

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky a techniky

Měření termokamerou

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.

Autor: Zdeněk Frank

Anotace:

Tématika bakalářské práce se zaměřuje na moderní bezdotykové měření povrchové teploty různých materiálů, především stavebních materiálů. Zabývá se teplotou jako takovou, jejím kontaktním měřením a hlavně se zabývá principem přesného snímání teplot bezkontaktně termokamerou. Důležitou součástí této práce je hodnocení a popis výstupů z termokamery pro využívání nejen při studiu této moderní problematiky měření povrchové teploty, ale hlavně porozumět tomuto tématu nejen v široké odborné praxi, ale i též v běžné lidské činnosti, hledání zbytečných úniků tepla, v prevenci před vážnou poruchou strojního nebo elektrického zařízení.

Klíčová slova :

termokamera, bezdotykové měření teploty, měřicí blok.

Abstract:

The main topics of my BSc. thesis are the modern non-contact temperature measurement methods of various materials, specifically building materials. The thesis deals with temperature as a physical quantity, with its contact measurement and, most importantly, the principles of accurate non-contact temperature measurement by a thermal imaging camera. A substantial part of my thesis deals with the evaluation and description of thermograms. These results can be used both for further enhancement of this modern methodology, and also in practice – to search for heat leaks in faulty thermal insulation as a precaution measure in the engineering or energy industries.

Key words :

thermal imaging camera, non-contact temperature measurement, measuring-block.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum: 25.04.2012

.....

podpis studenta

Poděkování

Touto formou děkuji svému vedoucímu práce RNDr. Pavlu Křížovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracovávání mé práce. Zároveň mu děkuji za umožnění měření termokamerou v laboratoři na Pedagogické fakultě, katedře fyziky a techniky.

Děkuji mé manželce za velkou pomoc při psaní a editování této práce.

Obsah

Úvod	6
1. Teplota	7
1.1. Měření teploty	7
1.2. Teploměr a snímač teplot	7
1.3. Rozdělení podle funkčního principu teploměrů a snímačů teplot	8
1.4. Speciální teploměry, snímače	8
2. Teoretický úvod pro měření termokamerou	9
3. Tepelné vlastnosti materiálů	13
3.1. Tepelná vodivost	14
3.2. Měrná tepelná kapacita	14
3.3. Tepelná jímavost	15
3.4. Odolnost proti teple	15
4. Návrh, vývoj a výroba boxu pro měření tepelných vlastností	15
4.1. Stanovené podmínky měřicího boxu	16
4.2. Vývoj měřicího boxu	16
4.2.1. Vyhřívací komora	16
4.2.2. Měřicí blok	17
5. Termokamera GUIDE M8	18
5.1. Některá technická data M8	19
6. Pracoviště v laboratoři	20
6.1. Příprava před měřením	22
6.1.1. Emisivita	22
7. Provedené měření termokamerou	23
7.1. Měřený materiál – keramika podlahové dlaždice	23
7.2. Měřený materiál – sádrokarton klasik	29
7.3. Měřený materiál – stavební dřevotříska voděvzdorná	35
Závěr	42
Použitá literatura	43-

Úvod

Infračervená termografie představuje zcela novou kvalitu v experimentální termomechanice. Pro měřicí techniku je po nástupu termografie zásadní změna v přechodu od měření lokálních teplot ke zjišťování teplotního pole jako výsledku měření v nekonečné množině měřicích míst. Z toho vyplývá i hlubší pohled na tepelné procesy a možnosti jejich tepelné analýzy. Termografie se používá k zobrazování teplotních polí zejména ve vědě, průmyslových, lékařských a vojenských aplikacích více jak 30 let. Ale teprve během posledních deseti let se v souvislosti s použitím nechlazených mikrobolometrických detektorů v termovizních kamerách podstatně rozšiřuje spektrum aplikací téměř do všech oblastí lidské činnosti.

K nejprogresivnějším metodám měření teplotních polí patří termovize. Její princip spočívá v bezkontaktním měření intenzity infračerveného záření termovizní kamerou. Její hlavní část tvoří pole infradetektorů. Výstupem je analogový a digitální obraz teplotního pole. Důležitou součástí termovizní techniky jsou také programové a technické prostředky pro digitalizaci, zpracování a transformaci obrazu teplotního pole, která se dnes prakticky používá ve všech oblastech činnosti člověka.

1. Teplota. [1]

Teplota je charakteristika tepelného stavu povrchu nebo celé hmoty.

Teplota je základní fyzikální veličinou soustavy SI jednotkou je Kelvin (K) a vedlejší jednotkou stupeň Celsia (°C). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly ($0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$), ke které se lze přiblížit, ale nelze jí dosáhnout.

Teplota je základním pojmem termiky a hlavní veličinou pro tepelný jev. Projevuje se i v mnoha dalších fyzikálních jevech a závisí na ní mechanické, elektromