \cos\alpha \quad \rightarrow \quad \cos\alpha = (\gamma_{PV} - \gamma_{PK}) / \gamma_{KV} \quad (3.3)$$

kde: γ_{PV} – povrchové napětí mezi pevnou látkou a vzduchem

γ_{PK} – povrchové napětí mezi pevnou látkou a kapalinou

γ_{KV} – povrchové napětí mezi kapalinou a vzduchem

$\cos\alpha$ – dotkový úhel (úhel smáčení)

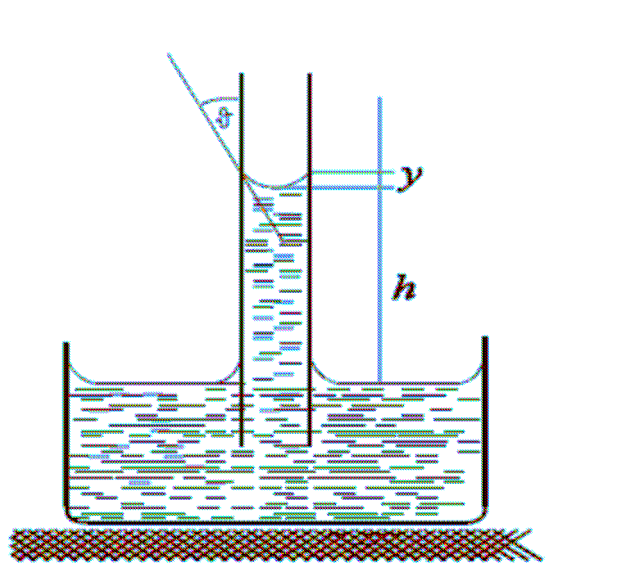
Tab.1 Velikosti kontaktního úhlu

$\alpha = 0^\circ$	dokonalé smáčení	tuhý povrch je lyofilní
$0 < \alpha < 90^\circ$	kapalina tuhou látku dobře smáčí	
$90^\circ < \alpha < 180^\circ$	kapalina tuhou látku špatně smáčí (nesmáčí)	tuhý povrch je lyofobní

3.2.3 Kapilární elevace [Capillary elevation]

Kapilární elevace neboli vzlínavost je jev, způsobený rozdílným silovým působením mezi molekulami kapaliny navzájem a molekulami materiálu nádoby, ve které je kapalina uzavřena. Při kapilární elevaci (vzlínavosti) jsou přitažlivé síly mezi molekulami kapaliny menší než přitažlivé síly mezi molekulami kapaliny a nádoby. Proto je, na rozdíl od kapilární deprese, okraj kapaliny v blízkosti stěny nádoby ohnut směrem nahoru [6].

Ponoříme-li otevřenou skleněnou trubičku o malém poloměru R svisle do vody ve sklenici, zakříví se povrch vody v trubičce při její stěně. Je-li trubička dostatečně úzká – kapilára, prohne se povrch vody v celém jejím průřezu. Vznikne takto meniskus, který je možno pokládat za část kulové plochy o poloměru r . Také vnější povrch kapaliny obklopující ponořenou trubičku se u její stěny zakříví. A nejen to, hladina vody v tenké trubičce bude výše, než je hladina ve sklenici, viz obr. 5 Kapilární elevace [6,7].



Obr. 5 Kapilární elevace

Hladina dokonale smáčivé kapaliny (viz smáčivost) v kapiláře o poloměru R je výše než kapalina v široké nádobě s ní spojené o výšku kapilárního vzestupu (elevační výšku) h , pro kterou platí následující vztah

$$2, hg\sigma\rho=R \quad (3.4)$$

kde σ je povrchové napětí kapaliny, ρ hustota kapaliny a g tíhové zrychlení. Vztah platí za předpokladu, že hustota kapaliny je mnohem větší než hustota vzduchu nad kapalinou.

Změny výšky hladiny v kapiláře jsou spojeny s existencí kapilárního tlaku. Všechny tlaky musejí být v rovnováze. Zvýšení hladiny kapaliny v kapiláře způsobuje dodatečný kapilární tlak. Kapilární tlak je v tomto případě záporný, zmenšuje molekulový tlak. Proto hladina v kapiláře vystoupí vzhůru a má tvar dutého vrchlíku.

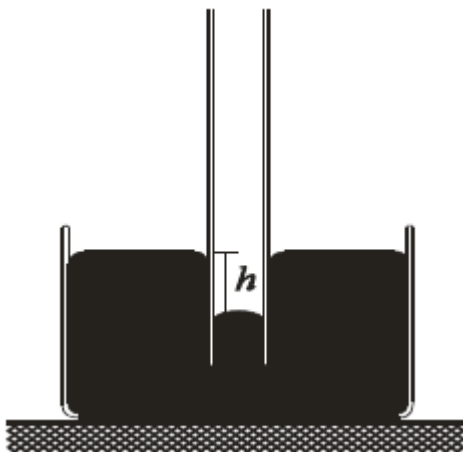
O tom, jak se daná kapalina bude chovat v úzké trubici, rozhoduje jak kapalina, tak také látka, z níž je trubice zhotovena. V případě kapilární elevace jsou větší adhezní síly mezi molekulami kapaliny a pevné látky stěny než kohezní síly mezi molekulami kapaliny. Například kapilární elevaci můžeme pozorovat u vody ve skleněných kapilárách [6,7].

3.2.4 Kapilární deprese [Capillary depression]

Kapilární deprese je jev, způsobený rozdílným silovým působením mezi molekulami kapaliny navzájem a molekulami materiálu nádoby, ve které je kapalina uzavřena. Při kapilární depresi jsou přitažlivé síly mezi molekulami kapaliny větší než přitažlivé síly mezi molekulami kapaliny a molekulami nádoby. Okraj kapaliny je v blízkosti stěny nádoby, na rozdíl od kapilární elevace, ohnut směrem dolů.

Kapilární deprese se projevuje poklesem hladiny kapaliny v kapiláře pod okolní hladinu u kapalin, které nesmáčejí stěny kapiláry (například rtuť - odmaštěné sklo). Snížení hladiny kapaliny v kapiláře způsobuje dodatečný kapilární tlak. Kapilární tlak je v tomto případě kladný. Zvětšuje proto molekulový tlak [6,7].

Povrch kapaliny je vypuklý ven z kapaliny, viz obrázek 6 Kapilární deprese.



Obr. 6 Kapilární deprese

4 Historie termovize (termografie) [History of thermal vision]

Velmi vhodným prostředkem pro zdokumentování vlivu působení kapaliny na textilií je použití termovize. Níže uvádím několik faktů z historického vývoje termovize, dále pak o termografii samotné a měřících zařízeních

První, kdo objevil infračervené (tepelné) záření byl Sir Frederick William Herschel (1738 – 1822) a to v roce 1800. Tento vědec, který se stal dvorním astronomem anglického krále Jiřího II I, (mj. objevil planetu Uran), hledal při pozorování Slunce vhodný materiál, který by použil jako optický filtr pro snížení jasu i tepla v okuláru teleskopu. Začal experimentovat s hranolem a po rozložení světla na jednotlivé „barvy“ – části elektromagnetického spektra měřil pomocí teploměru se začerněnou baňkou teplotu jednotlivých barev. Zjistil postupný nárůst teploty spektra od fialové po červenou a objevil, že při umístění teploměru za viditelné červené spektrum je bod maxima teploty a je poměrně daleko od červené barvy – v místě, které je dnes nazýváno infračervené (vlnové) pásmo. Je zajímavé, že termín „infrared – infračervený“ se začal používat o 75 let později. Herschel se domníval, že jako optické prvky pro infračervené záření bude možné používat pouze odrážející prvky jako rovná a zakřivená zrcadla (vzhledem k omezené propustnosti skla vůči nově objevenému tepelnému záření).



Obr.7 Sir Frederick William Herschel

V roce 1830 italský badatel Melloni objevil, že kamenná sůl (NaCl), je vhodným materiálem, vzhledem k dostatečně velkým přírodním krystalům, pro výrobu čoček a hranolů – používala se dalších 100 let, než byla v roce 1930 zvládnuta metoda syntetických krystalů.

Teploměry, které byly upraveny tak, že měly začerněnou baňku se jako detektory záření používaly až do r.1829, kdy Nobili vynalezl termočlánek. Dalším vědec již citovaný Melloni připojil určitý počet termočlánků do série a vytvořil tak první termobaterii. Toto nové zařízení pro detekci tepelného záření bylo asi 40x citlivější než tehdejší nejlepší teploměr – uvádí se, že bylo schopné detekovat teplo osoby stojící ve vzdálenosti 3 metrů.

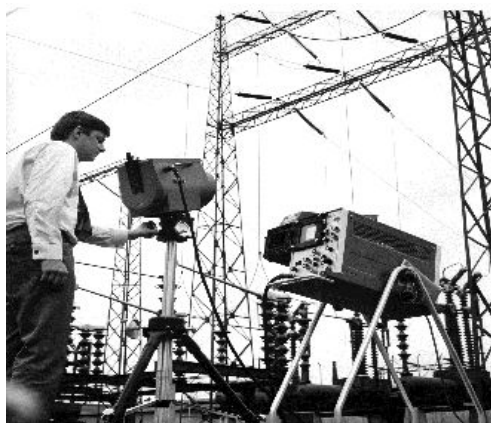
K dalšímu pokroku v tomto oboru došlo, když anglický badatel Langley vynalezl (v r. 1880) bolometr. Tento bolometr se sestával z tenkého začerněného proužku platiny připojeného k jedné větvi Wheatstonova můstku, na který bylo zaměřeno IČ záření, na něž reagoval citlivý galvanometr. O tomto zařízení se říká, že bylo schopné detekovat teplo krávy na vzdálenost 400 metrů

V roce 1940 bylo možné vytvořit tzv. „tepelný obraz“ a to na základě rozdílného odpařování tenké vrstvy oleje vystavené tepelnému záření - interferenci olejových vrstev. Sir John Herschel také vytvořil jednoduchý záznam tepelného obrazu na papír, který pak nazval „termograf“.

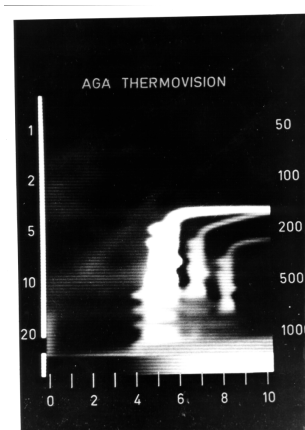
Sir James Dewar začal jako první používat při výzkumu v oblasti nízkých teplot jako chladivo zkapalněné plyny (např. tekutý dusík N₂ s teplotou – 196 °C) a v roce 1892 vynalezl vzduchotěsnou nádobu, ve které bylo možné skladovat zkapalněné plyny.

K rozvoji IČ techniky došlo v letech 1.světové války.V meziválečném období byly vyvinuty dva nové a revoluční IČ detektory: konvertor obrazu a fotonový detektor. K dalšímu velkému rozvoji IČ techniky došlo jak za 2.světové války, tak samozřejmě po ní a lze uvést, že výzkum a vývoj v této oblasti není (tak ostatně jako i v jiných oblastech či oborech) ukončen a jistě bude dále pokračovat [8].

I když, jak bylo v úvodu uvedeno, existence infračerveného záření byla známa již v roce 1800, první termografický systém na světě byl vyroben až v roce 1964. Byl vyroben švédskou firmou AGA (divizí Infrared Systems) a jeho použití bylo určeno, vzhledem k jeho hmotnosti a robustnosti, především pro vojenské účely. Firma AGA vyrobila také první termografický systém určený pro civilní použití, který byl v roce 1965 nabízen a prodáván pod názvem Thermovision® 651 [8].



Obr. 8 Thermovision® 651



Obr. 9 Termální obraz - Termogram THV 651

5 Základy šíření tepla [The fundamentals of thermal transmittance]

5.1 Nauka o sdílení tepla [Heat interchange science]

Nauka o sdílení tepla se zabývá problematikou průchodu tepla mezi soustavou a okolím (1). Šíření tepla je jedním ze způsobů přenosu energie. Teplo vždy předává těleso s vyšší teplotou tělesu s nižší teplotou [8,9].

Sdílené teplo Q (J) – z hlediska termodynamiky je částí energetické interakce (vzájemné působení dvou nebo více činitelů) mezi soustavou a jejím okolím, která je podmíněna rozdílem teplot mezi teplotou soustavy T_s (K) a teplotou okolí T_o (K).

Tepelný tok – tepelný výkon Φ – vyjadřuje rychlost průchodu tepla danou plochou nebo také výkon přenášený při průchodu tepla danou plochou:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{J}\cdot\text{s}^{-1} = \text{W}) \quad (5.1)$$

kde dQ je teplo, které projde zvolenou plochou za čas dt .

Hustota tepelného toku – v daném místě je vektor, jehož velikost \vec{q} se rovná podílu tepelného toku $d\Phi$ procházejícího v daném okamžiku zvolenou plochou kolmou ke směru průchodu tepla a plošného obsahu dS_n této plochy:

$$\vec{q} = \frac{d\Phi}{dS_n} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (5.2)$$

směr vektoru q je určen směrem sdílení tepla je proto kolmý k ploše dS_n .

5.2 Sdílení tepla – rozdělení [Heat interchange - segmentation]

Sdílení tepla, též přenos vnitřní energie (přenos tepla), je samovolný nevratný proces šíření tepla v prostoru s nehomogenním teplotním polem. Pokud se tedy zvětší vnitřní energie tělesa při tepelné výměně, znamená to, že těleso přijalo určité množství tepla, tudíž teplota tělesa vzrostla [8,9,10].

Sdílení tepla se uskutečňuje:

- vedením neboli kondukcí,
- prouděním neboli konvekcí,
- zářením neboli radiací.

5.2.1 Sdílení tepla vedením [Heat interchange via conduct]

Sdílení tepla vedením, též sdílení tepla kondukcí, je způsob sdílení tepla z teplejších míst pevné látky nebo klidné tekutiny k chladnějším místům předáváním energie z částice (molekuly, iontu, atomu apod.) na jinou částici, aniž jsou v pohybu makroskopické části látky (1). Dochází k tomu, že částice chladnějšího tělesa získají část pohybové energie po kontaktu s teplejším tělesem, jehož částice se pohybují rychleji. Rychlejší (teplejší) částice předávají při srážce část pohybové energie pomalejším (chladnějším) částicím, které se začnou pohybovat rychleji a znovu předávají při srážce část energie svým sousedním částicím. Tento proces probíhá tak dlouho, dokud se teploty obou těles vzájemně nevyrovnají [8,9,10,11].

Pro sdílení tepla vedením v homogenním prostředí platí **Fourierův zákon**, podle něhož hustota tepelného toku q je úměrná teplotnímu gradientu

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (5.3)$$

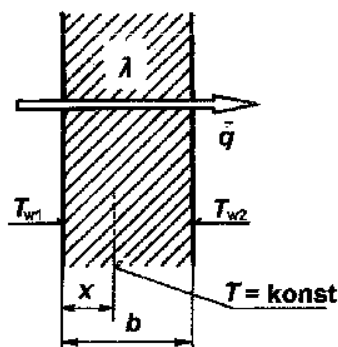
kde λ je součinitel tepelné vodivosti – je to fyzikální veličina, která charakterizuje schopnost dané látky sdílet teplo vedením, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Záporné znaménko ve vztahu vyjadřuje, že tepelný tok má opačný směr než růst teploty (teplotní gradient).

Při jednorozměrném sdílení tepla vedením ve směru osy x je

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (5.4)$$

kde podíl dT/dx je teplotní gradient ve směru osy x , značka $\text{grad} T$. Konstanta úměrnosti λ je součinitel tepelné vodivosti [8].



Obr.10 Sdílení tepla vedením

Vodič tepla, též **tepelný vodič**, je látka s nezanedbatelným součinitelem tepelné vodivosti λ .

- Látky s velkým součinitelem tepelné vodivosti jsou dobrými vodiči tepla. Patří mezi ně kovy, zvláště čisté kovy, např. stříbro, měď, neboť u nich vedení tepla uskutečňují hlavně volné elektrony.
- Ostatní pevné látky, kromě tuhy, mají podstatně menší součinitel tepelné vodivosti než kovy.
- Nejmenší součinitel tepelné vodivosti mají plyny. Proto také pevné látky, v nichž je velký počet malých mezer nebo dutin (pórů) obsahujících vzduch, vedou teplo velmi špatně. Používají se jako dobré **tepelné izolanty**, například skelná nebo čedičová vlna, korek apod. Tepelná vodivost takových látek však značně závisí na jejich vlhkosti. Rozlišuje se u nich proto součinitel tepelné vodivosti suché látky λ_s a součinitel tepelné vodivosti vlhké látky λ_v .
- Součinitel tepelné vodivosti závisí sice obecně na teplotě, ale obvykle se mění jen málo v malých teplotních intervalech, takže při většině praktických výpočtů se pokládá v malých teplotních intervalech za konstantní [8].

Tepelná vodivost G – je fyzikální veličina, představuje rychlost, s jakou se šíří teplo z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí.

Definuje se jako výkon (teplo za jednotku času), který projde jednorozměrným vodičem o délce jednoho metru, jehož jeden konec má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhý konec, a má jednotku $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Může se též definovat jako výkon, který projde plochou jednoho čtverečního metru při rozdílu teplot 1 Kelvin a má pak jednotku $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Tepelná vodivost také ovlivňuje subjektivní vnímání teploty těles při doteku. Např. dotýkáme-li se dvou chladných předmětů se stejnou teplotou, z nichž jeden je kovový a druhý dřevěný, zdá se nám dřevěný předmět teplejší, protože jeho povrch se zahřívá tělesným teplem snadněji, zatímco kovový předmět teplo snadněji odvádí daleko od povrchu [8,12].

Tepelný odpor – je poměr teplotního rozdílu dvou míst a množství tepla mezi nimi převedeného za jednotku času. Obecně je to odpor, který klade objekt (těleso, pevná překážka mezi dvěma tekutinami, rozhraní dvou látek apod.) sdílení tepla [8,12].

5.2.2 Sdílení tepla prouděním [Heat interchange via streaming]

Sdílení tepla prouděním, též sdílení tepla konvekcí, je sdílení tepla tekutinou při jejím proudění.

Vzniká například:

- rozdílem hustoty v tekutině, například při jejím zahřívání zdola, tzv. volné nebo přirozené proudění,
- vlivem vnějších účinků nezávislých na sdílení tepla (čerpadlem, ventilátorem apod.), tzv. nucené proudění [9,10,11].

Teplu se tedy přenáší prouděním hlavně v kapalinách nebo plynech a vyznačuje se tím, že se pohybují celé oblasti prostředí o stejné teplotě a ne pouze jednotlivé částice. Po zahřátí kapaliny nebo plynu se začíná kapalina nebo plyn rozpínat, tím klesá jeho hustota a zahřátá část kapaliny nebo plynu se mění jako celek své místo – stoupá nahoru. Naopak chladnější části klesají dolů na předešlé místo teplejší části. Takto vzniká v prostředí proudění [9,10,12].

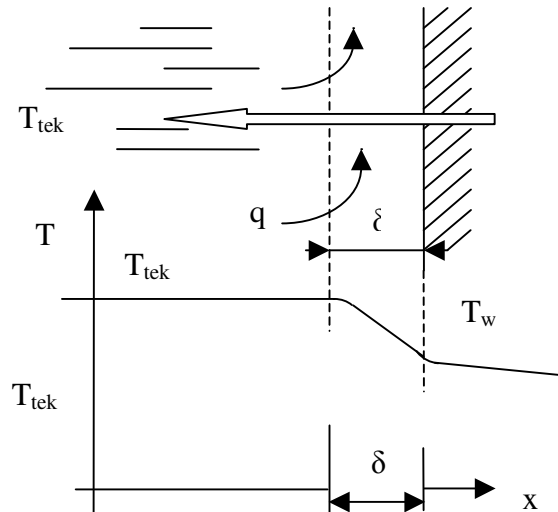
Sdílení tepla prouděním se uplatňuje při přechodu tepla z tekutiny do pevného tělesa nebo obráceně. Přitom vznikne vždy podél pevné stěny ve směru proudu tekutiny tenká vrstva zvaná tepelná **mezní vrstva**, ve které se teplota proudu mění od teploty stěny T_w do hodnoty velmi blízké teplotě neovlivněného proudu T_{tek} .

Přestup tepla na rozhraní mezi pevnou stěnou (povrchem topného či chladícího tělesa) a tekutinou je znázorněno na obr. 11. Povrchová teplota stěny je zde označena T_w , teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny je T_{tek} ($T_w < T_{tek}$). Přiblížíme-li se čidlem teploty ke stěně, zjistíme, že ve větší vzdálenosti od stěny se T_{tek} příliš nezmění. Teplota začne klesat na hodnotu T_w až v relativní blízkosti stěny. Tímto můžeme identifikovat vrstvu s velkým teplotním gradientem, kterou nazýváme **teplotní mezní vrstva**. V praxi se předpokládá, že tloušťka δ [m] této vrstvy je taková vzdálenost od povrchu, kde platí $T = 0,99 T_{tek}$ [8].

Plošná hustota tepelného toku - Newtonův ochlazovací zákon se při přestupu tepla vyjadřuje vzorcem

$$q = |\dot{q}| = \alpha |(T_w - T_{\text{tek}})| \quad (5.5)$$

kde koeficient α ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) je součinitel přestupu tepla [8].



Obr.11 Grafické znázornění součinitele přestupu tepla α

5.2.3 Sdílení tepla zářením (sáláním) [Heat interchange via radiation]

Sdílení tepla zářením, též sdílení tepla sáláním, je způsob sdílení tepla uskutečňovaný elektromagnetickým zářením.

Sálání je v podstatě elektromagnetické vlnění o určitém rozsahu vlnových délek. Mezi dvěma tělesy existuje neustálá výměna zářivé energie. Je to složitý proces, který se skládá z vyzařování, pohlcování i propouštění energie. Výsledkem tohoto procesu je přenos energie z tělesa vyšší teploty na těleso teploty nižší. Tento přenos se uskutečňuje i tehdy, když prostředí mezi oběma tělesy má teplotu vyšší, než kterékoliv z nich.

Od ostatních způsobů se pak liší zejména tím, že přechod tepla se při něm může uskutečnit i v prázdném prostoru (prostor mezi oběma tělesy není vyplněn žádnou látkou [8,9,10,11,12]).

Elektromagnetické záření se šíří prostorem určitou rychlostí. Ve vzduchoprázdnu má rychlost pro všechny druhy záření hodnotu

$$c = 3 \cdot 10^5 \text{ [km/s]} \quad (5.6)$$

kde tato rychlost se zpravidla označuje jako rychlost světla.

Záření při všech vlnových délkách můžeme označit jako základní vlastnost hmotných těles. Každé těleso nepřetržitě vyzařuje zářivou energii. Tato energie se při dopadu na jiné těleso z části odrazí, z části tělesem prochází a z části se jím pohlcuje. Energie, která byla tělesem odražena nebo jím prošla, dopadá na okolní tělesa a jimi je dále též pohlcena. Tímto způsobem se celá energie vyzářená určitým tělesem sdělí okolním tělesům. Každé těleso tedy nejen nepřetržitě vyzařuje, ale také pohlcuje, odrazí a propouští zářivou energii [8].

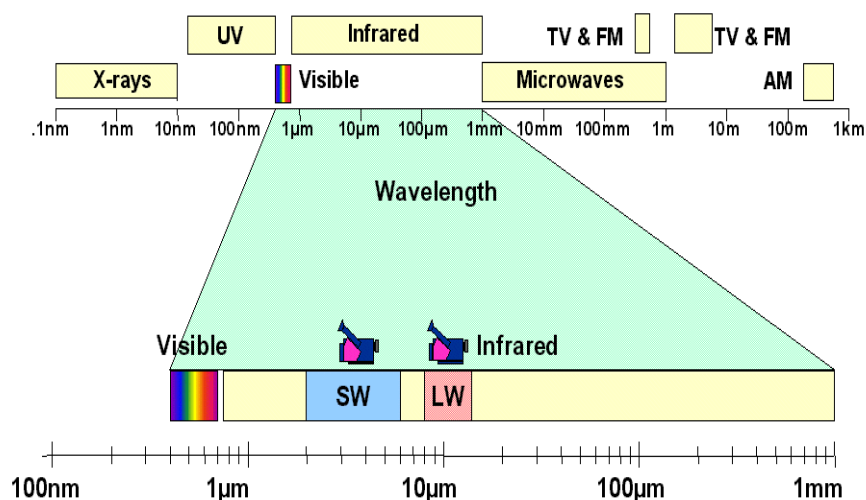
Všechny formy hmoty vyzařují při teplotách vyšších, než je absolutní nula. Tepelné záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra. Intenzita tohoto záření odpovídá teplotě hmoty. Příčinou tohoto záření je vnitřní mechanický pohyb molekul, jehož intenzita závisí právě na teplotě objektu. Protože pohyb molekul představuje přemísťování náboje, je vyzařováno elektromagnetické záření (fotonové částice).

Největším zdrojem tepelného infračerveného záření v našem okolí je Slunce. Neviditelné tepelné záření vzniklé na Slunci se šíří kosmickým prostorem všemi směry a jeho část dopadá i na zemský povrch. Zde je některými tělesy více či méně pohlceno a zvyšuje tak vnitřní energii jejich částic, od jiných těles se odrazí. Nejlépe pohlcují infračervené paprsky matné a tmavé předměty, nejhůře potom lesklé a světlé předměty [8,10,12].

6 Teorie termografie [Thermography]

6.1 Infračervené záření – spektrum [Infrared radiation-spectrum]

Infračervené (dále jen IČ) záření je neviditelná část elektromagnetického spektra projevující se tepelnými účinky, jedná se o záření s vlnovou délkou v intervalu přibližně 0,78 μm až 1 mm – tedy nad viditelnou částí. Viditelné záření, odpovídající spektrální citlivosti lidského oka, leží v rozsahu vlnových délek cca 0,38 až 0,78 μm [8].



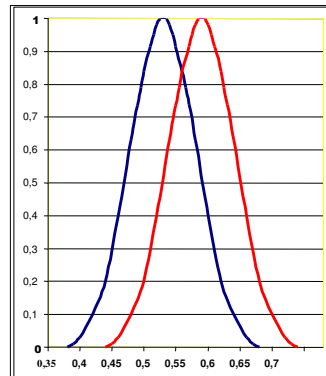
Obr.12 Elektromagnetické spektrum

Infračervená oblast elektromagnetického spektra se dělí na různé části. Přesné rozdělení není jasně specifikováno, v dalším textu použijeme rozdělení, které je v písemných materiálech použito nejčastěji:

Blízká oblast	0,75 μm - 2 μm NWIR (Near Wave IR)
Krátkovlnná oblast	2 μm - 3 μm MWIR (Short Wave IR)
Střední oblast	3 μm - 5 μm MWIR (Middle Wave IR)
Vzdálená oblast	5 μm - 15 μm LWIR (Long Wave IR)
Velmi vzdálená oblast	15 μm - 1 mm VLWIR (Very Long Wave IR)

Pro doplnění je uvedena spektrální citlivost lidského oka, které je receptorem viditelného záření. Sítnice lidského oka je vybavena dvěma druhy receptory záření – tyčinkami v počtu $1,3 \cdot 10^8$ a čípky v počtu $7 \cdot 10^6$.

Spektrální rozložení citlivosti oka pro denní vidění (čípky) je v grafu znázorněno červenou křivkou, pro noční vidění (tyčinky) potom modrou barvou. Modrá křivka je v intervalu vlnových délek cca 0,38 až 0,68 μm (její vrchol je na vlnové délce cca 0,5 μm) a červená křivka potom v intervalu vlnových délek cca 0,43 až 0,78 μm (její vrchol je na vlnové délce cca 0,6 μm) [8].



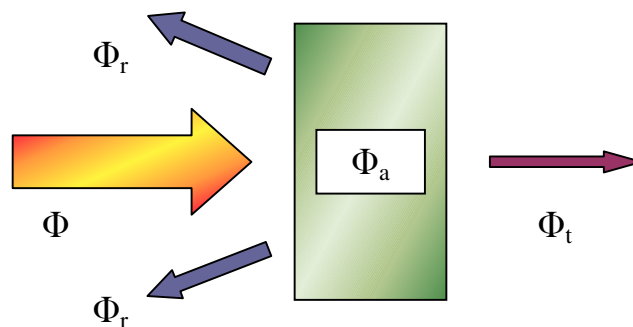
Obr.13 Spektrální citlivost oka

6.2 Záření reálných těles [Radiation of physical object]

Zářivá energie, kterou vysílá povrch tělesa určitou plochou za jednotku času, se nazývá zářivým tokem či výkonem. Je to výkon přenášený zářením, má označení P nebo Φ a jeho jednotkou je W ($1 \text{ W} = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$) [8,10,12].

Intenzita vyzařování M v daném bodě povrchu je podíl zářivého toku, vycházející z elementu povrchu a plochy tohoto elementu a má jednotku $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Přenos zářivé energie prostředím, resp. interakce s tělesem je na obr.14



Obr.14 Interakce zářivé energie

Ozařujeme-li nějaké těleso zářivým tokem Φ , potom těleso bude část tohoto toku pohlcovat – Φ_a , část toku bude odrážet Φ_r a část toku propouštět – Φ_t . Protože tato skutečnost platí pro všechna tělesa, definují se noví součinitelé, které popisují vlastnosti tělesa:

$$\text{součinitel pohlcení (pohltivosti): } \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (6.1)$$

$$\text{součinitel odrazu (odrazivosti): } \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (6.2)$$

$$\text{součinitel prostupu (propustnosti): } \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi} \quad (6.3)$$

Ze zákona o zachování energie platí:

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t = \alpha\Phi + \rho\Phi + \tau\Phi \quad (6.4)$$

z toho plyne:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (6.5)$$

Pro tělesa, která nejsou transparentní $\tau = 0$ (někdy je také používán výraz neprůteplivá) potom platí:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (6.6)$$

Z rovnice (6.6) plyne, že odráží-li těleso dobře sálavou energii, pak ji špatně pohlcuje a naopak. Jsou však tělesa, která jsou transparentní jen pro některé délky vln. Např. okenní sklo propouští jen paprsky světelné, ale téměř vůbec nepropouští paprsky ultrafialové a tepelné.

Vyzařování (tepelného) z tělesa je provázeno snižováním jeho tepelné energie (tepla), která se navenek projevuje jako snížení jeho teploty. Aby se teplota tělesa udržela konstantní a aby těleso bylo v termodynamické rovnováze s jeho okolím, musí být ztracená energie vyzařovaného tepelného záření nahrazena z vnějšku dodanou energií [8,11,12].

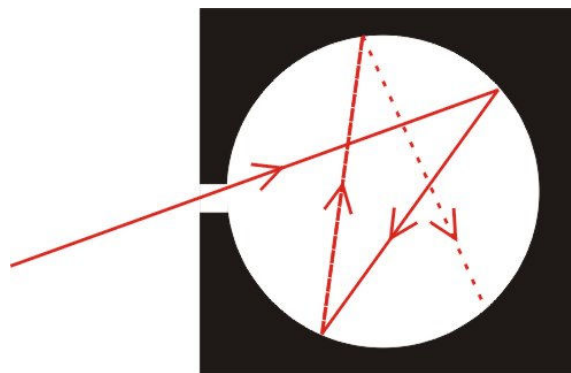
6.2.1 Záření absolutně černého tělesa [Radiation of totally black object]

V této kapitole se zmiňuji o dokonalém černém tělese, protože se zavádí do teoretických úvah jako představa sloužící k odvození základních zákonů záření, které jsou dále níže popsány.

Absolutně černé těleso se vyznačuje tím, že pohlcuje veškerou zářivou energii, která dopadá na jeho povrch. Jeho pohltivost je tedy úplná, tj. $\alpha = 1$. Naproti tomu jeho odrazivost (součinitel odrazu ρ) a průteplivost (součinitel prostupu τ) jsou rovny nule.

Absolutně černé těleso je tedy takové těleso, u něhož součinitel pohlcení dosahuje hodnoty 1 a to na všech vlnových délkách, u modelů černých těles je tento součinitel vždy menší než 1. U velmi kvalitních černých těles se hodnota součinitele pohlcení α velmi přibližuje hodnotě 1.

Dokonalé černé těleso v přírodě neexistuje, ale můžeme jej vyrobit uměle. Přibližná realizace modelu černého tělesa je naznačena na obr.15. Modelem černého tělesa může být dutinový zářič. Zářivý tok, který otvorem dopadne do dutiny, se mnohonásobným odrazem dokonale pohltí. Činitel pohlcení tohoto dutinového zářiče je rovný 1 a to pro každou vlnovou délku. Pokud se udržuje v dutině tělesa konstantní teplota, dutina tělesa je v termodynamické rovnováze s okolím a potom otvor modelu černého tělesa, který pohlcuje veškeré dopadající záření je zároveň zdrojem záření [8,10,11].



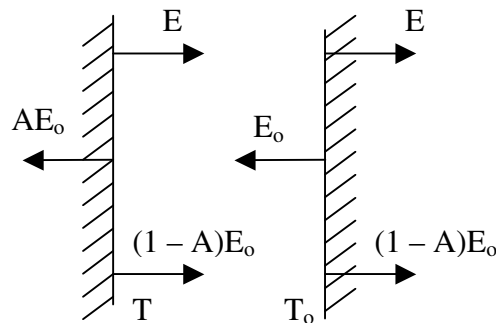
Obr.15 Schématické znázornění černého tělesa

6.3 Základní zákony záření (sálání) [Basic rules of radiation]

Mezi základní zákony záření patří Kirchhoffův zákon, vyzařovací zákon Planckův, zákon Stefan – Boltzmannův a Wienův posunovací zákon. Tyto zákony nám podrobněji a v matematických vzorcích vysvětlují zářivost, pohltivost a odrazivost jednotlivých těles.

6.3.1 Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon vyjadřuje vztah mezi zářivostí a pohltivostí tělesa. Pro lepší pochopení je tento vztah demonstrován na obr. č.16. Dochází zde k výměně tepla mezi dvěma rovnoběžnými stěnami. Šedé těleso, jehož stěna má teplotu T , má určitou pohltivost A , o níž platí $0 < A < 1$. Druhá stěna představuje povrch dokonale černého tělesa o absolutní teplotě T_0 a pohltivosti $A_0 = 1$.



Obr.16 Výměna tepla mezi dvěma rovnoběžnými stěnami

Stěna o teplotě T vyzaří za určitou časovou jednotku energii E , která je stěnou dokonale černého tělesa zcela pohlcena. Z úhrnné zářivosti tělesa E_0 , které dopadá na šedou stěnu, je část stěnou pohlcena (AE_0), zbytek $(1-A)E_0$ je odražen zpět na stěnu černého tělesa a je jím pohlcen. Celkové sdílení tepla mezi stěnou o vyšší teplotě T a stěnou o teplotě nižší T_0 můžeme zapsat jako:

$$E + (1-A) E_0 - E_0 = E - A E_0 \quad (6.7)$$

Jestliže jsou ale teploty obou stěn stejné, tzn. že se nesdílí žádné teplo, tak platí:

$$E - A E_0 = 0 \rightarrow A E_0 = E \quad (6.8)$$

Kirchhoffův zákon lze vyjádřit podle rovnice (6.9), kdy poměr úhrnné sálavosti k pohltivosti je pro všechna tělesa při stálé teplotě stejný a rovná se úhrnné sálavosti dokonale černého tělesa. Tento poměr tedy závisí jen na absolutní teplotě,

$$\frac{E}{A} = E_0 = f(T) \quad (6.9)$$

kde E je zářivost tělesa, A je pohltivost tělesa a E_0 je zářivost dokonale černého tělesa [8,11,12,13].

6.3.2 Planckův vyzařovací zákon

O vysvětlení průběhu závislosti vyzařované energie na vlnových délkách pro černé těleso se koncem 19.století pokoušela řada fyziků. Použití zákonů klasické termodynamiky a statistiky vedlo k výsledkům, které se s experimentálně zjištěnými závislostmi shodovaly tím lépe, čím delší byla vlnová délka záření – v oblasti kratších vlnových délek této shody nebylo dosaženo.

Max Planck však vyjádřil v roce 1900 závislost spektrální hustoty zářivého toku od teploty a vlnové délky $f(T, \lambda)$. Při odvozování zákona záření černého tělesa Planck vyslovil předpoklad, že záření vzniká tepelnými pohyby hmotných částic (atomů, molekul nebo iontů). Přitom výměna energie mezi tělesem a zářením není spojitá, ale uskutečňuje se po určitých menších množstvích, tzv. kvantech energie ε , které mají velikost:

$$\varepsilon = h * \nu \quad (6.10)$$

kde h je tzv. Planckova konstanta (v jednotkách SI má hodnotu $h = 6,62607 * 10^{-34}$ J·s), ν je frekvence záření [8,12,13].

6.3.3 Stefan – Boltzmannův zákon

Pro intenzitu vyzařování černého tělesa platí **Stefan-Boltzmannův zákon** – intenzita vyzařování pro černé těleso závisí pouze na termodynamické teplotě tělesa (intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa):

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (6.11)$$

a pro obecné těleso ještě na jeho emisivitu

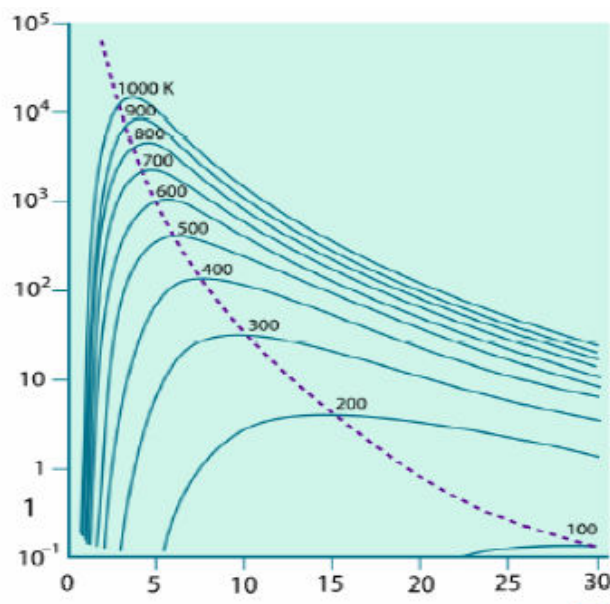
$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (6.12)$$

kde M je intenzita vyzařování, σ je Stefan – Boltzmannova konstanta, která má přibližnou velikost $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a T je teplota černého tělesa [8].

6.3.4 Wienův posunovací zákon

Pro tepelné záření černého tělesa platí **Wienův posunovací zákon** – je to fyzikální zákon, který konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje (tj. čím teplejší je těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách, tj. vyšších frekvencích):

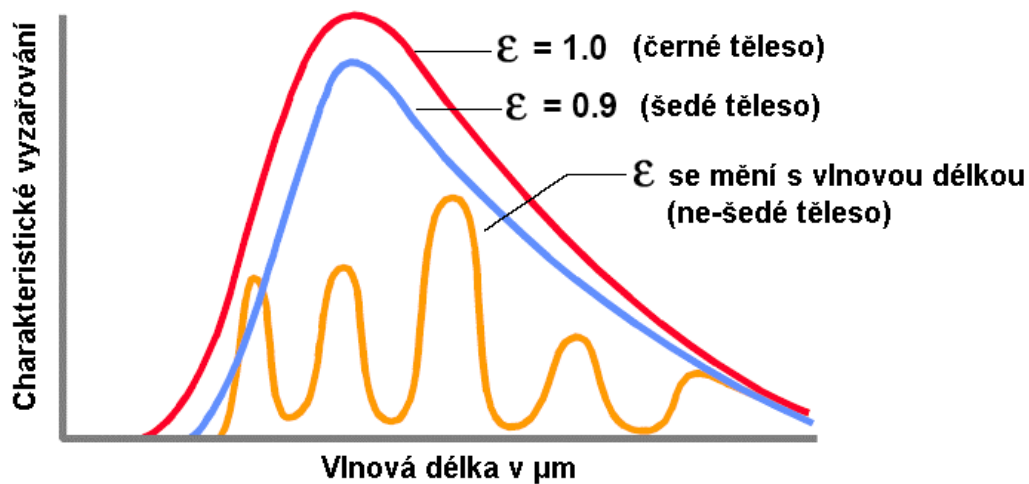
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst.} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (6.13)$$



Obr.17 Wienův zákon posuvu [8]

6.4 Emisivita [Emissivity]

Emisivita ε je poměr celkové vyzařované energie z určitého povrchu při dané teplotě k celkové vyzařované energii (absolutně) černého tělesa při té samé teplotě. Emisivita se udává v poměrných číslech v intervalu od 0 do 1, kdy emisivita (absolutně) lesklého tělesa se rovná 0 a emisivita (absolutně) černého tělesa je rovna 1. Tělesa s emisivitou menší než 1 se nazývají šedá tělesa. Tělesa, jejichž emisivita závisí rovněž na teplotě a vlnové délce se nazývají ne-šedá tělesa (non-gray bodies) [8].



Obr. 18 Charakteristické vyzařování při různých emisivitách

6.4.1 Součinitel (koeficient) emisivity [Emissivity coefficient]

Znalost součinitele (koeficientu) emisivity ε je jednou ze základních podmínek při bezkontaktním měření teplot resp. termografii pro správné měření – vyhodnocení teploty.

Součinitel emisivity záleží na:

- materiálu měřeného tělesa,
- vlastnostech jeho povrchu,
- vlnové délce,
- teplotě tělesa a na směru (úhlu) vyzařování z tělesa.

6.4.2 Jak zjistit hodnotu součinitele emisivity [How to calculate the value of emissivity coefficient]

V případě, že nemáme k dispozici správnou hodnotu emisivity, je několik způsobů, jak tuto hodnotu zjistit a to v případě, že máme termografický systém, který umožňuje zadávat (měnit) hodnoty emisivity a také odrážející se zdánlivou teplotu:

- a) Změříme kontaktně (v případech, kdy je to možné) teplotu v daném místě či oblasti, nastavíme správnou hodnotu zdánlivě se odrážející teploty a potom zadáváme hodnotu součinitele emisivity tak dlouho, až systémem vypočtená teplota je stejná, jako skutečná, kontaktně změřená teplota. Je doporučeno tento postup opakovat při jiné teplotě měřeného tělesa. Je také doporučeno, aby teplota objektu při měření emisivity byla min. o 10 °C vyšší, než je teplota okolí.
- b) Místo (oblast) měření (opětovně je připomenuto, že v případech, kdy je to možné) částečně opatříme látkou o známé (nejlépe vysoké) emisivitě, jako je např. černá izolační páska, speciální černá barva (ThermaSpray) nebo štítek o známé emisivitě (ThermaSpot) a bezkontaktně změříme teplotu místa či oblasti s tímto krytím. V tomto případě použijeme známou vysokou emisivitu. Protože teplota v bezprostředním okolí krytí bude stejná, jako v místě krytí, získáme údaj o skutečné teplotě a dále použijeme postup uvedený v bodě a).
- c) U členitých těles s mnoha prvky, jako je např. osazená deska tištěných spojů, je doporučen tento postup pro zjišťování emisivity jednotlivých částí a komponentů: celá osazená deska se zahřeje (v zahřívacím boxu) na jednu teplotu. Po zahřátí desky se v co možná nejkratším čase po vyjmutí desky z boxu pořídí termogram. Na termogramu se zobrazí jednotlivé komponenty s „jinými teplotami“, je ale jasné, že tento „rozdíl“ teplot není způsoben jinými teplotami, ale jinými emisivitami. Protože skutečná teplota je známa, potom se emisivity pro jednotlivé části desky a komponenty vyhodnotí tak, jak je uvedeno v bodu a) [8].

6.5 Odrážející se zdánlivá teplota (teplota pozadí, okolí) [Reflected apparent heat]

V odstavci 4.3 Základní principy termografie byl uveden schematicky základní měřicí řetězec, který se mj. skládá i z *Okolí (pozadí) měřeného tělesa*. Odrážející se zdánlivá teplota je v podstatě odrážející se záření od měřeného objektu. Je nutné si uvědomit, že u těles či objektů, které nejsou transparentní pro IČ záření a mají nízkou emisivitu povrchu, má odrážející se záření většinou velký vliv na výsledný údaj teploty.

Z toho vyplývá, že při malých hodnotách emisivity může být hodnota odrážející se zdánlivé teploty velká, což bude mít vliv na vyhodnocenou teplotu na povrchu měřeného tělesa. Z toho důvodu u téměř všech moderních radiometrických termografických systémů je možné v interním software kamer zadávat jak emisivitu, tak i odrážející se zdánlivou teplotu. Velikost součinitele odrazivosti ρ systém vypočte z $\rho = 1 - \varepsilon$ [8].

6.5.1 Doporučení pro měření odražené zdánlivé teploty [Recommendation for measuring of reflected apparent heat]

Pracovníci provádějící termografické měření mohou provést zkoušku platnosti hodnoty odražené zdánlivé teploty tím, že budou zakrývat měřený objekt od záření (odražených zdánlivých teplot) okolních zdrojů a při tom kontrolovat zda a jak se mění hodnoty kamerou měřených teplot. Pokud je to možné, je užitečné odstínit záření teplých nebo studených zdrojů v okolí měřeného objektu.

Odraženému záření z „bodových zdrojů“ (jako je např. Slunce), je možné se často vyvarovat tak, že kamera bude zaměřovat měřený objekt z jiného směru. Je nutné pamatovat, že odražená zdánlivá teplota může být nižší než je teplota okolí [8].

6.6 Atmosféra, přenos atmosférou a teplota atmosféry [Athmosphere]

6.6.1 Přenos atmosférou [Athmosphere transfer]

V základním měřícím řetězci – viz. Obr. 4.1 – je číslem 3 vyznačena atmosféra, která se vždy vyskytuje v případě běžných měření, mezi měřeným objektem a měřícím systémem. Atmosféra není transparentní v celém spektru vlnových délek, které patří do jednotlivých oblastí IČ pásma elektromagnetického spektra, ale existují v ní tzv. atmosférická okna, což jsou intervaly vlnových délek.

Nerespektování útlumu přenosu atmosférou může způsobit i značnou chybu v konečném výsledku měření. Termografický systém vyhodnocuje intenzitu záření měřeného objektu, a ta část záření tělesa, která se pohltí v atmosféře, ve svém důsledku v podstatě zmenší intenzitu vyhodnocovaného záření, a tak jsou vyhodnoceny i menší teploty na měřeném objektu. Sofistikované termografické systémy mají ve svých interních software, nebo ve vyhodnocovacích software zabudované korekce na útlum přenosu atmosférou, které vypočítají tento útlum na základě vložených údajů o vzdálenosti a relativní vlhkosti.

Termokamera využívá část infračerveného pásma záření tzv. atmosférického okna o vlnové délce 8 – 14 μm , při kterém jsou minimální ztráty při přenosu atmosférou [8].

6.6.2 Teplota atmosféry [Atmosphere temperature]

Dalším prvkem (činitelem), který je součástí měřícího řetězce, je přírůstek zářivého toku k záření tělesa a tím je záření atmosféry. Je třeba si uvědomit, že atmosféra se skládá z molekul různých plynů, vodních par, pevných částic atd., které mají určité fyzikální vlastnosti a které mají také některé obdobné vlastnosti jako pevná tělesa, např. při dané teplotě daná atmosféra také vyzařuje zářivou energii. Tento přírůstek k zářivé energii měřeného objektu je u některých termografických systémů zadáván jako teplota atmosféry T_{atm} [8].

7 Termografie [Thermography]

7.1 Pojem termografie [The concept of thermography]

Je to technika, která převádí vyzařované infračervené (dále jen IČ) záření povrchu na obrazový signál. Pojem termografie zahrnuje metody pro zobrazování teplotních polí na povrchu snímaného tělesa (rozložení povrchových teplot), které je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa. [8,13].

IČ termografie je i názvem pro techniku, která obecně určitým transformačním systémem, pomocí kterého je možné zobrazit neviditelné (pro lidské oko) IČ záření vyzařované z objektů, a to v závislosti na jejich tepelných stavech. Velice efektivním nástrojem nekontaktní IČ termografie je technika zvaná termovize, obecně infratechnika.

Typický termografický systém – termovize se podobá videokameře, který ale, na rozdíl od videokamery, zobrazuje tepelné vyzařování objektu většinou ve standardní televizní obrazové frekvenci. Termovizi je také možno popsat jako zobrazovací systém transformující informaci o rozložení teploty na povrchu snímaného objektu v infračerveném spektru na obraz viditelný lidským okem. Více sofistikované IČ kamery potom mohou nejen zobrazovat teplotní pole objektů (většinou jejich povrchů), ale umožňují tato pole kvantifikovat – vyhodnocovat (měřit) teploty těchto polí, a to dnes u běžně dostupných systémů v teplotním rozsahu až od - 40 °C až do + 2000 °C s obrazovou frekvencí až 50 Hz. Vlastní zobrazení tepelného pole (termogram) může být buď černobílé nebo (pseudo) barevné [8].

Pozn.: Termovize je registrovaná výrobní a obchodní značka firmy FLIR System – tato firma, produkuje zobrazovací a detekční systémy pro nekontaktní termografii, vyrábí určité výrobky s tímto názvem. U nás pojem termovize je obecně označována nekontaktní termografie, resp. jí používané infrazobrazovací systémy (nazývané také infrakamery, termokamery).

7.2 IČ Termografie – zobrazení (termogram) [Vizualization (thermogram)]

V úvodu této kapitoly bylo uvedeno, že výsledným „produktem“ IČ zobrazovacího systému je termogram – zobrazení tepelné (teplotní pole) na povrchu objektu. Termogram je vlastně grafický záznam rozložení teplot na povrchu snímaného objektu.

Ve skutečnosti se jedná o zobrazení distribuce fotonového toku IČ z povrchu zaměřovaného objektu – vyhodnocení resp. kvantifikace tohoto toku na teploty.

Příklady takového zobrazení jsou uvedeny na následujících obrázcích:

- normální barevná fotografie,
- černobílý termogram,
- barevný termogram – smyslem je jasná a přehledná vizualizace rozložení povrchových teplot na objektu [8].



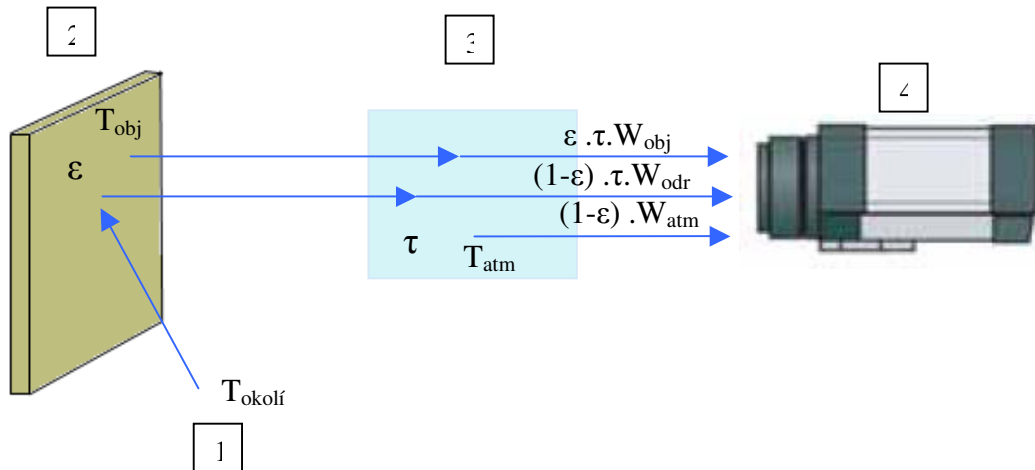
Obr. 19 Zobrazení distribuce fotonového toku - příklady

Pozn.: Na obou termogramech se brýle zobrazují jako studené (chladnější), není to ale proto, že brýle (jejich skla) mají tak výrazně jinou teplotu ve srovnání s povrchem kůže na obličeji – příčinou je ale nedostatečná spektrální propustnost skla, jejímž důsledkem je „odfiltrování“ zářivého toku z povrchu obličeje, která skla „zakrývají“.

7.3 Základní princip termografie [The fundamentals of thermography]

Princip termografie spočívá v detekci zářivé energie vyzařované z měřeného tělesa, která reprezentuje teploty (teplotní pole) většinou na povrchu měřeného tělesa a dále její zobrazení a kvantifikaci (vyhodnocení) teplotních polí [8].

Na obrázku č. 20 je schematicky uveden základní měřicí řetězec, který se skládá:



Obr. 20 Měřicí řetězec

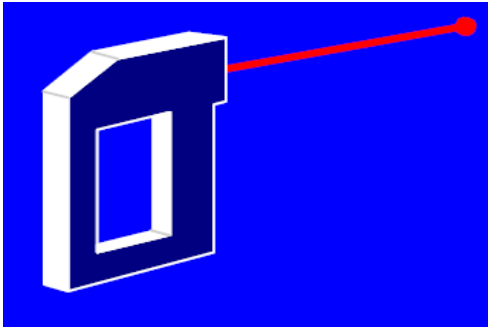
- 1 - Okolí (pozadí) měřeného tělesa
- 2 - Vlastní měřené těleso
- 3 - Atmosféra mezi měřeným tělesem a měřícím systémem
- 4 - Měřicí systém

8 Měřicí technika [Measuring equipment]

8.1 Základní typy měřicí techniky [Basic types of measuring equipment]

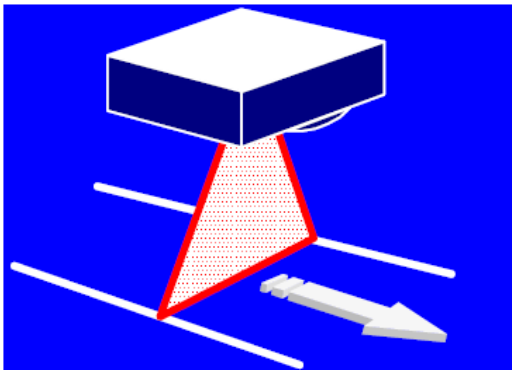
Techniku pro bezkontaktní měření lze rozdělit podle konstrukčního uspořádání, detektoru a způsobu prezentace výsledného údaje do 3 základních skupin:

- systémy pro měření teploty v „bodě“ – bezkontaktní teploměry



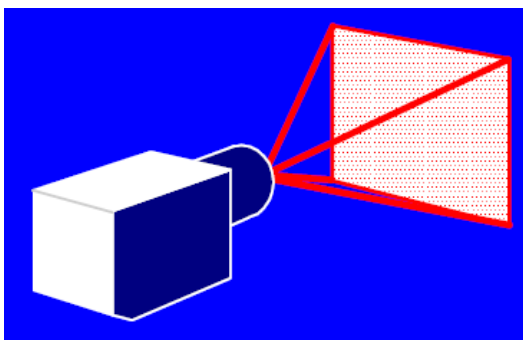
Obr. 21 Bezkontaktní teploměr (někdy též nazývaný radiační pyrometr)

- systémy pro měření teploty v „řádku“ – liniové skenery



Obr. 22 Liniový skener

- systémy pro měření teploty na „ploše“ – termografické systémy



Obr. 23 Termografický systém

Každý typ této techniky má optický systém, detektor a systém zpracování, neboli vyhodnocení vstupní informace [8,17].

8.2 Optický systém [Optical systém]

Optický systém je optická soustava, která slouží pro efektivní zaostření zářivého toku zdroje záření na detektor systému. Zachycuje tedy infračervenou energii vyzařovanou z měřené plochy a soustřeďuje ji na detektor (detektor je základním prvkem systémů, který převádí – konvertuje dopadající zářivý tok na elektrický signál.).

Parametry, které charakterizují optickou soustavu jsou:

- koeficient propustnosti v pracovní oblasti,
- zorné pole,
- ohnisková vzdálenost a rozlišovací schopnost [8].

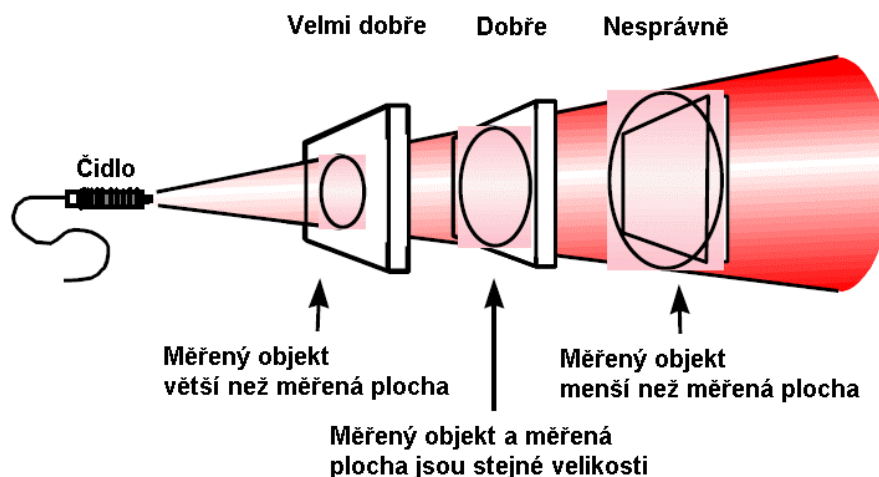
8.2.1 Optické materiály [Optical materials]

V infračerveném pásmu, které je děleno na různé oblasti, se prakticky již od krátkovlnné oblasti používají speciální optické materiály, které jsou propustné – transparentní pro IČ záření. Klasické materiály jako např. sklo nebo speciální sklo, ze kterých jsou zhotoveny objektivy standardních videokamer, není propustné v infračervených oblastech, ve kterých pracují systémy pro bezkontaktní měření teplot resp. zobrazování teplotních polí.

Pro objektivy termografických systémů, které pracují v tzv. vzdálené – dlouhovlnné IČ oblasti je nejvíce používaným materiálem germanium a pro systémy, které pracují v krátkovlnné a středněvlnné IČ oblasti se nejvíce používá křemík. Jsou to v podstatě monokrystaly, které jsou opracovány do potřebného tvaru čočky, jsou vyleštěny a pokryty antireflexní vrstvou. V některých případech jsou jejich povrchy ještě pokryty speciální vrstvou, která zabraňuje jejich snadnému poškození (poškrábání) [8].

8.2.2 Zorné pole a skutečné (okamžité) zorné pole [Apparent and actual field of vision]

Velmi důležitými ukazateli optických systémů IČ techniky je zorný úhel (zorné pole) a rozlišovací schopnost (geometrické rozdělení). Na obrázku jsou přiblíženy souvislosti mezi optickým – zorným polem, skutečným (okamžitým) zorným polem a „kvalitou“ měření a zobrazení [8,14,15].



Obr. 24 Závislost velikosti zorného pole na vzdálenosti od měřeného objektu pro zvolený objektiv

Na obrázku č. 24 je naznačena závislost zorného pole na vzdálenosti. Pro názornost předpokládejme, že používáme systém s jedním bodovým detektorem. Tento systém má určité zorné pole, na obrázku představované naznačeným kuželem, jehož vrchol je přibližně v místě detektoru. Pokud je takto vymezený kruh menší než plocha měřeného objektu, potom je detektor zaměřen pouze na měřený objekt – jedná se tedy o správné geometrické přizpůsobení optického systému k měřicímu systému vzhledem na měření daného objektu.

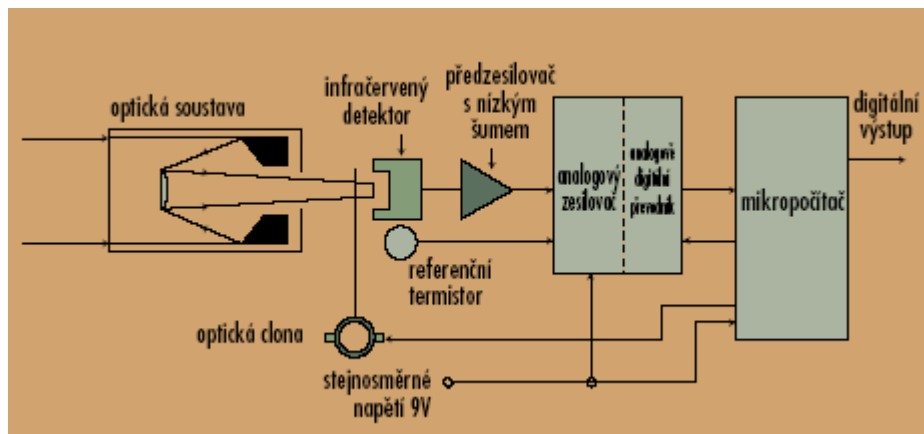
V případě, že tomu tak není, jak je v obrázku 24 vyznačeno jako „nesprávně“, potom pomyslný kruh je větší než měřený objekt a na detektor dopadá nejen zářivý tok z měřeného objektu, ale i z jeho okolí, které je v zorném poli měřicího systému, což samozřejmě způsobí chybu v měřené hodnotě. Měřicí systém – jeho detektor totiž vyhodnotí celkový zářivý tok v zorném poli vymezeném optickým systémem bez toho, že by byl schopen odlišit, co je zářivý tok z měřeného objektu a co je z jeho okolí [8].

9 Měřicí systémy [Measuring systems]

9.1 Bezkontaktní teploměry [Non contact thermometers]

Bezkontaktní teploměry pracují na principu vyhodnocení množství vyzářené energie v infračerveném spektru. Konstrukčně je bezkontaktní teploměr opticko-elektronický přístroj. Objektiv soustřeďuje infračervené záření na senzor, který je převede na elektrickou veličinu. Elektronická jednotka s procesorem signál senzoru zpracuje a zobrazí na displeji hodnotu teploty, případně převede na standardní elektrické veličiny.

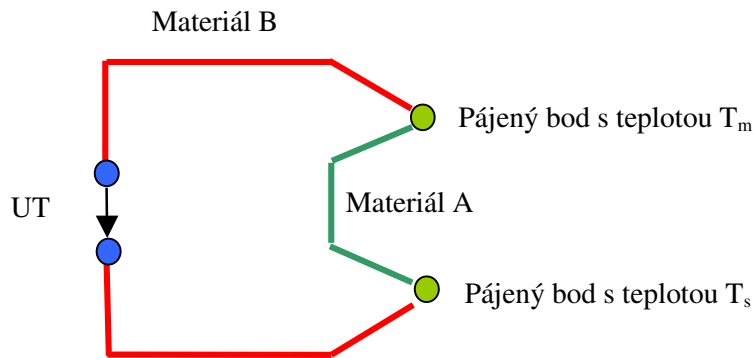
U bezkontaktních teploměrů je možné většinou pouze zadávat koeficient emisivity, není tedy možná kompenzace odraženého zářivého toku z povrchu měřeného objektu. Tato skutečnost může mít při určitých měřeních v terénu značný vliv na správnost vyhodnoceného údaje měřené teploty [8,16].



Obr. 25 Základní schéma bezkontaktního teploměru

Základním prvkem – detektorem je tzv. termočláneková baterie, která je složena z určitého počtu termočláneků. Termočlánek (zdroj elektrického proudu, používaný především jako čidlo teploty) – termoelektrické články využívají tzv. Seebeckův jev (přímá přeměna rozdílu teplot na elektrické napětí a naopak). K tomu jevu dojde při spojení dvou různých kovů nebo polovodičů, jsou-li jejich spojení (na obrázku níže označeny jako body T_s a T_m) umístěny do míst s různou teplotou [8,16].

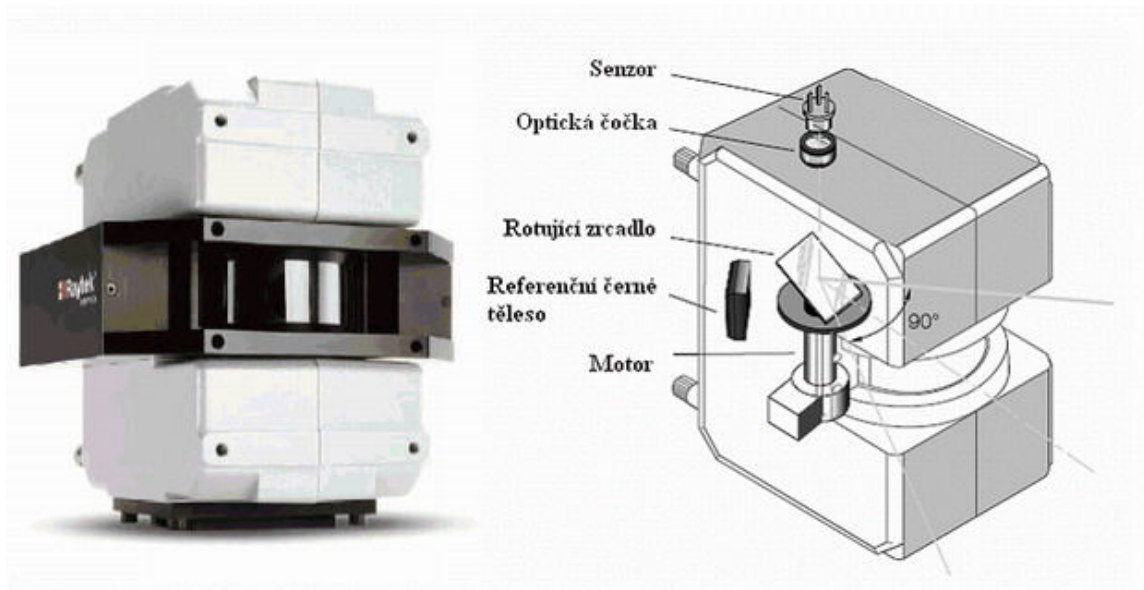
Na konci rozpojeného obvodu potom vzniká elektrické napětí nazývané termoelektrické napětí, jehož velikost, pokud jsou materiály homogenní, závisí pouze na teplotě spojů.



Obr. 26 Princip termočlánku

9.2 Skenovací liniové systémy [Scanning line systems]

Skenovací liniové systémy jsou osazeny jedním detektorem, který je omezen na měření teploty jenom v jednom bodě. Detektor je umístěn v ose optického systému, který je tvořen otáčejícím se mechanismem osazeným odrážejícím optickým prvkem – zrcadlem. Zářivý tok z měřeného objektu, který prochází vstupním oknem (tvořen plastickým materiálem), dopadá na pevně umístěný optický prvek – zrcadlo a odráží zářivý tok na otáčející se zrcadlo, které jej odráží na detektor.



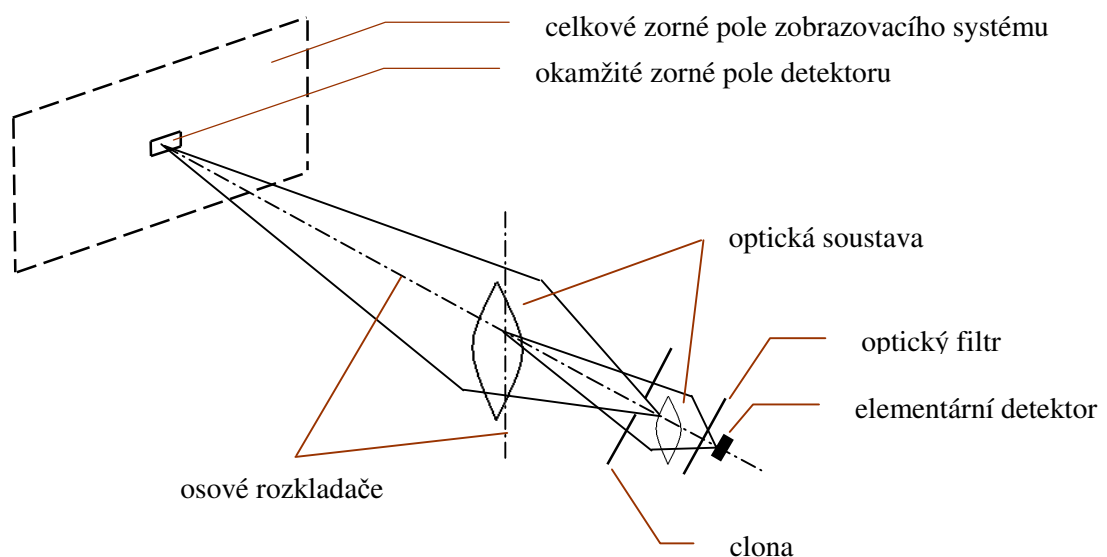
Obr. 27 Vzhled linescanneru MP50 a jeho vnitřní uspořádání

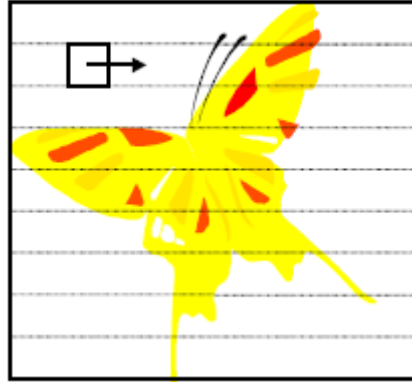
Princip skenování je takový, že optický systém s velmi úzkým zorným polem „virtuálně posouvá“ detektor v řádku. K tomuto posuvu dochází díky uspořádání optického systému (který má většinou malý zorný úhel) a dochází k němu v důsledku otáčení se jednoho optického prvku, připevněného na otáčející se mechanismus. Při každé „otočce“ se nejprve sejme zářivý tok ze zdroje záření – černého tělesa, potom si při „skenování“ průzorem v plášti skeneru, který je vyplněn IČ oknem (plastickým materiálem) sejme zářivý tok v jednom řádku na měřeném objektu. Tím je ukončen proces sejmutí a vyhodnocení vstupních signálů v „jednom řádku“ a dále se postup opakuje. Po každém naskenování linky jsou údaje o teplotě přenesené po sériovém rozhraní k počítači, ve kterém je nainstalován příslušný software nebo zvláštní uživatelský program.

9.3 Termografické zobrazovací systémy [Thermography vision systems]

Na obrázcích jsou naznačeny tři základní způsoby vytváření obrazu u termografických zobrazovacích systémů.

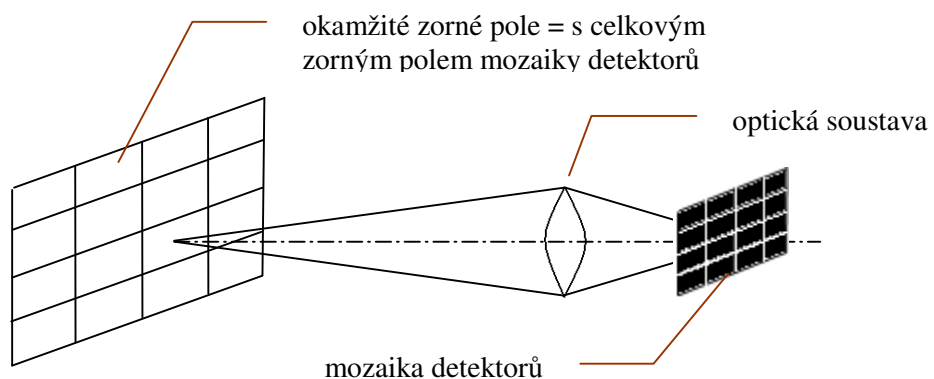
Na prvním obrázku je naznačen opticko-mechanický „skenovací“ systém, který je nejprve vytvářen v jednotlivých bodech, ze kterých se skládá řádek a následně potom obdobně je vytvářen po jednotlivých bodech obraz v dalších řádcích. Snímaná plocha je tedy „rozložena“ na jednotlivé body složené do řádků, ze kterých je potom „složena“ plocha. Tento systém je někdy také nazýván jako systém s postupným zaváděním vstupní informace a jejím postupným vyhodnocením [8].

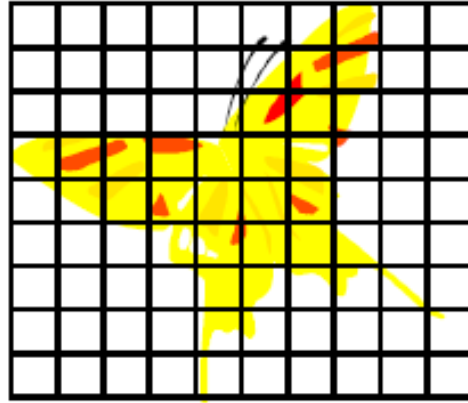




Obr. 28 Opticko-mechanický „skenovací“ systém

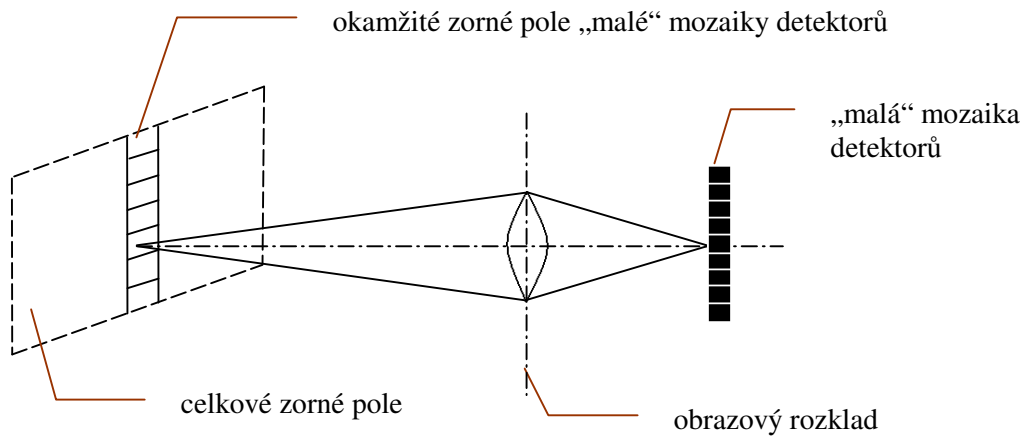
Na dalším obrázku je naznačen systém s mozaikovým detektorem, kde každý pixel detektoru, se svým zorným polem snímá určitou část snímané plochy, kterou následně zobrazí jako jednu část plochy. Protože tyto systémy pracují v reálném čase – snímací resp. obrazová frekvence je normálně 25 nebo 50 Hz a pokud detektor má dostatečnou hustotu pixelů, je vytvářen termografický obraz – termogram s dostatečným (geometrickým rozlišením), který je složen z informací jednotlivých pixelů. Takovýto systém se též nazývá systém se současným zavedením vstupní informace a jejím současným vyhodnocením.





Obr. 29 Systém s mozaikovým detektorem

Posledním typem je systém se smíšeným zaváděním vstupní informace a jejím smíšeným vyhodnocením. Takovéto systémy jsou osazeny detektorem „sloupcem“ a pomocí rozkladového prvku obrazu je tento sloupec „virtuálně“ rozmítán po řádku nebo je naopak rozmítán do sloupců. Výsledkem je opět obraz, zobrazující plochu [8].



Obr. 30 Systémy se smíšeným zaváděním vstupní informace a jejím smíšeným vyhodnocením

10 Experimentální část

Cílem této části je:

- navrhnout experiment, který bude sledovat teplotní změny u textilie, která bude lokálně navlhčena kapkou destilované vody,
- popsat přípravu experimentu,
- popsat průběh experimentu,
- zaznamenat a srovnat naměřené výsledky,
- zvážit možnost použití výpočtu pro předpokládané tepelné efekty spojené s navlhčením textilie,
- pokusit se objasnit některé jevy, které se v průběhu experimentu objevily,
- doporučit další postup.

10.1 Návrh experimentu

Pro experiment se z důvodu dosažení dostatečné vypovídající hodnoty a zároveň snadné porovnatelnosti vybere 10 různých textilních vzorků, které budou obsahovat přírodní, syntetické i směšové materiály s různou strukturou a vlastnostmi. Všechny zkoumané vzorky budou nové, nepoužité a nepoškozené. Rozměr vzorků je stanoven jednotně na 30 x 30 cm. Všechny vzorky budou při svém zkoumání upnuty do svépomocně vyrobeného rámečku ze smrkových dřevěných latěk o rozměru 18,5 x 18,5 cm. Vzorek ve zmíněném rámečku bude při zkoumání ve vodorovné poloze položen na bílou čtvrtku tak, aby se nedotýkal jí ani země (kvůli možnému ovlivnění šíření kapaliny). Vzdálenost objektivu termokamery od středu zkoumaného vzorku bude nastavena na 90 cm. Kamera bude upevněna po celou dobu zkoumání na stativu. Pro stanovení výsledných parametrů hodnocení, dle kterých lze usuzovat na následnou charakteristiku předpokládaných tepelných jevů zkoumaného materiálu, byla použita infračervená kamera ThermaCAM™ S60 výrobce fy FLIR. Tato infračervená kamera měří a zobrazuje objektem vyzařované infračervené záření. Skutečnost, že záření přímo závisí na povrchové teplotě objektu, umožňuje kameře tuto teplotu vypočítat a zobrazit. Na vzorky se bude aplikovat kapka destilované vody vždy o stejném objemu 0,3 ml po celkovou dobu 15 minut a budou zhotoveny snímky přímo v momentu aplikace kapky, po 5, 10 a 15 minutách od momentu aplikace kapky na vzorek. Celý experiment bude

probíhat v laboratorních podmínkách při konstantní teplotě a vlhkosti. Výsledky se zaznamenají do tabulek a grafů a porovnají se.

Níže je podrobně popsán použitý materiál, jeho charakteristika, příprava vzorků, použité zařízení, průběh měření a výsledky daného experimentu.

10.2 Charakteristika použitého materiálu

Pro experimentální měření nasákavosti textilie pomocí termovize byly použity textilní materiály uvedené v tab.2. Tyto nové a nepoužité materiály byly zakoupeny ve velkoobchodě metrového textilu v Praze. Jednotlivé materiály byly nastříhány do vzorků o rozměru 30 x 30 cm. Pro přesné stanovení složení vzorku byla každá textilie zkoumána pod mikroskopem na KTM.

Tab.2 Charakteristika použitých materiálů

Vzorek	Složení materiálu	Vazba	Dostava	
			Osnova/1cm	Útek/1cm
č.1	100% acetát	atlasová	27	23
č.2	100% CO	keprová	28	25
č.3	100% WO	keprová	26	19
č.4	100% LI	plátňová	24	22
č.5	100% hedvábí	atlasová	29	27
č.6	100% PA 4	atlasová	28	20
č.7	63%CO/37%LI	keprová	26	24
č.8	70%WO/30%PA	keprová	32	28
č.9	80%WO/20%PES	plátňová	38	29
č.10	67%PES/33%VI	plátňová	36	25

10.3 Charakteristika použitého zařízení

Při realizaci tohoto experimentu byla použita infračervená kamera ThermaCAM™ S60 firmy Flir, stativ a upínací rámy, ve kterých byly napnuté jednotlivé vzorky.

10.3.1 ThermaCAM™ S60

Infračervený zobrazovací systém ThermaCAM™ S60 zahrnuje infračervenou kameru s vestavěným objektivem 24°, vizuální barevnou kameru, laserové ukazovátko (sloužící k přesné identifikaci polohy měřeného místa), IrDA – infračervené

komunikační spojení a barevný 4-palcový displej LCD na odnímatelném dálkovém ovládní.

Kamera je příruční a přenosná s nízkou hmotností a může pracovat více než dvě hodiny na jednu baterii.

Má barevný obraz ve vysokém rozlišení (infračervený a viditelný), který je poskytován v reálném čase, a to buď v integrovaném hledáčku nebo na displeji LCD dálkového ovládní.

Kamera se velmi snadno obsluhuje a to jen pomocí několika tlačítek, která jsou umístěna na kameře tak, aby uživatel mohl konečkem prstu snadno ovládat hlavní funkce kamery. Software kamery, k němuž je snadný přístup přes systém vestavěných nabídek, nám dovoluje určitý stupeň vyhodnocení již během měření přímo v terénu.

Dokumentaci vyšetřovaných obrazů můžeme provést dvěma způsoby a to:

- digitalizací a ukládáním obrazů na odnímatelnou kartu CompactFlash (počet snímků je dán kapacitou externí karty),
- digitalizací a ukládáním obrazů do vnitřní paměti v kameře (cca 50 snímků).

Obrazy lze analyzovat v terénu v reálném čase pomocí měřících funkcí vestavěných do softwaru kamery nebo v počítači pomocí softwaru FLIR Systems pro infračervenou analýzu a vytváření zpráv.

V počítači můžeme obrazy nejen prohlížet a analyzovat, ale můžeme také přehrávat zvukové komentáře (ke každému obrazu můžeme uložit zvukový komentář pomocí sluchátek s mikrofonom, které jsou připojené ke kameře). Software FLIR Systems usnadňuje vytváření kompletních zpráv z měření s mnoha infračervenými obrazy, fotografiemi, tabulkami atd.

Systém ThermaCAM™ S60 je také podporovaný programem ThermaCAM Connect – novým softwarem od společnosti FLIR Systems, který se spouští v prostředí Průzkumníka Windows. Připojení kamery k počítači pomocí USB umožňuje, že v Průzkumníku Windows se kamera jeví jako disková jednotka. Obraz z kamery lze pak snadno přetažením přesunout do počítače a tam jej následně zpracovat. Kamera ThermaCAM™ S 60 také nabízí rychlý záznam pro nahrávání infračervených obrazů velkou rychlostí pomocí FireWire (IEEE 1394a, 100/200/400 Mb/s).

10.3.2 Upínací rámy

Upínací rámy (2 ks) byly zhotoveny svépomocí a to z dřevěných smrkových latěk o rozměru 18,5 x 18,5 cm.

10.4 Postup měření

Celý experiment probíhal na katedře oděvnictví v Laboratoři komfortu. V laboratoři byla naměřena vlhkost 33,1% a teplota 21,54 °C. Připravený vzorek textilního materiálu byl vždy upnut do upínacího rámu a s tímto rámem byl položen na bílé čtvrtky. Textilní materiál se přímo nedotýkal podložky (ani bílých čtvrtek) a to z důvodu ovlivnění roztékání kapky.

Termovizní kamera byla upnuta do stativu, kde byla navolena výška objektivu kamery od středu vzorku na 90 cm. Objektiv kamery zaujímal rovnoběžnou polohu se vzorkem.

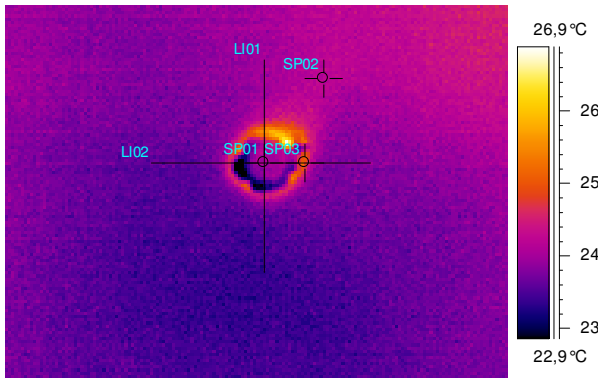
Poté pomocí injekční stříkačky bylo dopraveno definované množství destilované vody (0,3 ml) na měřenou textilií. Mezitím, co kapalina působila na textilií, termovize snímala po celou dobu (15 minut) teplotní účinky kapaliny v textilií. Jelikož v tištěné podobě není možno zaznamenat celý průběh působení kapaliny na vzorek, pořizovala jsem snímky vždy v momentu aplikace kapky na vzorek, dále pak po 5, 10 a 15 minutách od okamžiku aplikace. Po uplynutí časového intervalu, který byl stejný pro všechny použité materiály, bylo možné v počítači prohlédnout výsledky měření a zjistit šíření kapaliny v textilií.

10.5 Výsledky měření

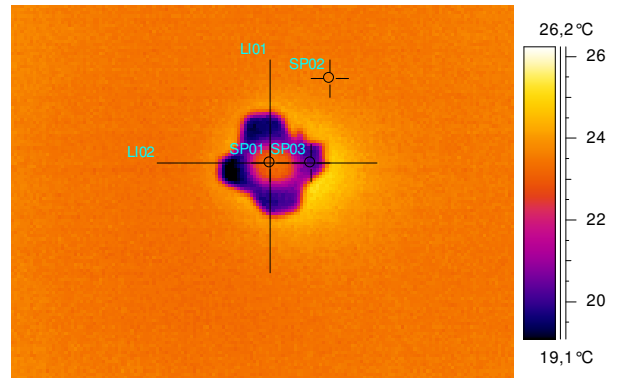
Pro posuzování a následné vyhodnocení experimentu byly u každého termosnímků použity osy x, y a body, které nám ukazují v různých místech tkaniny její povrchovou teplotu. Bod SP01 byl umístěn do středu kapky, bod SP02 byl umístěn na tkanině a bod SP03 na osu x – okraj kapky.

Snímky nám umožňují pozorovat nejen šíření kapaliny v textilií, ale také průběh teplot, které se vyskytují při nasákavosti dané textilie. Teploty u všech zkoumaných vzorků budou dále zpracovány v tabulkách a pro lepší orientaci jsou vyjádřeny prostřednictvím grafu.

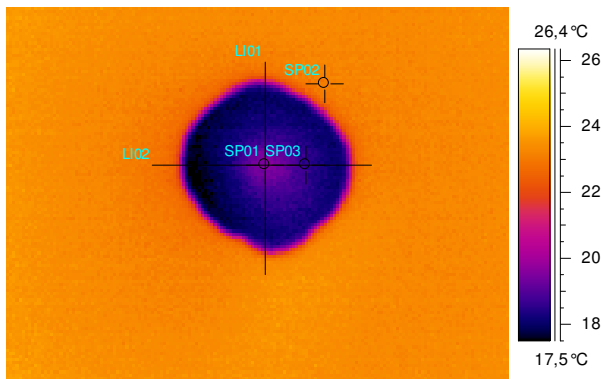
Vzorek č.1 – acetát



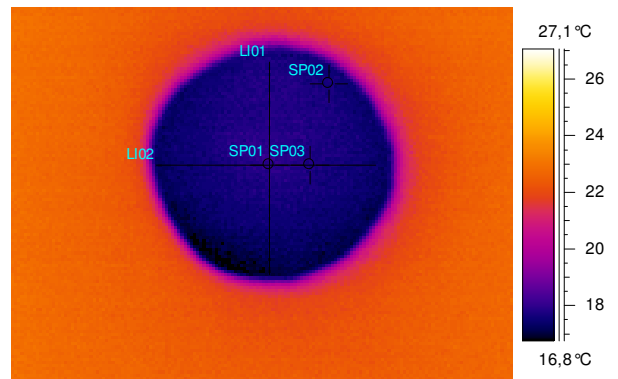
Aplikace kapky, snímek I. - čas 00:00



Snímek II. - čas 00:05



Snímek III. - čas 00:10



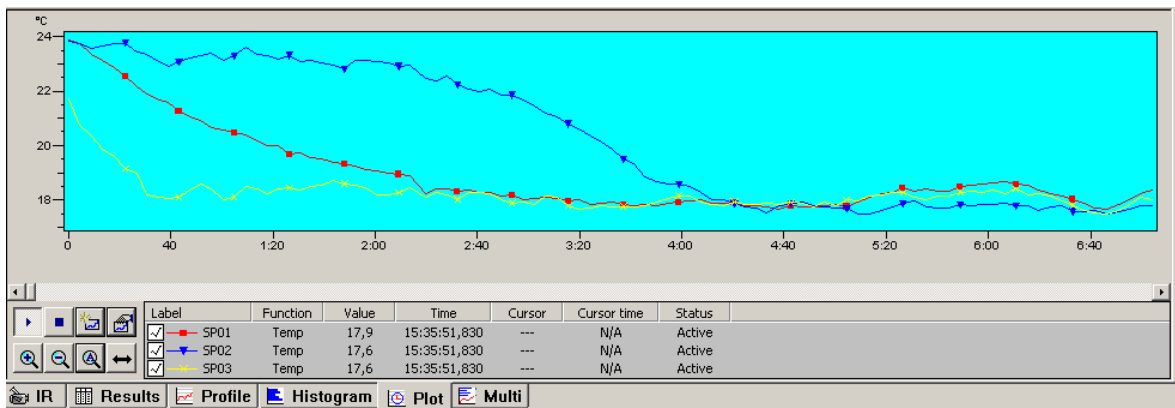
Snímek IV. - čas 00:15

Acetát se řadí mezi chemická vlákna, a to vlákna z regenerované celulózy, zde se projevil jako hydrofilní. Těsně po aplikaci kapaliny byla teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) 24,8 °C, poté v tomto bodě začala teplota klesat až na konečnou hodnotu 17,7 °C (po 15 minutách působení) – dochází zde k ochlazení, které je způsobeno odpařováním kapaliny. Naopak na okraji skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou docházelo ke zvýšení teploty, protože zde nedocházelo k odpařování kapaliny. Na dalších snímcích III. a IV. můžeme pozorovat postup šíření kapaliny.

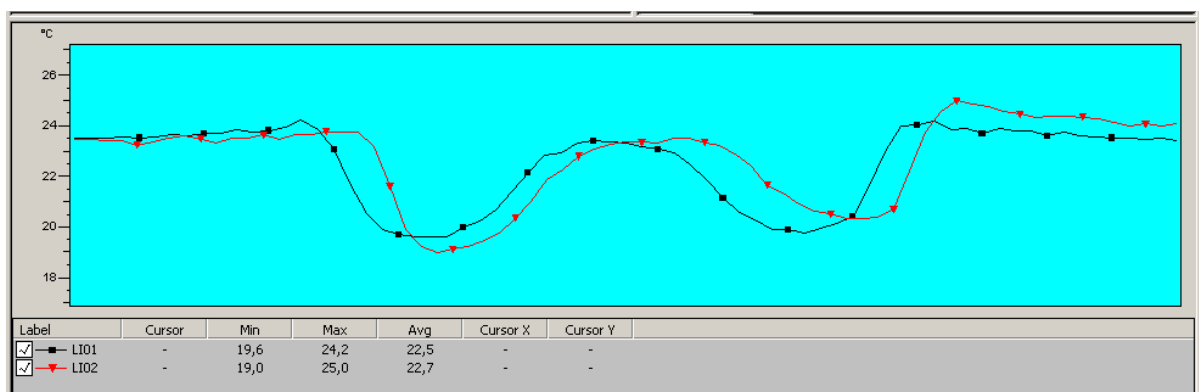
Tabulka č. 3

Acetát	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	24,1 °C	23,3 °C	19,6 °C	17,9 °C
SP02	24,1 °C	23,6 °C	23,1 °C	17,6 °C
SP03	24,8 °C	20,3 °C	18,5 °C	17,6 °C
L1 (x)	23,9 °C	22,5 °C	19,6 °C	17,7 °C
L2 (y)	23,8 °C	22,7 °C	19,5 °C	17,6 °C

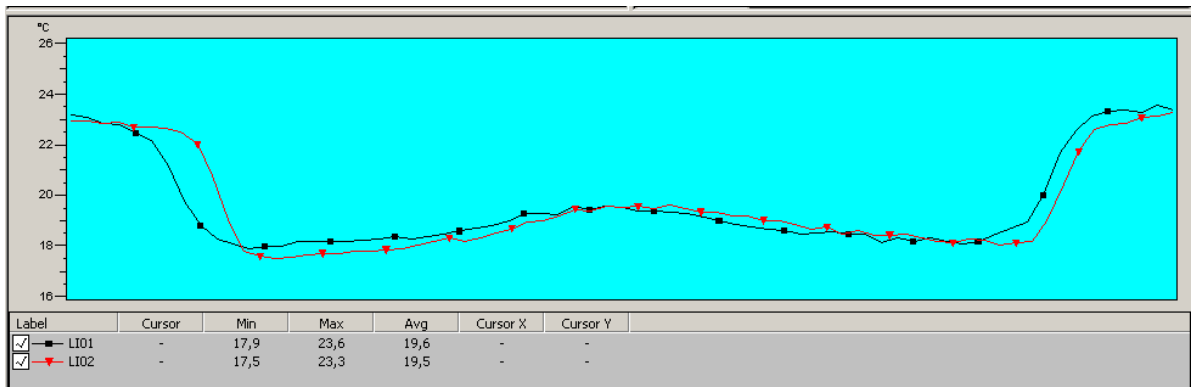
Graf 1. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



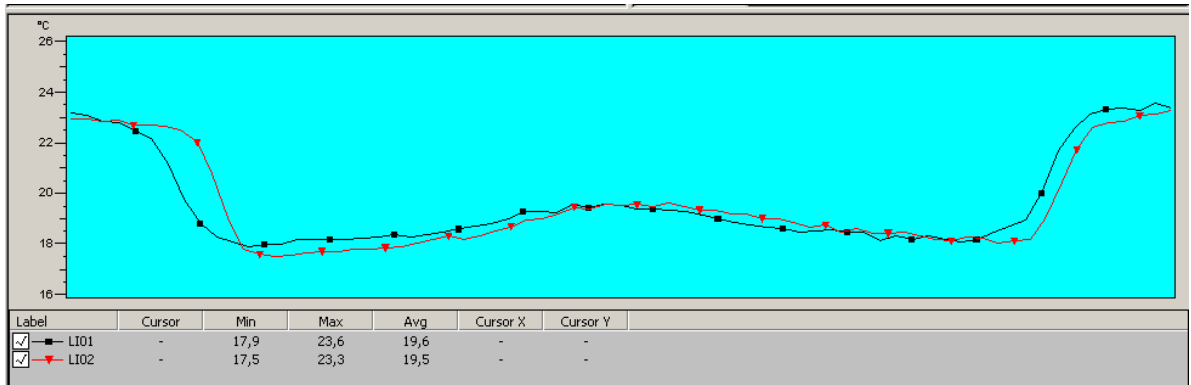
Graf 2. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



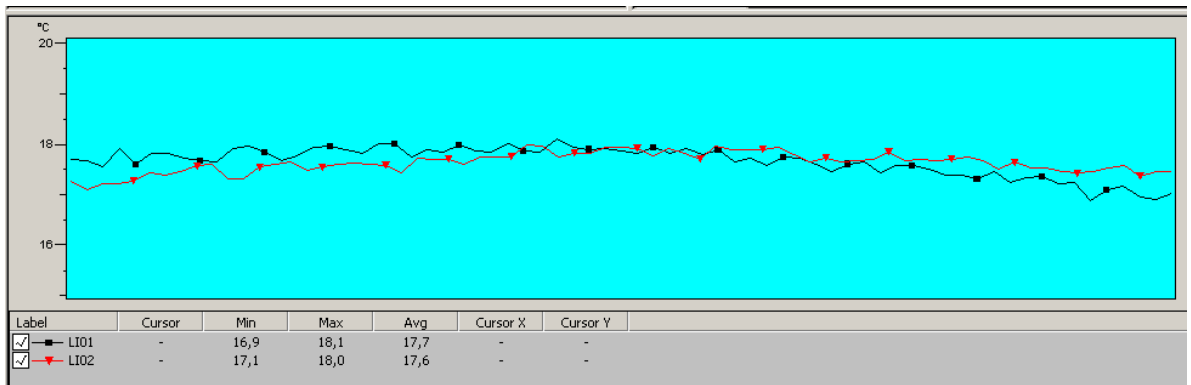
Graf 3. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku

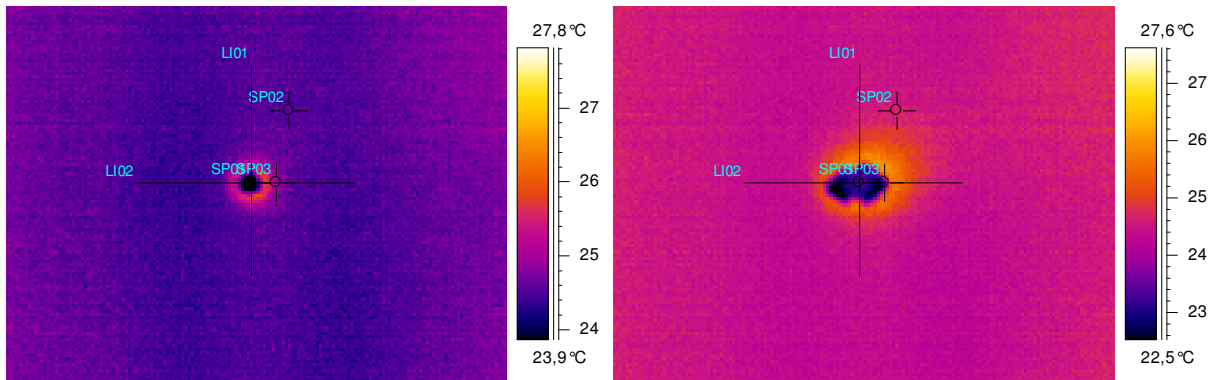


Graf 4. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



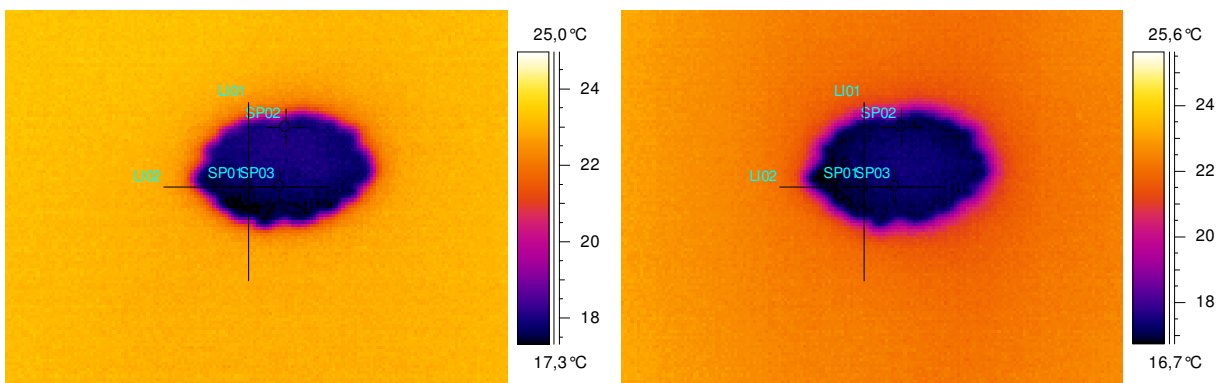
Graf 5. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



Vzorek č.2 - bavlna

Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. - čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

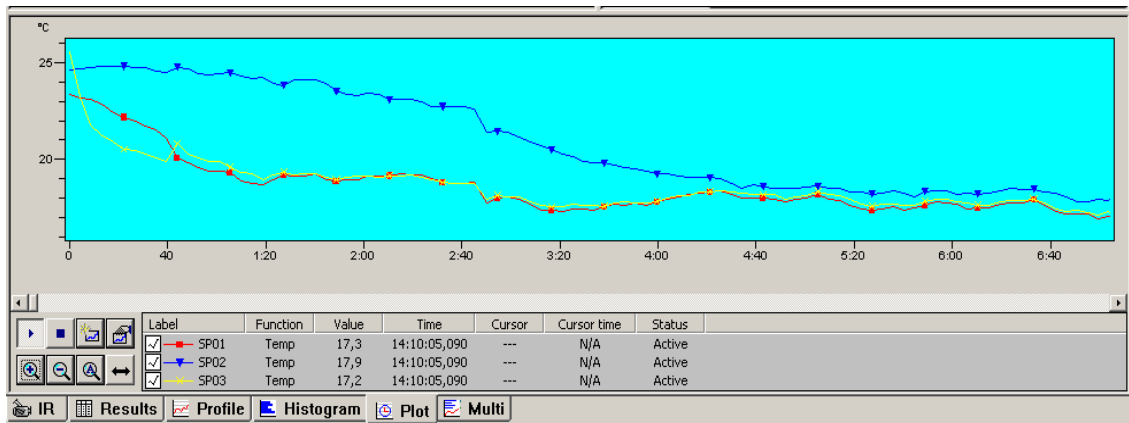
Snímek IV. – čas 00:15

Bavlna je přírodní materiál, který je velmi nasákvavý, tedy hydrofilní. Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) u prvního snímku byla 24,9 °C a poté klesla (po 15 minutách působení kapaliny na vzorek) na hodnotu 17,2 °C. Tyto teploty jsou obdobné jako u předchozího vzorku. Liší se pouze způsobem šíření kapaliny – pomalejší vsáknutí kapky do materiálu.

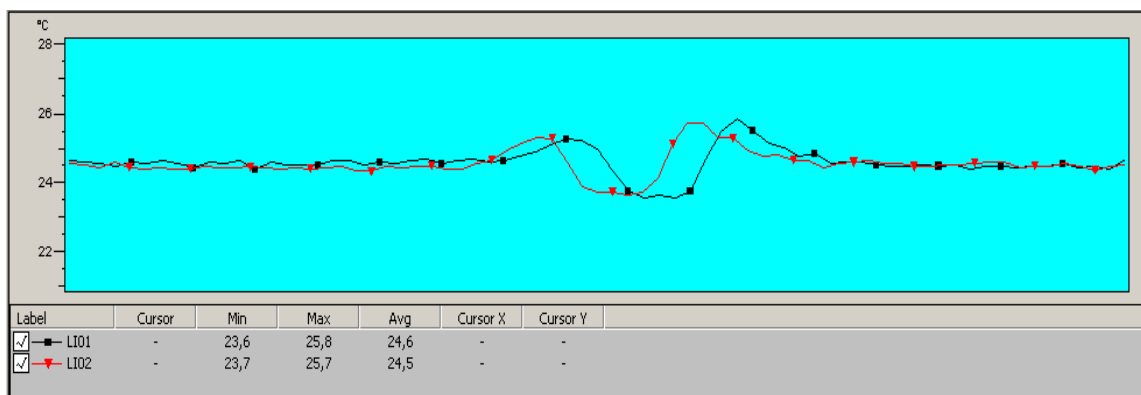
Tabulka č. 4

Bavlna	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	23,7 °C	23,2 °C	17,7 °C	17,3 °C
SP02	24,6 °C	24,7 °C	19,7 °C	17,9 °C
SP03	24,9 °C	23,3 °C	17,8 °C	17,2 °C
L1 (x)	24,6 °C	24,5 °C	23,1 °C	19,4 °C
L2 (y)	24,5 °C	24,3 °C	23,1 °C	18,5 °C

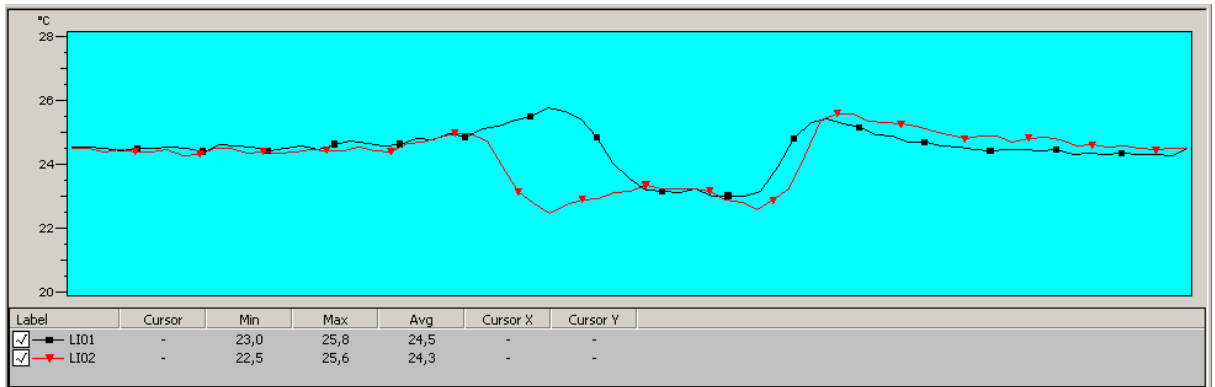
Graf 6. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



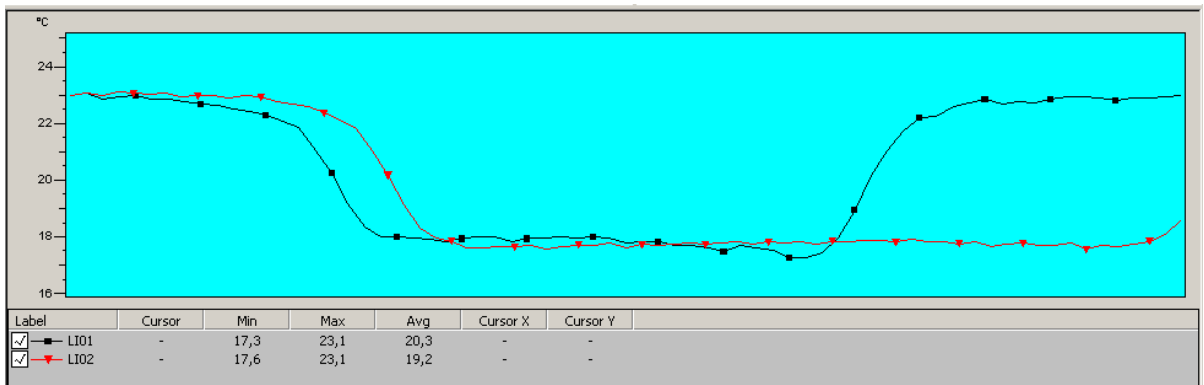
Graf 7. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



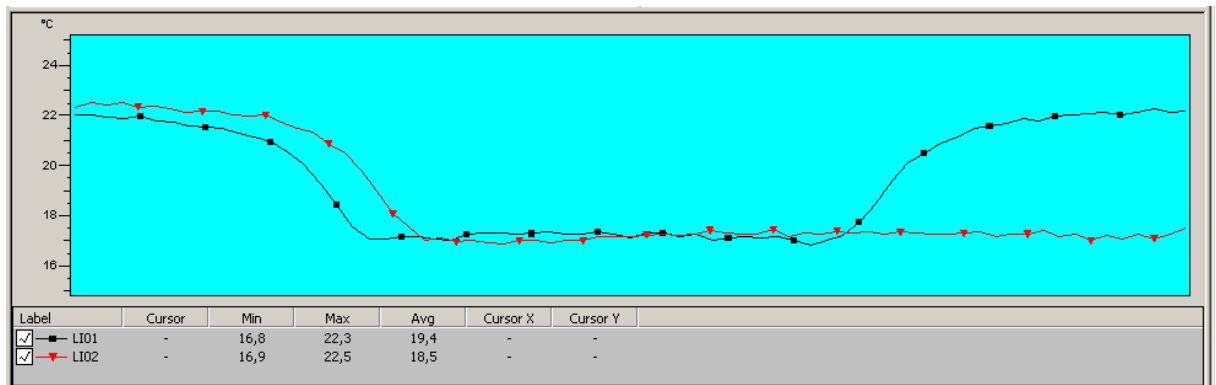
Graf 8. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku



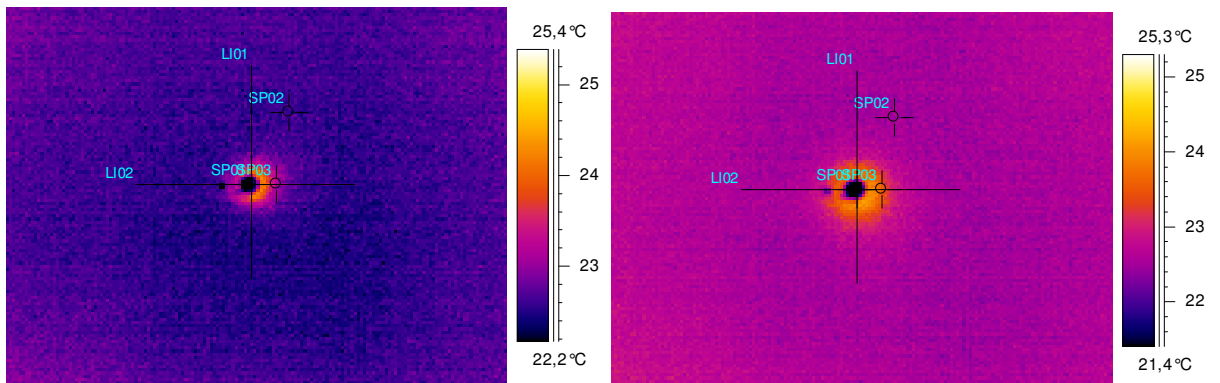
Graf 9. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



Graf 10. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku

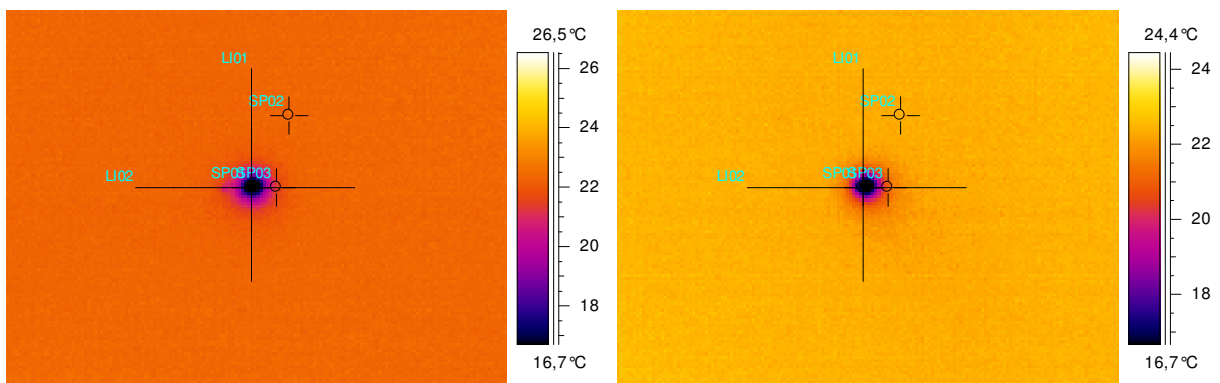


Vzorek č.3 - vlna



Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

Snímek IV. – čas 00:15

Vlna se řadí mezi přírodní materiály, je též hydrofilní. Ze snímku je však patrné, že šíření kapaliny je mnohem pomalejší, než u vzorů č.1 a 2. Je to způsobeno strukturou vlněného vlákna. Vlněná tkanina má oproti předchozím materiálům na svém povrchu vyčnívající vlákna, které zpomalují postup kapaliny do vnitřní struktury materiálu.

Vlna je jedním z vláken, jimiž se třením může budít elektřina. Triboelektrický efekt je způsoben piezoelektrickou povahou šupinek vlny.

Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) byla v počátku 23,1 °C, poté klesla na 21,1 °C (po 15 minutách působení kapaliny na

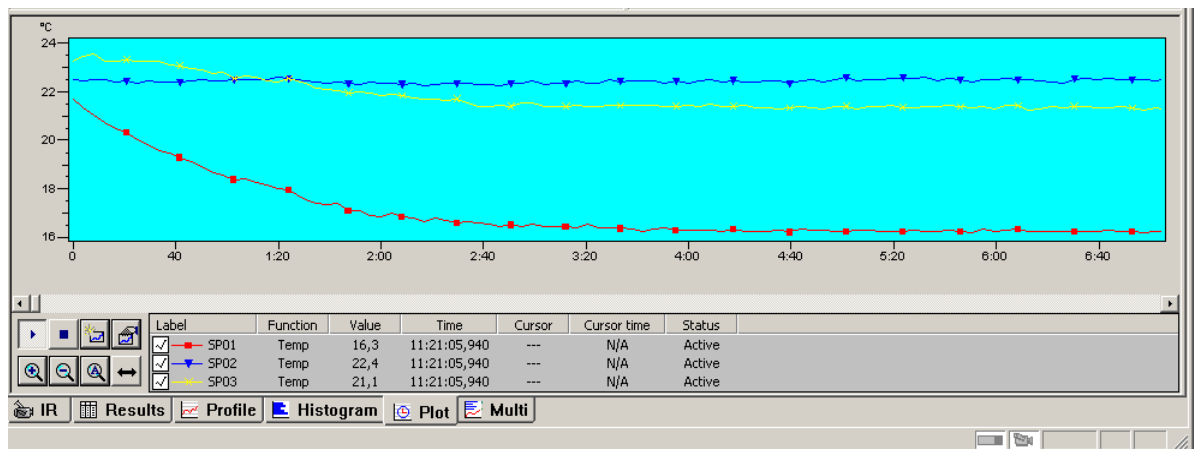
vzorek). Tato konečná teplota je mnohem vyšší, než u předchozích materiálů, protože vlna díky své struktuře „hřeje“ i po navlhčení.

Zajímavé také je, že v bodě SP03 po 5 minutách působení kapaliny na vzorek došlo ke zvýšení teploty o 0,4 °C. Tento jev se projevil ze zkoumaných vzorků pouze u vlny, hedvábí a směsi vlna/polyester.

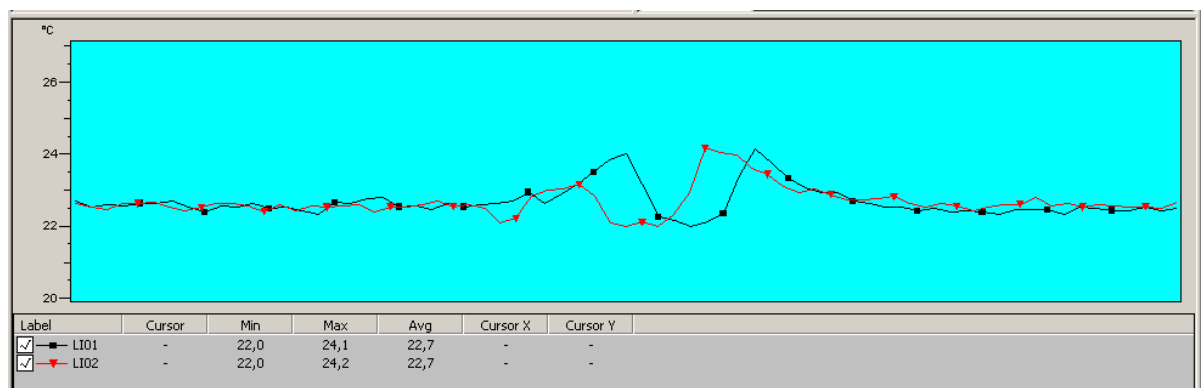
Tabulka č. 5

Vlna	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	22,0 °C	21,1 °C	16,3 °C	16,3 °C
SP02	22,6 °C	22,5 °C	22,4 °C	22,4 °C
SP03	23,1 °C	23,5 °C	21,5 °C	21,1 °C
L1 (x)	22,7 °C	22,7 °C	21,5 °C	21,5 °C
L2 (y)	22,7 °C	22,6 °C	21,4 °C	21,5 °C

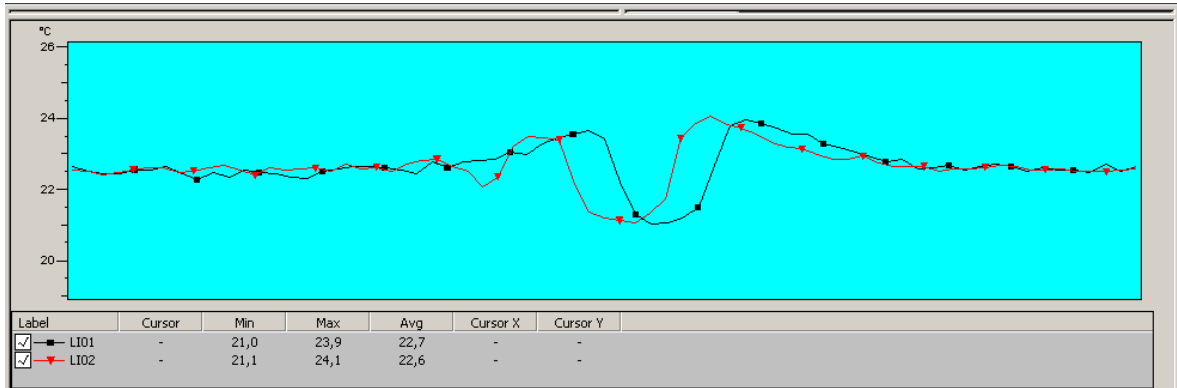
Graf 11. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



Graf 12. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku

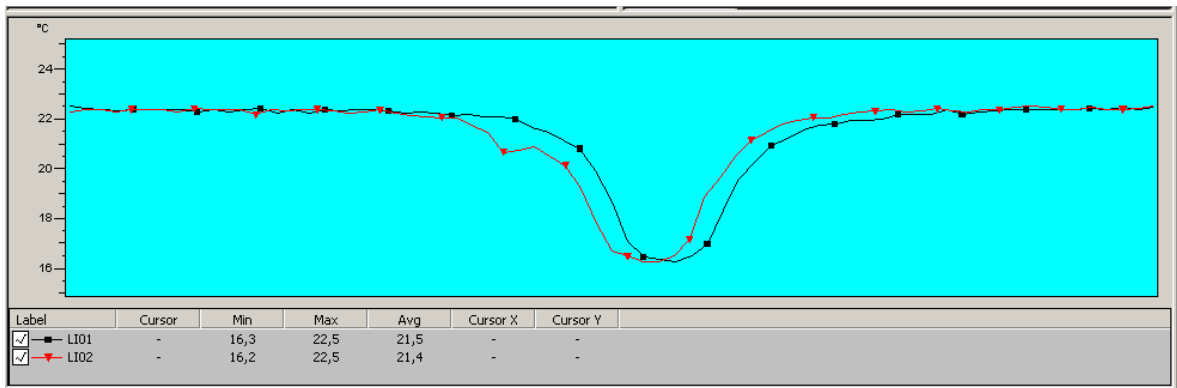


Graf 13. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku

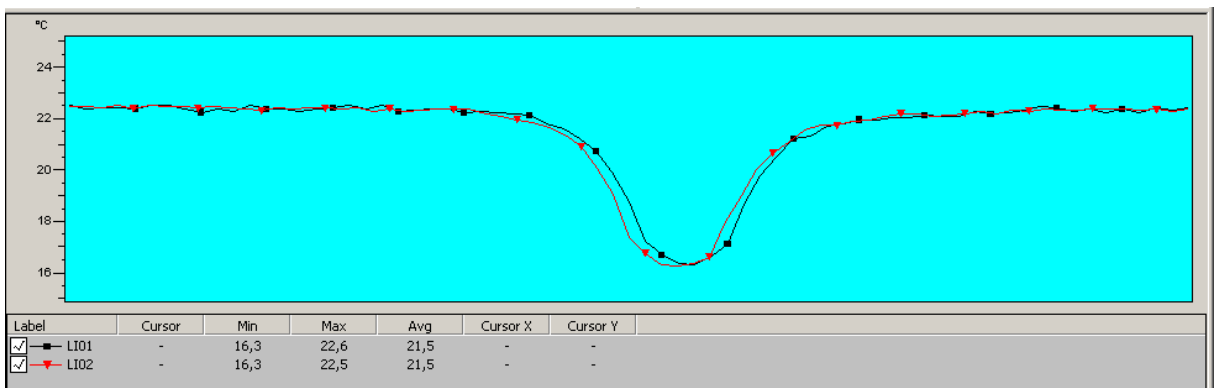


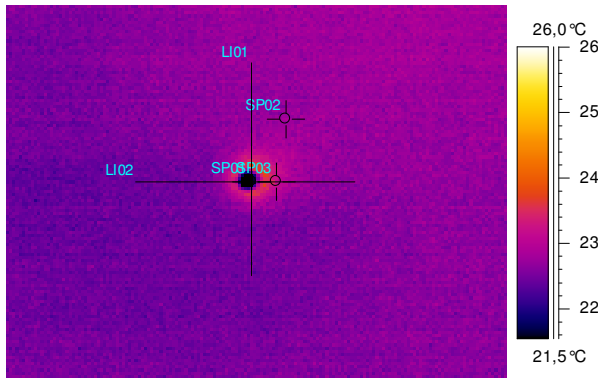
..

Graf 14. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku

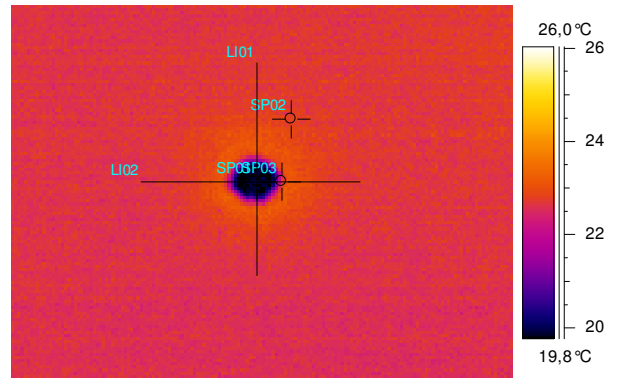


Graf 15. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku

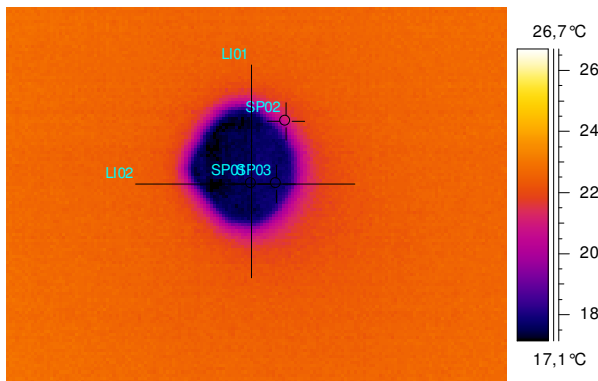


Vzorek č.4 – len

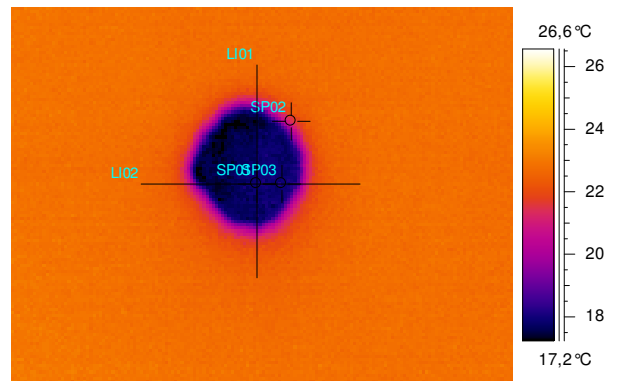
Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00



Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10



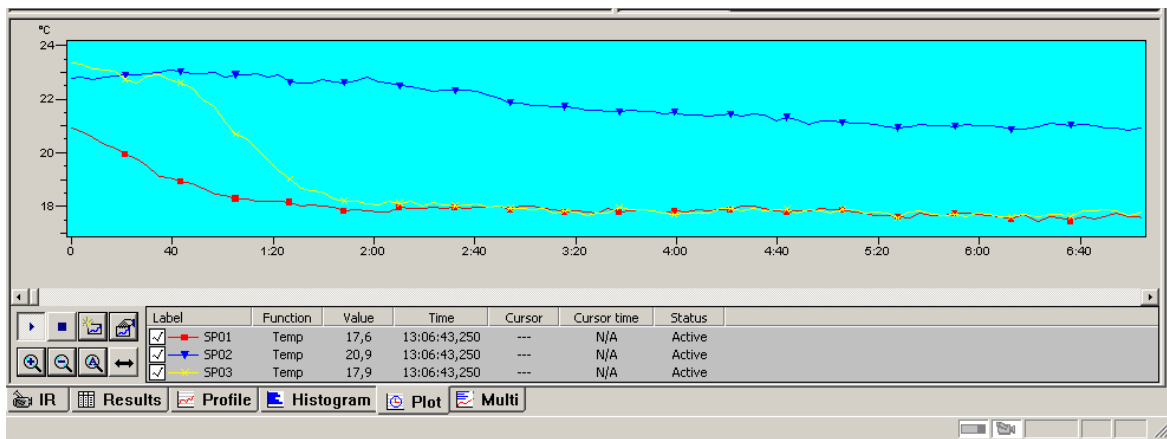
Snímek IV. – čas 00.15

Len je přírodní lýkové vlákno, je složen z technických vláken (15 – 30 elementárních vláken, která jsou spojena pektinem). Len je velmi navlhavá textilie. Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) byla 23,2 °C, poté se teplota snížila na hodnotu 17,9 °C (po 15 minutách působení kapaliny na vzorek). Teplota v bodě SP03 je v momentu aplikace kapaliny na vzorek srovnatelná s teplotou předchozího vzorku (vlna), liší se však v konečné teplotě, která je o 3,2 °C nižší, než u vlny.

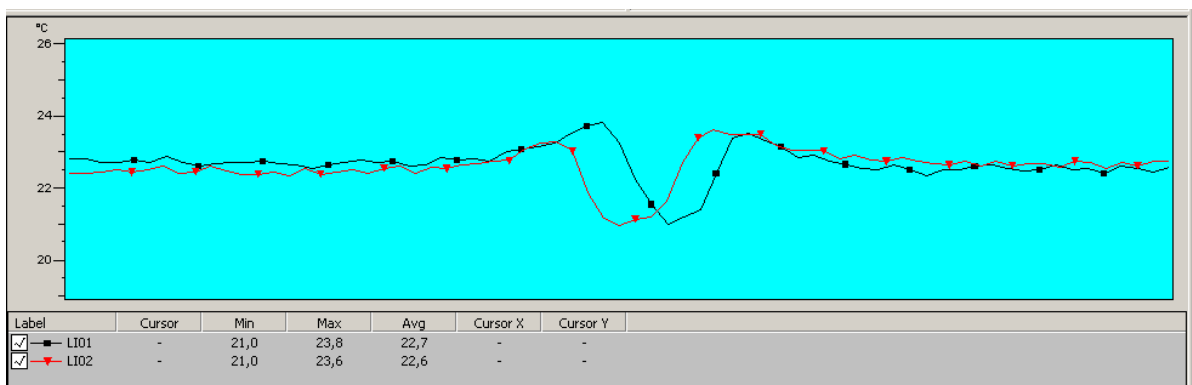
Tabulka č. 6

Len	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	21,2 °C	20,0 °C	18,0 °C	17,6 °C
SP02	22,9 °C	22,9 °C	21,5 °C	20,9 °C
SP03	23,2 °C	22,7 °C	17,9 °C	17,9 °C
L1 (x)	22,7 °C	22,3 °C	19,6 °C	19,5 °C
L2 (y)	22,6 °C	22,2 °C	20,1 °C	19,9 °C

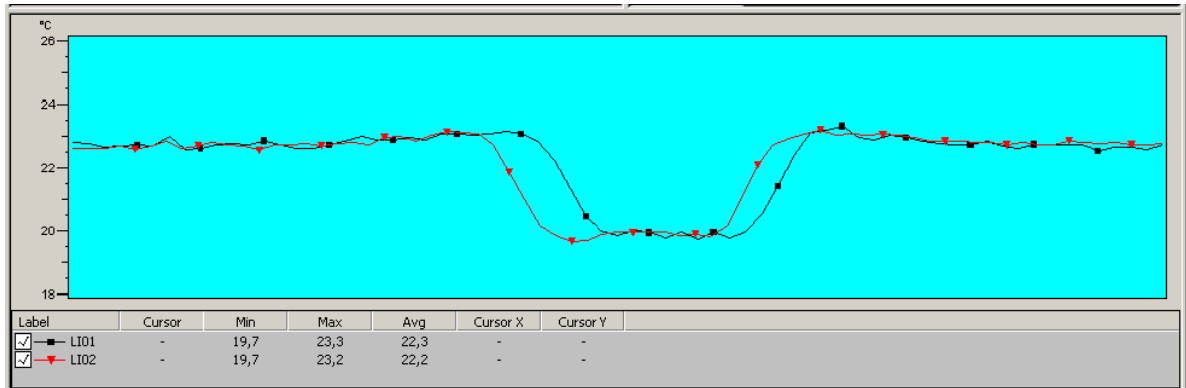
Graf 16. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



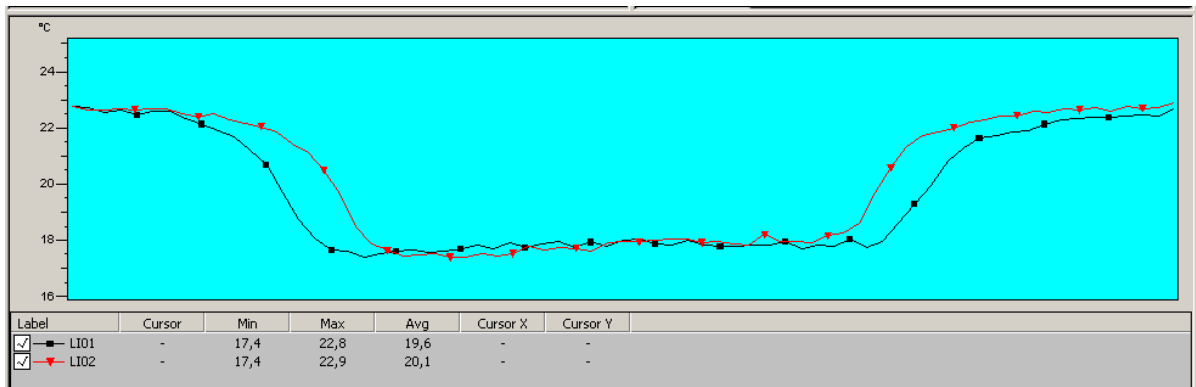
Graf 17. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



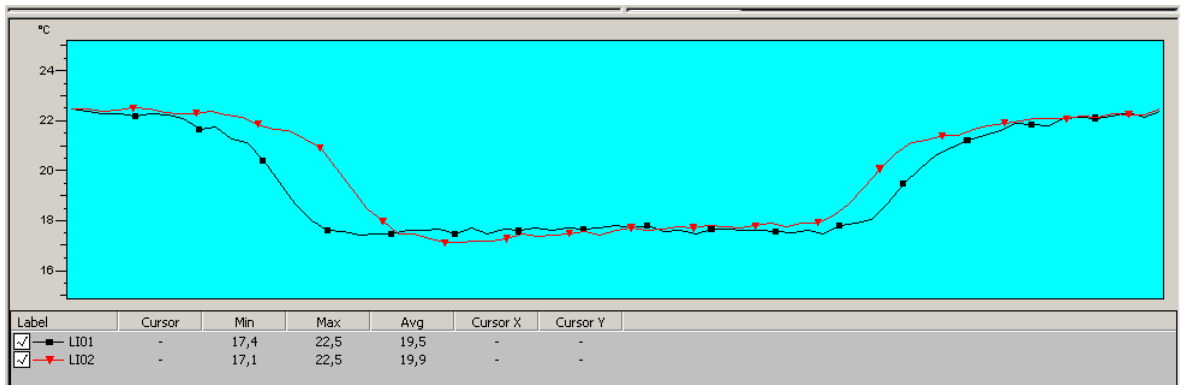
Graf 18. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku

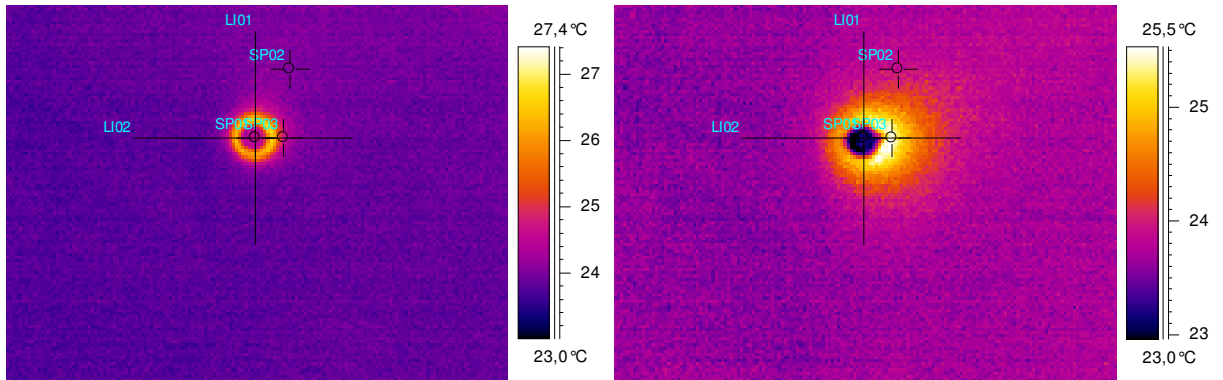


Graf 19. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



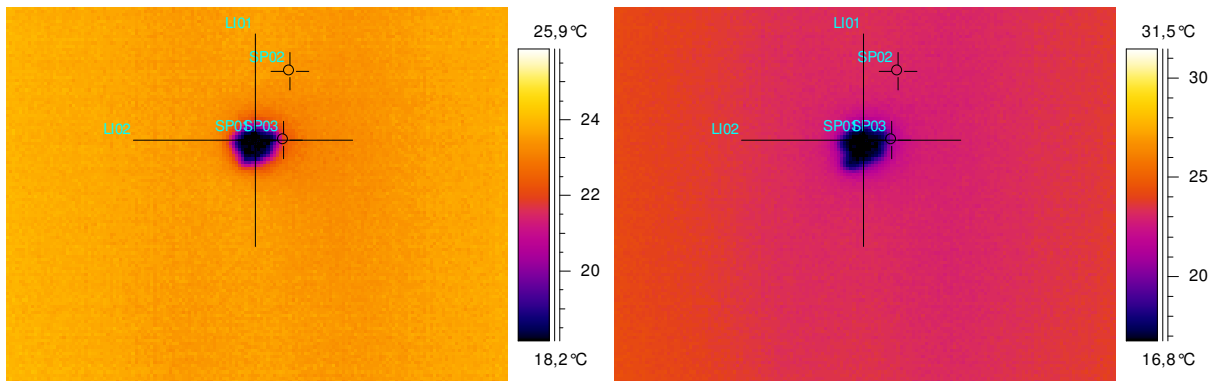
Graf 20. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



Vzorek č. 5 – hedvábí

Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

Snímek IV. – čas 00:15

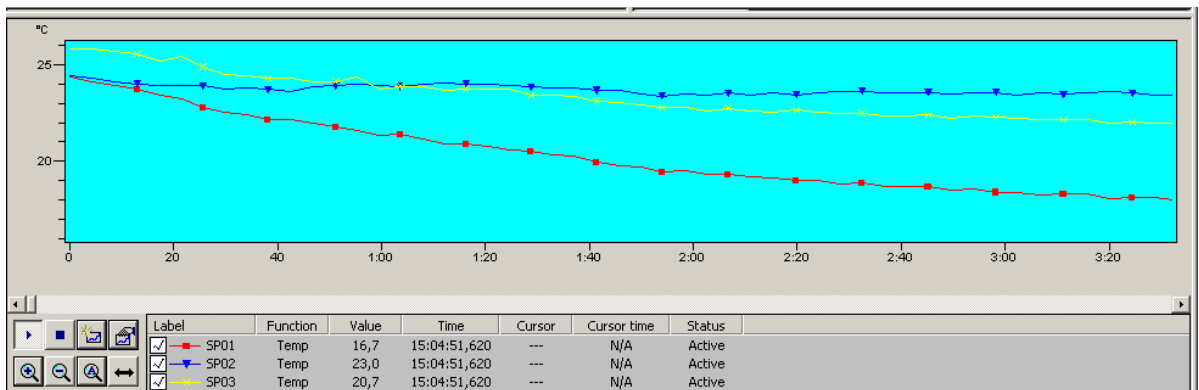
Hedvábí je přírodní vlákno, které vytváří housenky nočních motýlů (bourec morušový). Vlákno přírodního hedvábí je složeno z jemných protáhlých fibril, které k sobě těsně přiléhají bez vzdušných kanálek. Jednotlivé fibrily jsou fixovány pojivem sericin, který se řadí mezi proteiny.

Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) byla 24,7 °C, po 15 minutách působení kapaliny na vzorek se teplota snížila až na hodnotu 20,6 °C. Měření v bodě SP03 po 5 minutách však, stejně jako u vlny a směsi vlna/polyester ukázalo nárůst teploty a to o 0,6 °C.

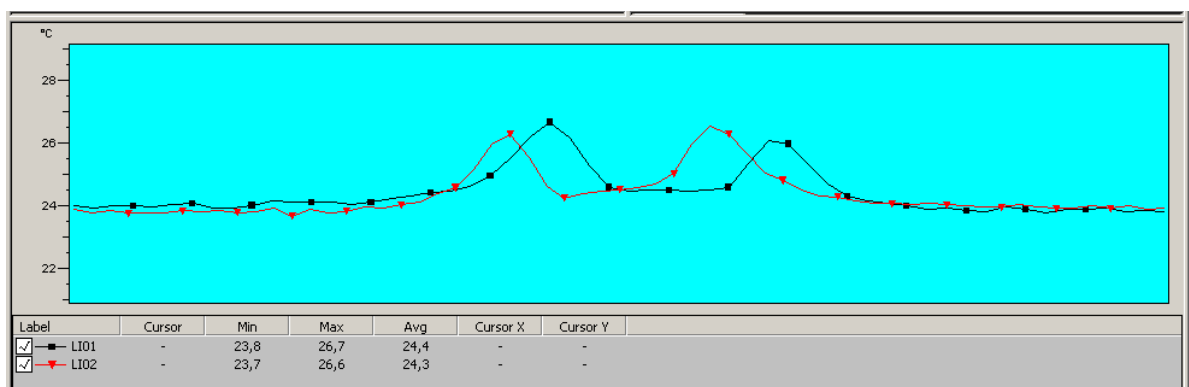
Tabulka č. 7

Hedvábí	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	24,5 °C	23,2 °C	18,1 °C	16,8 °C
SP02	24,0 °C	24,1 °C	23,4 °C	23,0 °C
SP03	24,7 °C	25,3 °C	21,8 °C	20,6 °C
L1 (x)	24,3 °C	24 °C	22,5 °C	21,8 °C
L2 (y)	24,2 °C	24 °C	22,2 °C	21,6 °C

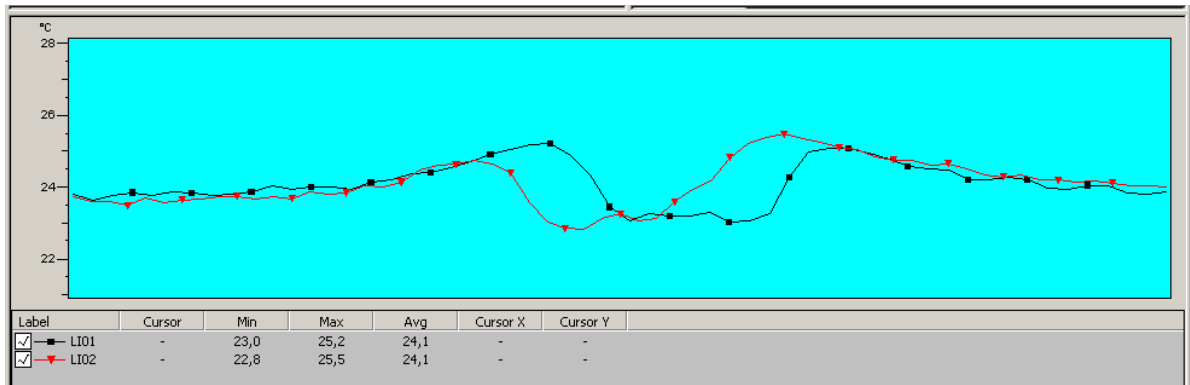
Graf 21. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



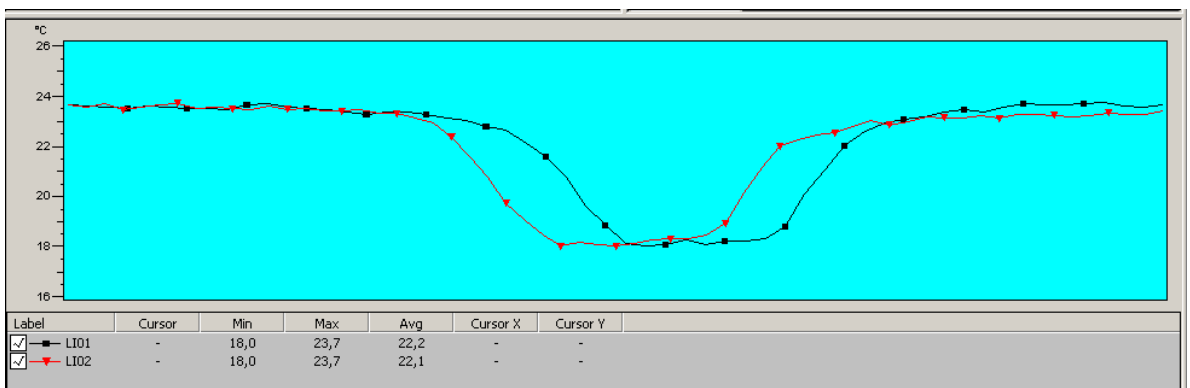
Graf 22. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



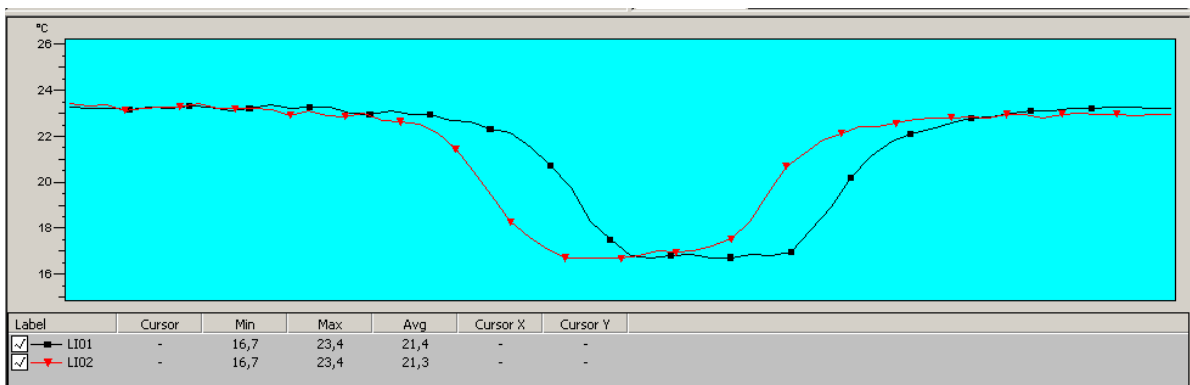
Graf 23. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku

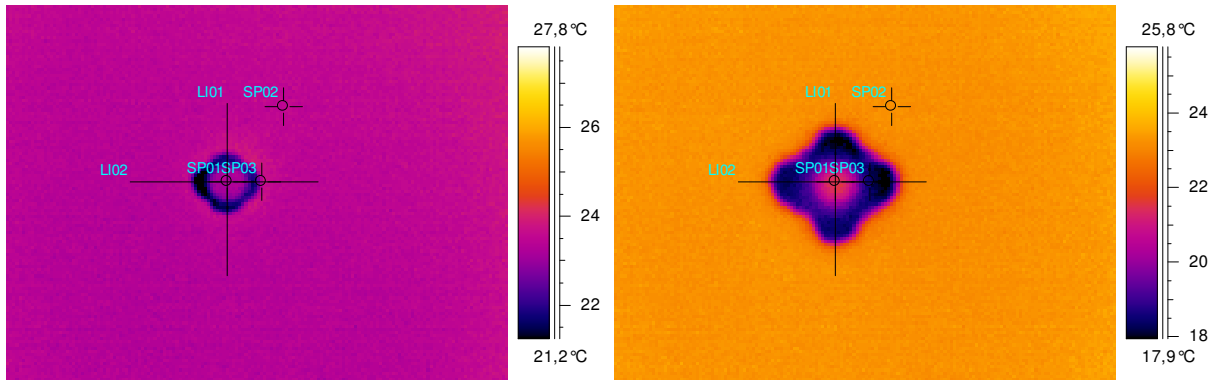


Graf 24. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



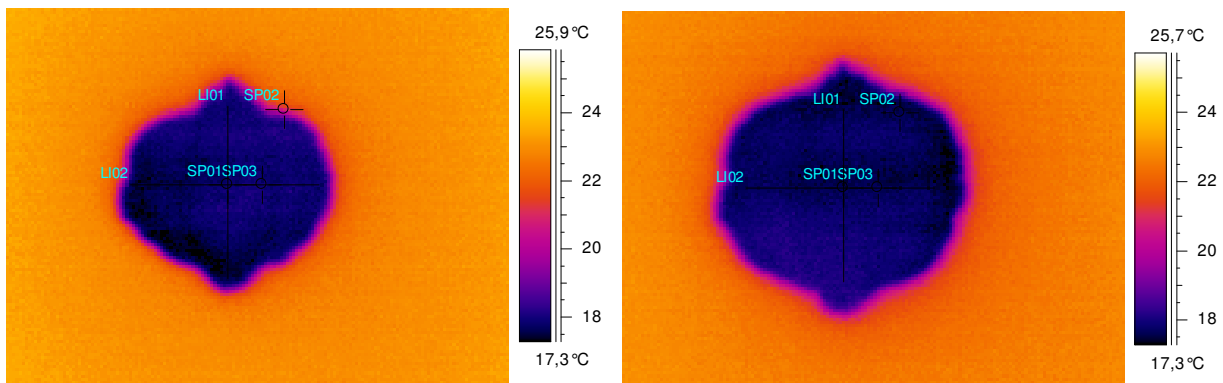
Graf 25. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



Vzorek č.6 – polyamid 4

Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

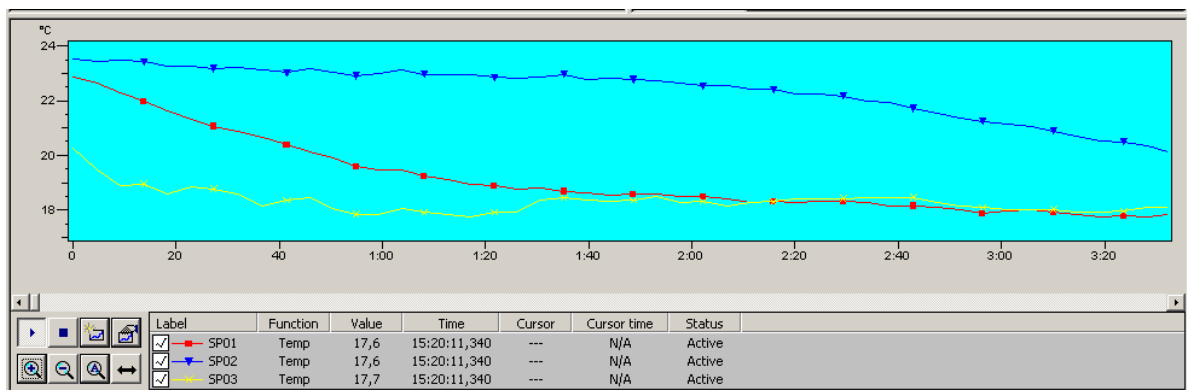
Snímek IV. – čas 00:15

Polyamid 4 je syntetické vlákno, má výbornou navlhavost blízkou bavlně. Teplota u tohoto vzorku byla v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) 23,4 °C, po 15 minutách se tato teplota ustálila na 17,7 °C. Tyto teploty jsou podobné teplotám vzorku č.4 (len), ale šíření kapaliny v textilií, jak je ze snímku vidět, je podstatně rychlejší, než u lněného materiálu. Zde je jasně dokázáno, že šíření kapaliny u syntetických materiálů (hydrofilních) je rychlejší než u vláken přírodních.

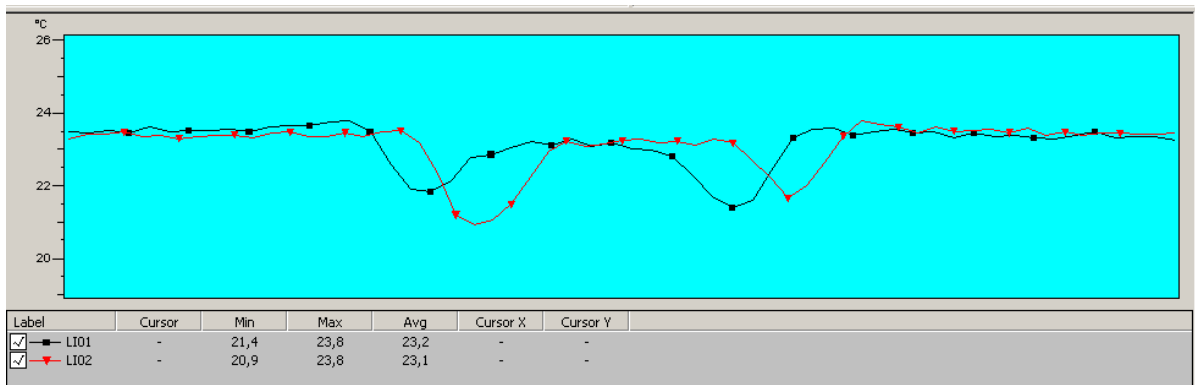
Tabulka č. 8

Polyamid 4	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	23,3 °C	21,6 °C	17,9 °C	17,6 °C
SP02	23,5 °C	23,3 °C	20,9 °C	17,6 °C
SP03	23,4 °C	18,6 °C	18,0 °C	17,7 °C
L1 (x)	23,2 °C	20,7 °C	17,8 °C	17,8 °C
L2 (y)	23,1 °C	20,6 °C	17,8 °C	17,6 °C

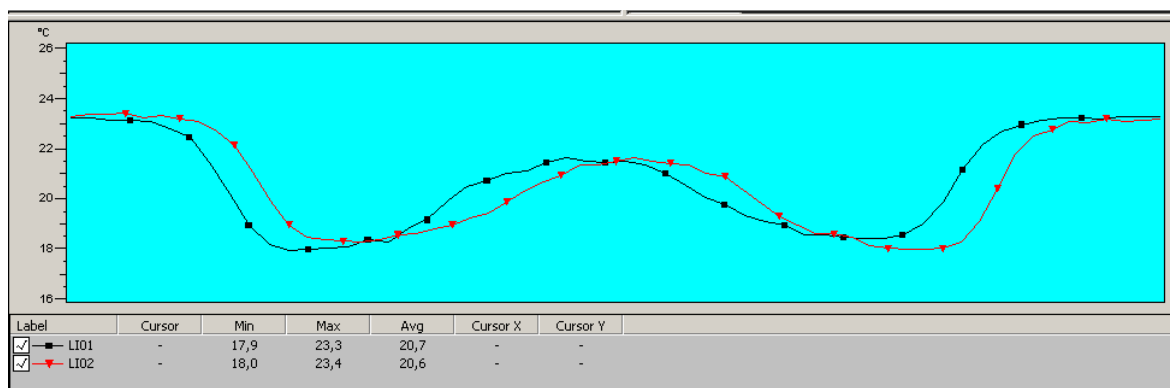
Graf 26. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



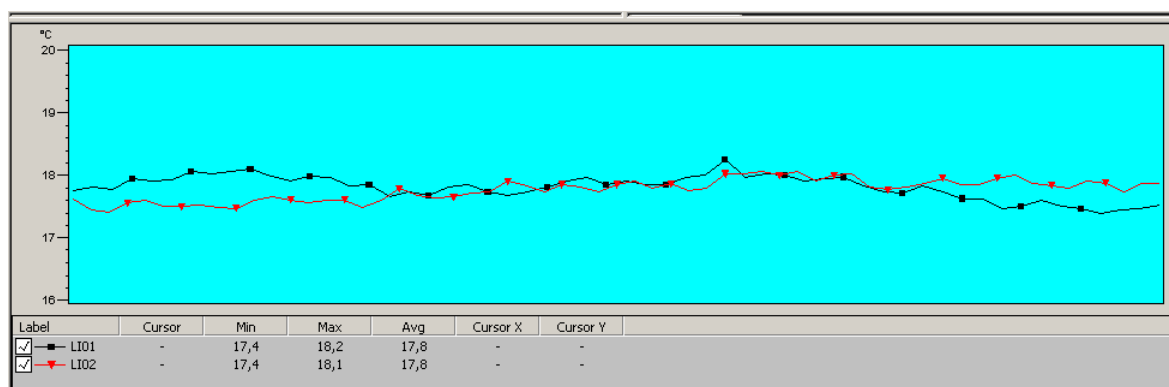
Graf 27. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



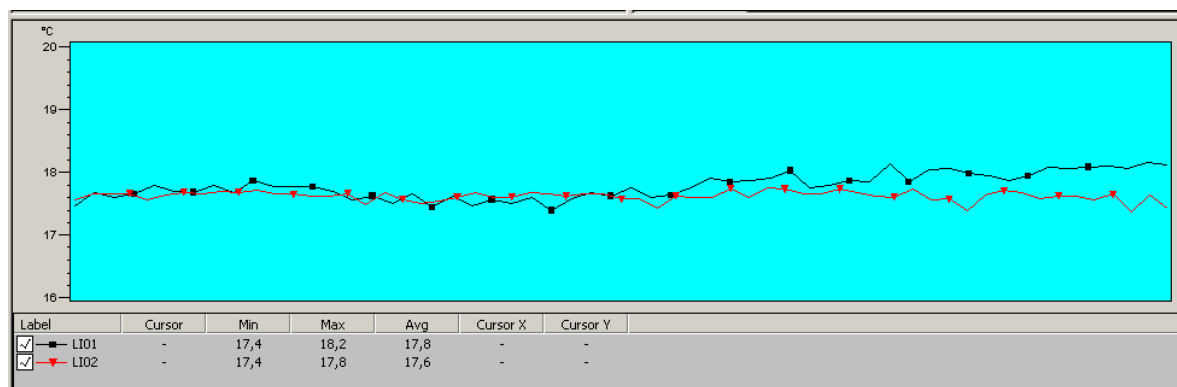
Graf 28. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku



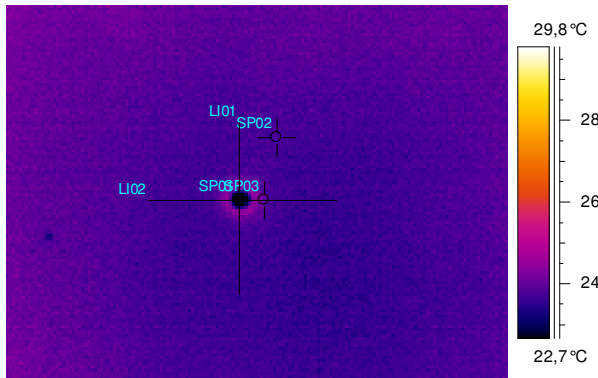
Graf 29. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



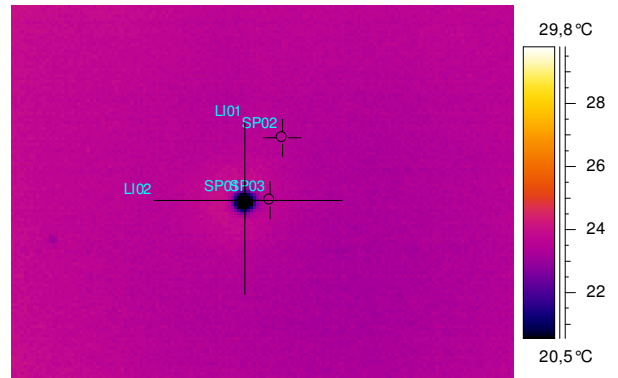
Graf 30. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



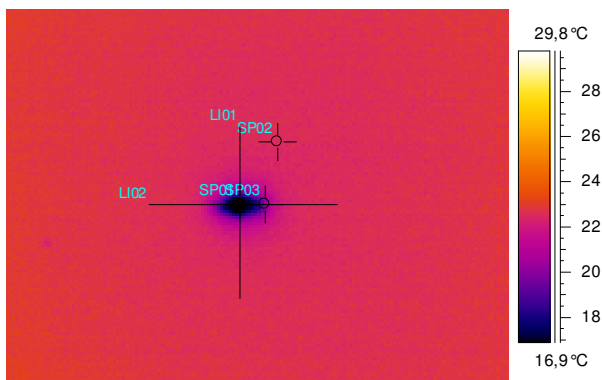
Vzorek č.7 – směsový materiál bavlna/len



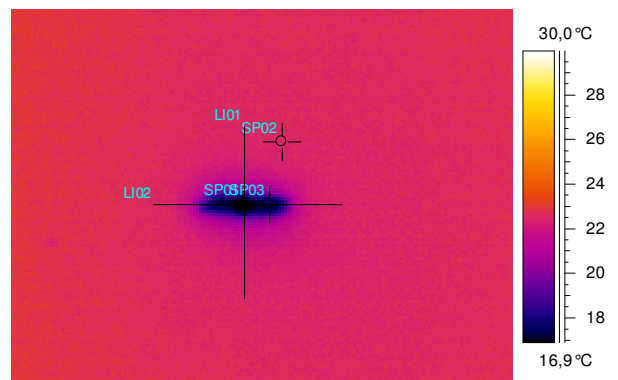
Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00



Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10



Snímek IV. – čas 00:15

Jak jste si mohli povšimnout, u předchozích vzorků (od č.1 – č.6) je vždy 100% zastoupení jedné komponenty. Následující snímky popisují šíření kapaliny a s tím spojené změny teplot u směsových materiálů. U tohoto směsového materiálu je zastoupení komponent následující – 63% CO a 37% LI. V osnově bylo větší zastoupení bavlněných vláken, v útku spíše převládala vlákna lněná.

Kapalina se v tomto případě šířila velmi pomalu, šíření probíhalo ve prospěch osnovy (bavlněných vláken).

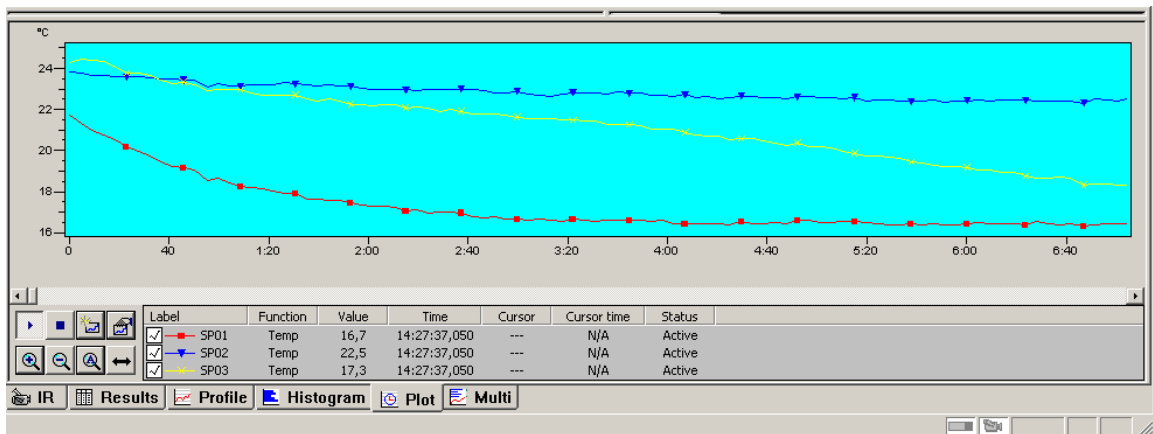
Teplota při aplikaci kapky na vzorek byla v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou) 23,9 °C, poté klesla až na 17,3 °C (po 15 minutách působení kapaliny na vzorek).

Naměřené hodnoty se v momentu aplikace a po 5 minutách působení kapaliny na vzorek blíží hodnotám naměřeným u bavlny, po delším působení kapaliny (tedy po 10 a 15 minutách) se však naměřené hodnoty více podobají hodnotám zjištěným u lnu.

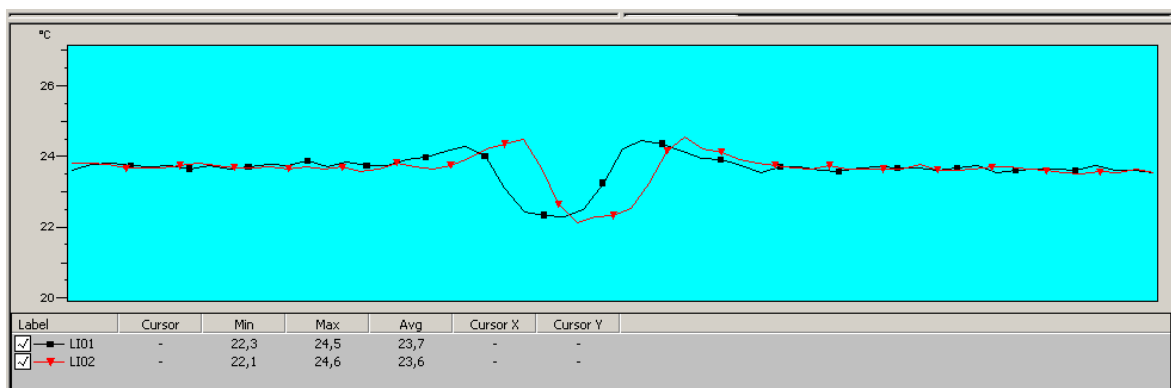
Tabulka č. 9

Bavlna/len	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	22,3 °C	20,0 °C	16,5 °C	16,7 °C
SP02	23,7 °C	23,6 °C	22,6 °C	22,5 °C
SP03	23,9 °C	23,8 °C	19,9 °C	17,3 °C
L1 (x)	23,7 °C	23,2 °C	21,5 °C	21,4 °C
L2 (y)	23,6 °C	23,2 °C	21,1 °C	19,9 °C

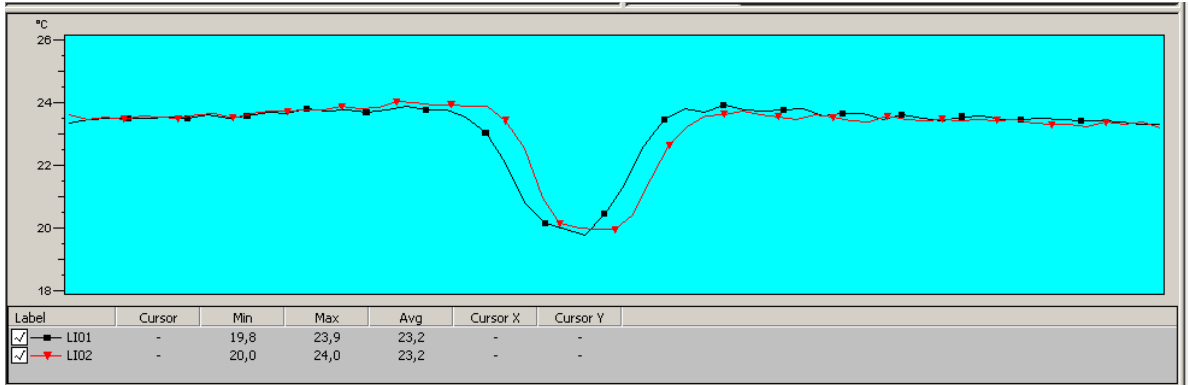
Graf 31. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



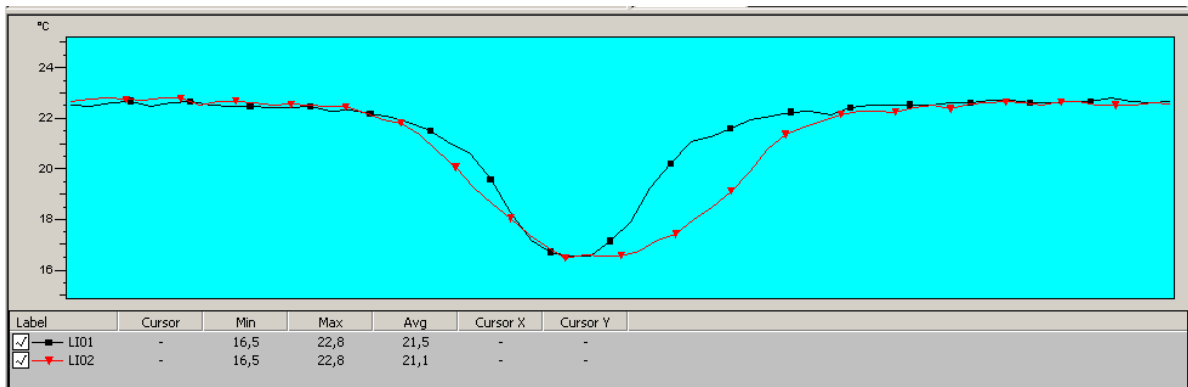
Graf 32. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



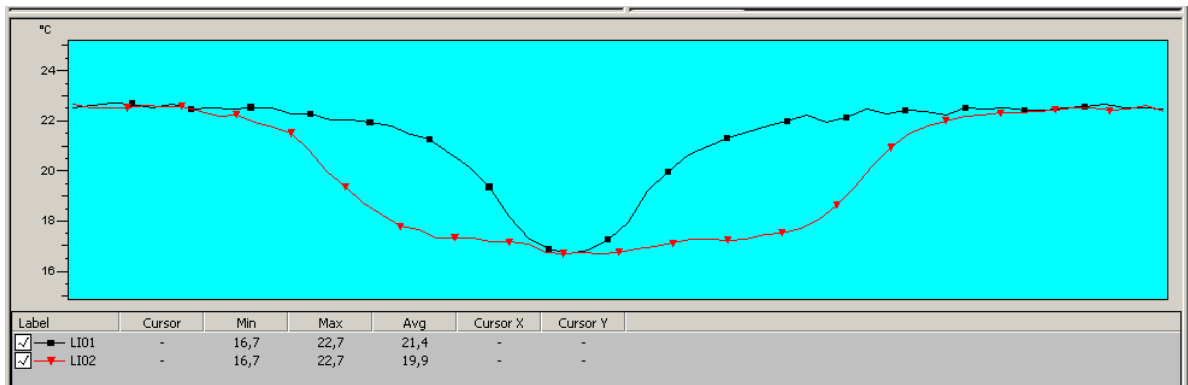
Graf 33. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku



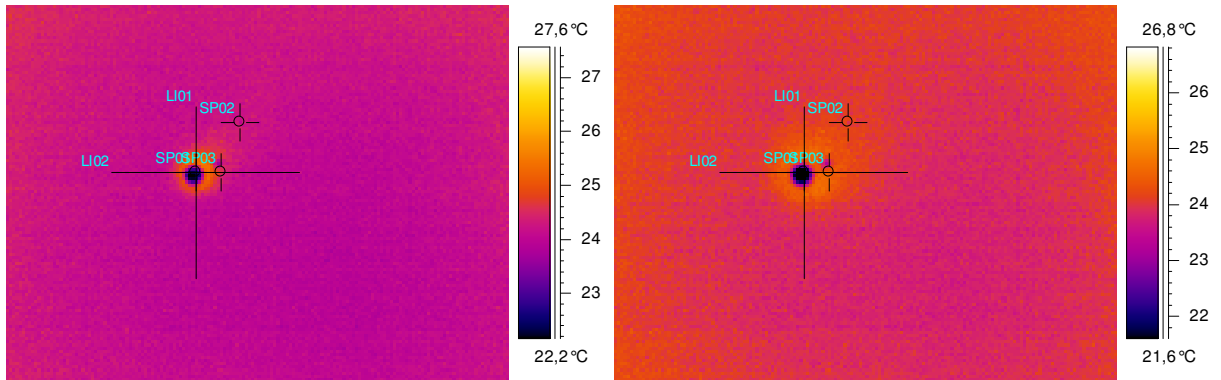
Graf 34. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



Graf 35. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku

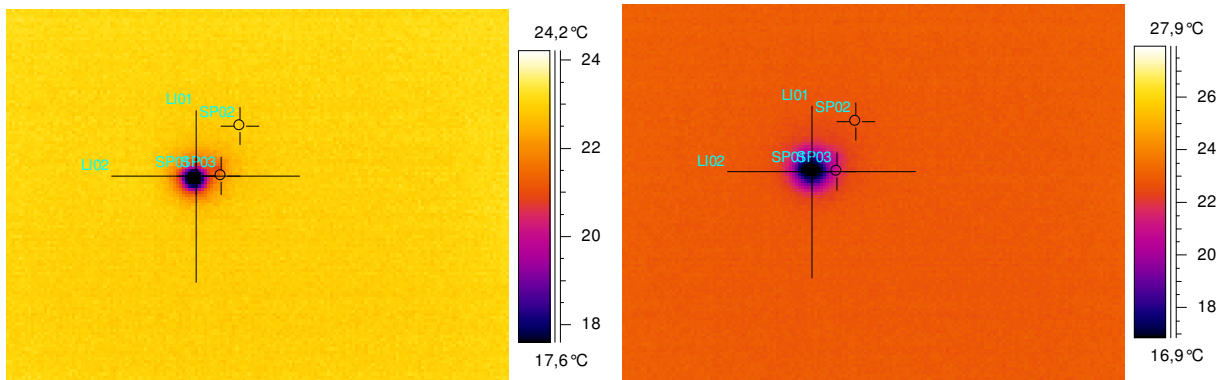


Vzorek č. 8 – směsový materiál vlna/polyamid



Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

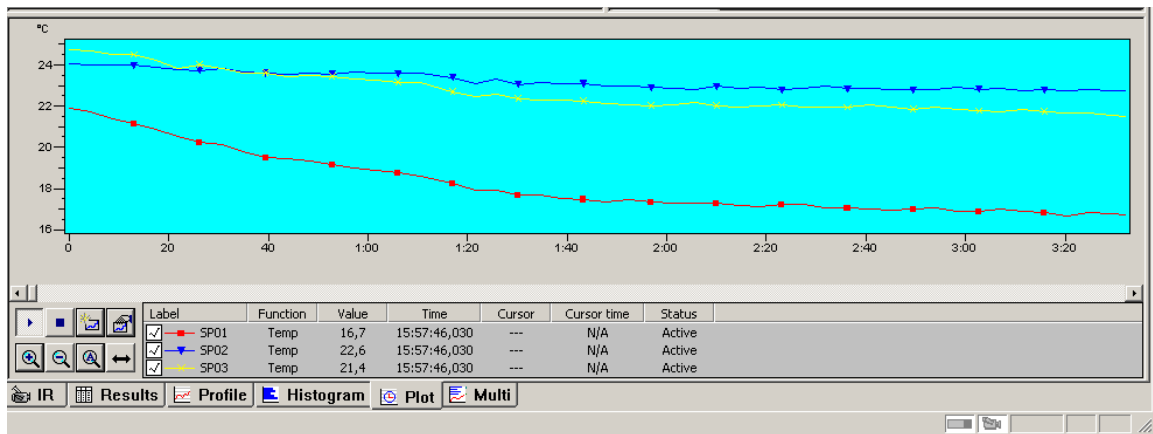
Snímek IV. – čas 00:15

Tento směsový materiál je složen z přírodních a syntetických vláken. Jejich procentuální zastoupení je 70% vlna a 30% polyamid. Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou), těsně po jejím kápnutí, byla 24,6 °C, po 15 minutách byla naměřena hodnota 21,4 °C. V tomto případě je konečná teplota velmi podobná teplotě 100% vlny (21,1 °C). Tedy můžeme konstatovat, že tento směsný materiál si zachovává vlastnosti vlny i přes téměř třetinový podíl syntetických vláken. V časovém intervalu 5 minut od aplikace kapaliny na vzorek sice nedošlo ke zvýšení teploty tak, jako tomu bylo u 100% vlny, nicméně po tuto dobu se teplota téměř nezměnila (pokles pouze o 0,1°C).

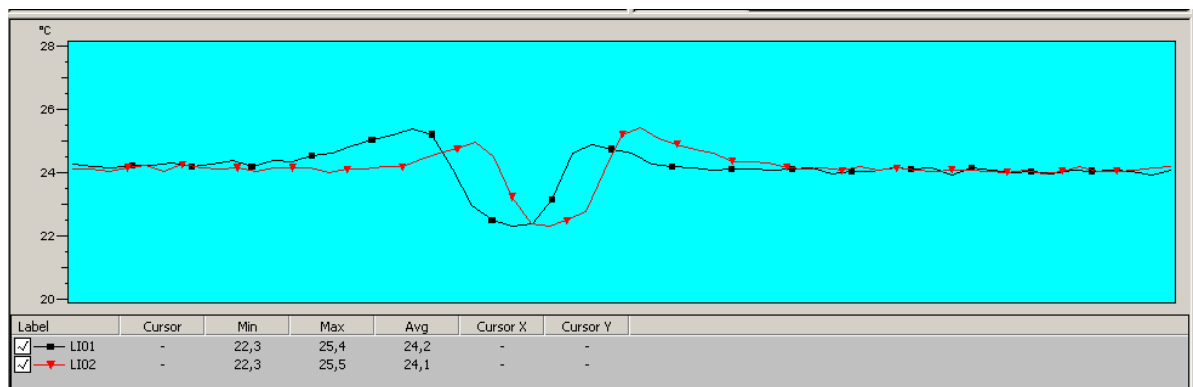
Tabulka č. 10

Vlna/polyamid	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	22,5 °C	21,1 °C	17,2 °C	16,7 °C
SP02	24,1 °C	24,0 °C	22,9 °C	22,6 °C
SP03	24,6 °C	24,5 °C	22,0 °C	21,4 °C
L1 (x)	24,2 °C	23,9 °C	22,0 °C	21,6 °C
L2 (y)	24,1 °C	23,8 °C	22,0 °C	21,6 °C

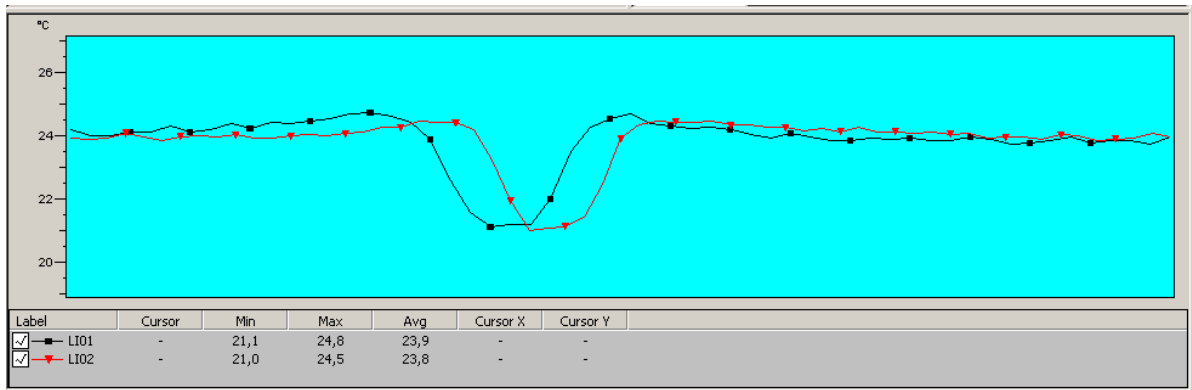
Graf 36. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



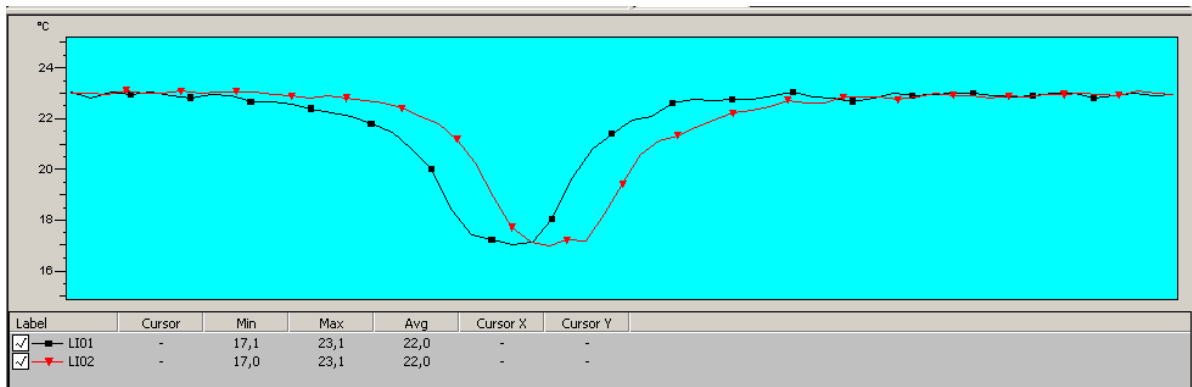
Graf 37. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



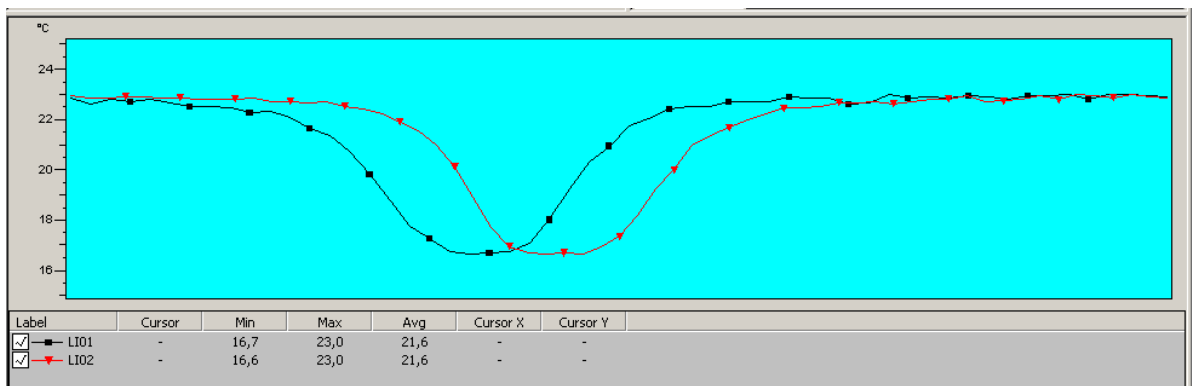
Graf 38. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku

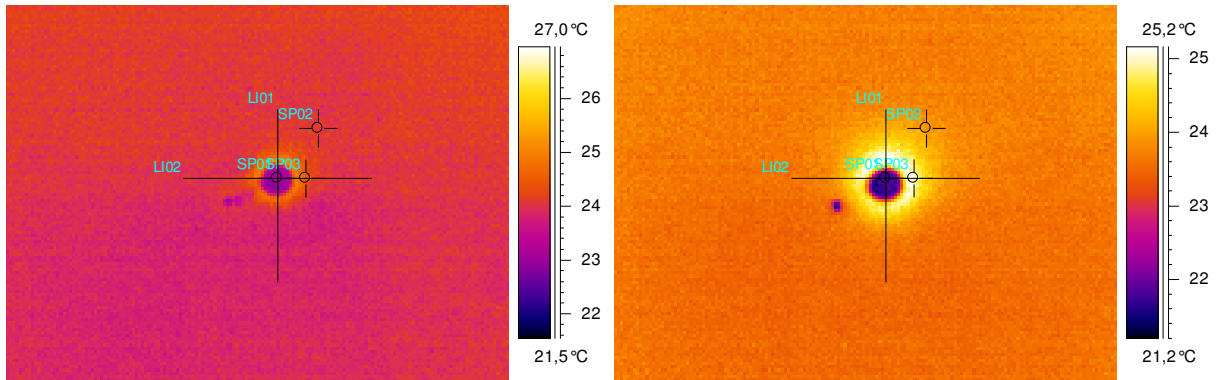


Graf 39. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



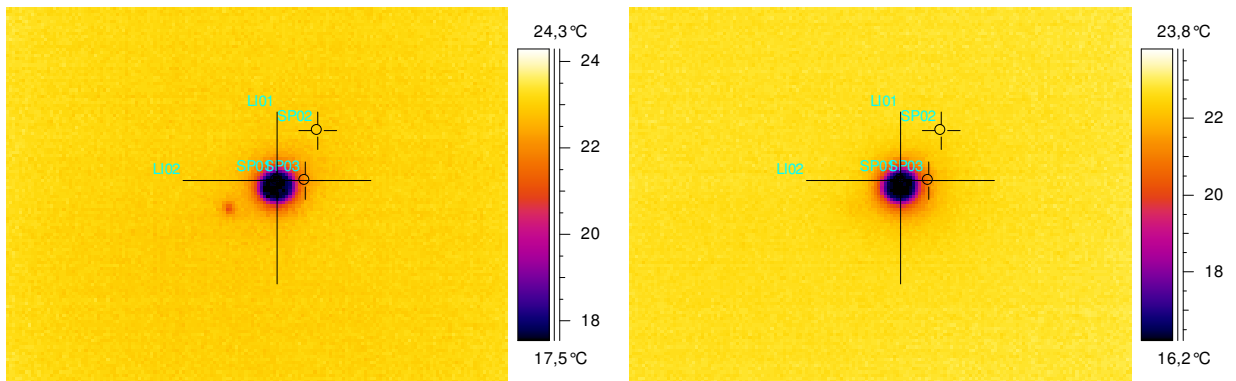
Graf 40. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



Vzorek č.9 – směsový materiál vlna/polyester

Aplikace kapky, snímek I. – čas 00:00

Snímek II. – čas 00:05



Snímek III. – čas 00:10

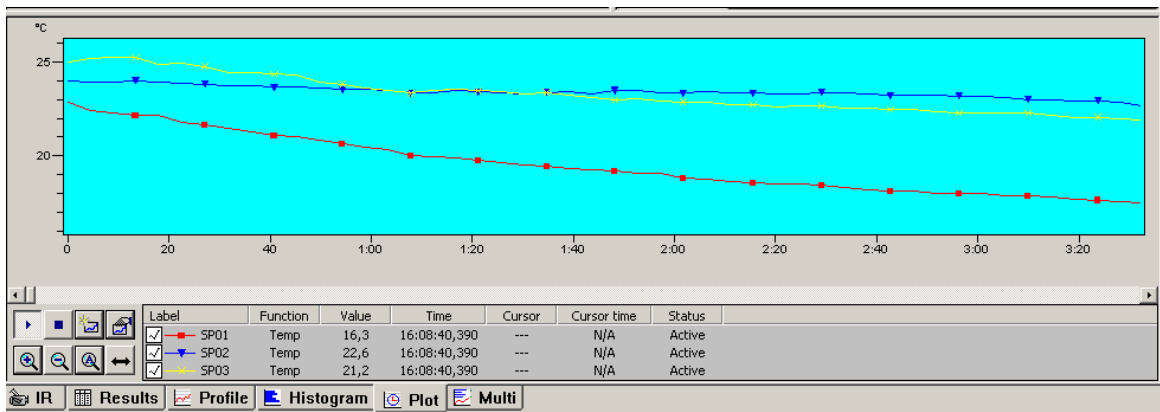
Snímek IV. – čas 00:15

Tento směsový materiál je opět složen z přírodních a syntetických vláken. Jejich procentuální zastoupení je 80% vlna a 20% polyester. Teplota v bodě SP03 (tedy ve středu skvrny vytvořené aplikovanou kapalinou), těsně po jejím kápnutí, byla 24,3 °C, po 15 minutách byla naměřena hodnota 21,2 °C. V tomto případě je teplota na počátku a na konci velmi podobná s teplotě směsi vlna/polyamid. Je zde ale rozdíl u druhého snímku (po 5 minutách působení kapaliny na vzorek), kde došlo k většímu navýšení teploty v bodě SP03. Je to zřejmě způsobeno polyesterovými vlákny, které jsou velmi málo nasákavé. Kapka se zde snaží zaujmout větší povrch → vzniká zde větší teplo.

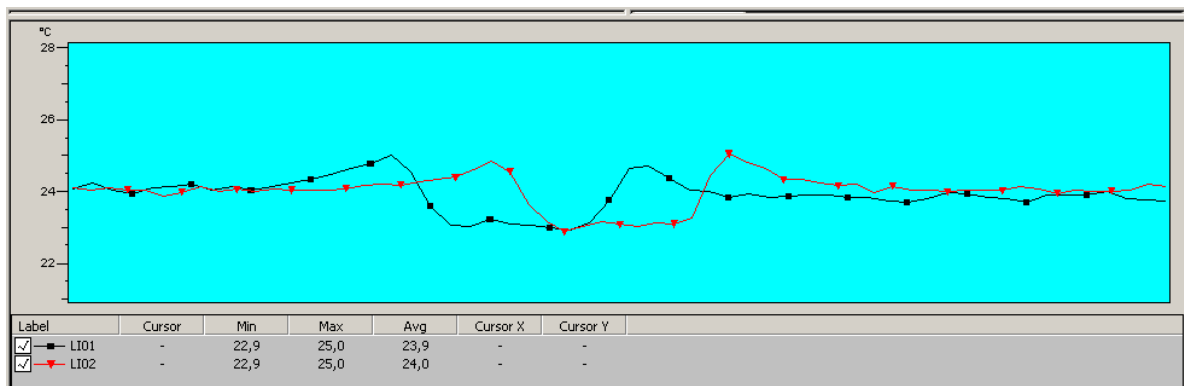
Tabulka č. 11

Vlna/polyester	I. snímek v čase 00:00	II. snímek v čase 00:05	III. snímek v čase 00:10	IV. snímek v čase 00:15
SP01	23,1 °C	21,8 °C	17,7 °C	16,3 °C
SP02	24,1 °C	23,9 °C	23,0 °C	22,6 °C
SP03	24,3 °C	24,9 °C	22,1 °C	21,2 °C
L1 (x)	23,9 °C	23,7 °C	21,7 °C	21,40 °C
L2 (y)	24,0 °C	23,8 °C	21,8 °C	21,2 °C

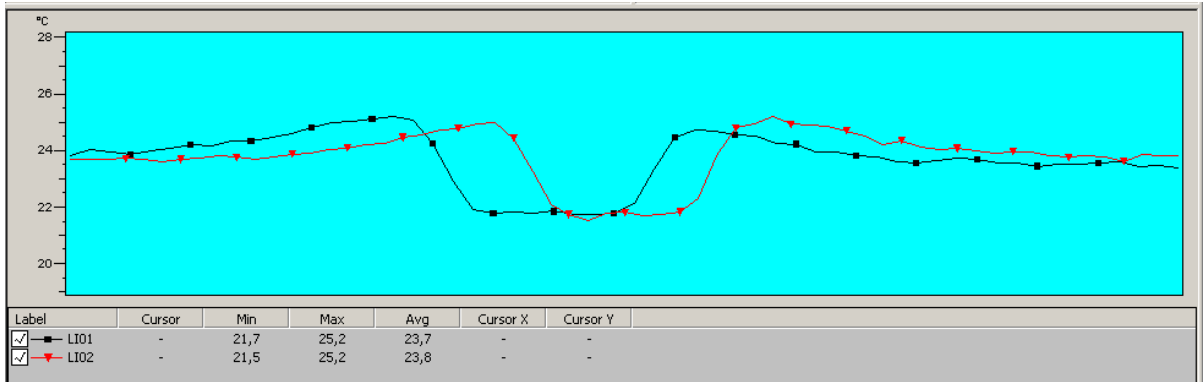
Graf 41. znázorňující průběh teplot v jednotlivých bodech (SP01, SP02, SP03)



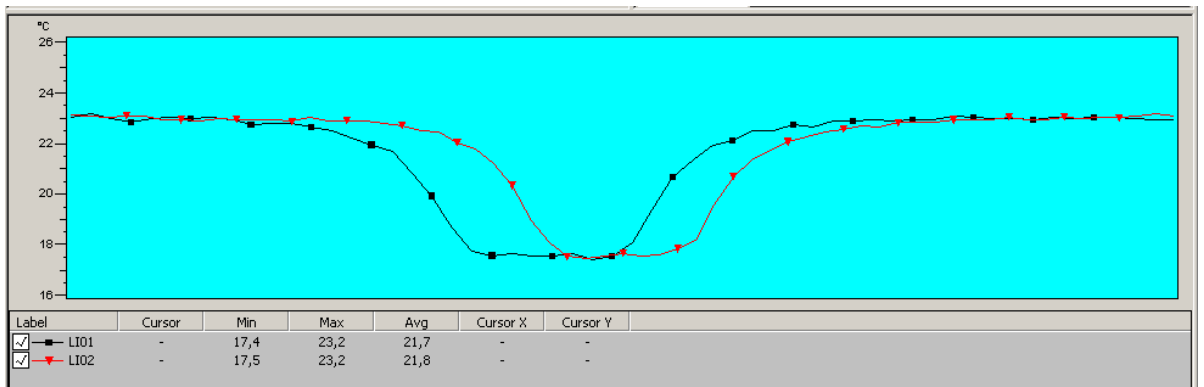
Graf 42. znázorňující průběh teplot v ose x,y I. snímku



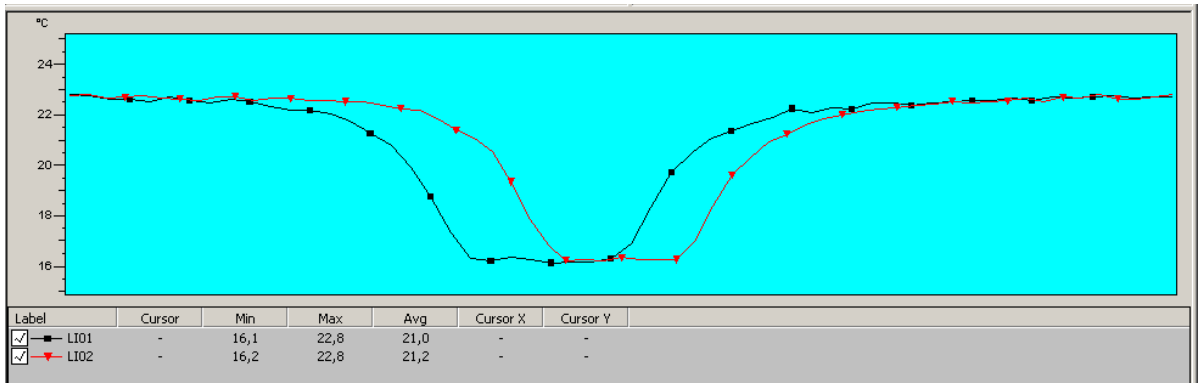
Graf 43. znázorňující průběh teplot v ose x, y II. snímku



Graf 44. znázorňující průběh teplot v ose x, y III. snímku



Graf 45. znázorňující průběh teplot v ose x, y IV. snímku



11 Závěr

Po důsledném nastudování teoretické základny a po provedení experimentu se zde pokusím objasnit některá zjištění, jevy a souvislosti, se kterými jsem se v průběhu prováděných měření setkala.

Jak již bylo konstatováno výše, prováděný experiment zkoumal celkem 9 vzorků textilií od acetátu, který se řadí mezi chemická vlákna, přes přírodní materiály, jako jsou bavlna, len, vlna, hedvábí, dále syntetický polyamid až po směsi typu bavlna/len, vlna/polyamid a vlna/polyester.

Metoda hodnocení nasákavosti textilie pomocí termovize se ukázala jako velmi vhodná pro pochopení některých zákonitostí souvisejících s jevy probíhajícími při smáčení textilií.

Obecně lze říci, že zkoumané materiály lze rozdělit podle smáčivosti na materiály, které se smáčí velmi dobře (tyto označujeme jako *hydrofilní*, tzn., že jsou schopny vázat a transportovat vodu) až po ty, které se téměř nesmáčejí (materiály *hydrofobní*, tj. ty, které nemohou vázat vodu specifickými vazbami – voda se u svazků vláken šíří kapilárními silami). K těm velmi dobře smáčivým se řadí vesměs přírodní materiály, zejména pak bavlna, druhým extrémem je pak téměř nesmáčivý polyester. Příčinou smáčivosti či nesmáčivosti jsou mezimolekulární síly, které působí na rozhraní vody a materiálu. Tyto síly je však možno ovlivnit určitou povrchovou úpravou, například impregnací.

U materiálu, který kapalina smáčí, se rozhodující měrou uplatňuje odpařování kapaliny z povrchu textilie. Kapilární jevy způsobí, že kapalina je textilií nasávána. Současně s jejím nasáváním dochází k vypařování kapaliny z textilie do okolního prostředí. Šíření kapaliny v textilií se zastaví v okamžiku, kdy se oba mechanismy dostanou do rovnováhy. V této rovnováze je množství kapaliny nasáté textilií za jednotku času rovno množství kapaliny vypařené za stejnou dobu. Přitom množství kapaliny, které je schopno odpařit se z povrchu textilie, roste především s velikostí tohoto povrchu, dále s teplotou okolního prostředí a s rychlostí jeho proudění a klesá s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. Vypařování kapaliny z textilie je značně ovlivněno také její strukturou. Textilie s větší porézností a hrubším povrchem jsou schopny lépe transportovat kapalinu. Lze dovést, že k dokonalému smáčení vlákna kapalinou dojde tehdy, jestliže celková povrchová energie W vnějšího povrchu kapaliny

a povrchu styku mezi vláknem a kapalinou připadající na délku vlákna L bude menší než povrchová energie suchého vlákna téže délky.

Tato zde uvedená konstatování jsem se pokusila prověřit v průběhu experimentálního měření. Na všechny připravené vzorky byla aplikována kapalina (destilovaná voda) o stejné teplotě. Termokamera pořídila snímky v momentu aplikace kapaliny na vzorek a dále po 5, 10 a 15 minutách.

Ze zkoumaných vzorků byla nejvyšší teplota *v momentu aplikace* naměřena u bavlny ($24,9^{\circ}\text{C}$) a nejnižší u vlny ($23,1^{\circ}\text{C}$). Vyšší teplota byla zaznamenána taktéž u acetátu ($24,8^{\circ}\text{C}$) a hedvábí ($24,7^{\circ}\text{C}$). Nižší teploty pak u lnu ($23,2^{\circ}\text{C}$) a polyamidu ($23,4^{\circ}\text{C}$). Lze dovozovat, že teplota vzorku v momentu aplikace kapaliny je ovlivňována integrálním (neboli smáčecím) sorpčním teplem, které souvisí úzce se schopností vláken vázat vodu.

Po 5 minutách působení kapaliny na vzorek byly zaznamenány další jevy, které potvrzují některé známé skutečnosti. K největšímu poklesu teploty došlo u polyamidu ($-4,8^{\circ}\text{C}$) a acetátu ($-4,5^{\circ}\text{C}$). Na druhé straně došlo ke zvýšení teploty u hedvábí ($+0,6^{\circ}\text{C}$), směsi vlna / polyester ($+0,6^{\circ}\text{C}$) a 100% vlny ($+0,4^{\circ}\text{C}$). U bavlny a směsi vlna / polyamid se teplota prakticky nezměnila. Na příkladu vlny vidíme, že vlna hřeje i když je vlhká – odkáže totiž pojmout vlhkost rovnající se až třetině své váhy, aniž by na dotek působila mokrá. U hedvábí došlo k zajímavému jevu. Ačkoliv je to textilie, která je schopna běžně přijímat vodu, při experimentu se v momentu aplikace kapaliny na povrch vzorku a ještě 5 minut poté kapka neroztékala, došlo zde ke zvětšení povrchového napětí a tím také k většímu vývinu tepla.

Po 10 minutách působení kapaliny na vzorek bylo možno pozorovat velmi výrazný pokles teploty u bavlny ($-5,5^{\circ}\text{C}$ oproti měření po 5 minutách) a lnu ($-4,8^{\circ}\text{C}$), teplotně téměř stagnoval polyamid ($-0,6^{\circ}\text{C}$) a mírný pokles byl zaznamenán u acetátu ($-1,8^{\circ}\text{C}$) a vlny (-2°C). Zde se již projevilo, že při delším působení kapaliny na zkoumaný vzorek, se teplota nejvíce snížila tam, kde došlo k nejvyšší míře odpaření kapaliny do okolního prostředí.

Po uplynutí celého 15 minutového intervalu, po který kapalina působila na sledované vzorky je patrné, že celkově nejnižší teplota byla dosažena u bavlny ($17,2^{\circ}\text{C}$) a u směsi bavlna/len ($17,3^{\circ}\text{C}$). Protipól pak představuje vlna ($21,1^{\circ}\text{C}$) a její směs s polyesterem ($21,2^{\circ}\text{C}$) a s polyamidem ($21,4^{\circ}\text{C}$). Co se týče rozdílu teplot při měření po 10 a 15 minutách, teplota již vůbec nebo velmi nepatrně klesla u lnu (zůstala na $17,9^{\circ}\text{C}$) a polyamidu ($-0,3^{\circ}\text{C}$), zato u směsi bavlna/len teplota klesla ještě poměrně výrazně ($-2,6^{\circ}\text{C}$).

Největší celkový pokles zaznamenaný mezi počáteční a konečnou teplotou byl zaznamenan u bavlny ($-7,7^{\circ}\text{C}$) a acetátu ($-7,2^{\circ}\text{C}$). Nejmenší pokles byl naproti tomu naměřen u vlny (pouze -2°C) a u jejích směsích s polyesterem ($-3,1^{\circ}\text{C}$) a polyamidem ($-3,2^{\circ}\text{C}$).

Můžeme konstatovat, že k největšímu poklesu teploty dochází u vzorků, kde je největší míra odpařování, při kterém dochází k odebrání tepla tkanině a okolí. Jinak je tomu u vlny, kterou též někdy s trochou nadsázky můžeme nazvat přírodním termostatem, neboť používá adsorpční a vydávající proces k tomu, aby hřála či chladila. Každý z nás asi ví, že na zimní horskou túru je lepší si do bot vzít vlněné ponožky, než ponožky z bavlny. Málokdo už však ví proč. A na tomto velmi jednoduchém příkladu jsem chtěla demonstrovat, jak dnes věda pomáhá lidem zvyšovat komfort života.

Termovize nám byla velmi dobrým průvodcem při zkoumání hodnocení nasákavosti textilií a umožnila názorně pochopit některé jevy a zákonitosti. V rozsahu diplomové práce samozřejmě nebylo možné věnovat se podrobněji některým jevům a závislostem a vyvodit z nich závěry. Má diplomová práce měla za cíl zjistit základní skutečnosti vzniklé při hodnocení nasákavosti textilií a otevřít tak cestu k dalšímu a zevrubnějšímu zpracování tohoto nesmírně zajímavého téma. Myslím, že svůj účel splnila a pokud stejného názoru budou také hodnotitelé mé práce, ráda bych zvážila možnost pokračovat ve výzkumu například při doktorandské práci.

12. Seznam literatury

1. ČSN 80 0831, Savost plošných textilií. Vydavatelství ÚNM, Praha
2. STRAKA, P., Obecná chemie. Vyd. Praha: Paseka, 1995, ISBN 80 – 7185 – 003 – 9
3. HAJKO, V., SZABÓ, D., Základy fyziky. 2. vyd. Bratislava 1983
4. JIRSÁK, O., MACKOVÁ, I., Netkané textilie. 3. vyd. Liberec: ISBN 80 – 7083 – 511 – 7
5. <http://cs.wikipedia.org/wiki/viskozita>
6. MECHLOVÁ, E. Molekulová fyzika 1, Ostrava 2004
7. FUKA, J., BĚLAŘ, A., Termika a molekulová fyzika. Praha: SPN, 1968
8. Firemní literatura firmy Flier
9. SÝKORA, K., Základy sdílení tepla. Liberec 1961
10. ŠINTÁK, J., UNGER, J., URBÁŠEK, J., Teoretické základy energetických zařízení II. Liberec 1988
11. NOVOTNÝ, P., BAUER, F., Základy nauky o sdílení tepla. Praha 1995
12. NOŽIČKA, J., Nauka o proudění a sdílení tepla. Praha 1960
13. LEVITIN, B., Infračervená technika. 1. vyd. Bratislava
14. HABEL, J., Světelná technika a osvětlování. Praha 1995
15. http://www.zslado.cz/vyuka_fyzika/vyuka.html
16. KREIDL, M., Měření teploty – Senzory a měřící obvody
17. NOŽIČKA, J., Termomechanika ČVUT Praha
18. <http://www.elektrorevue.cz/elanky/06024/index.html>, *Použití infračerveného linescanneru pro 2 – D termografii statických objektů*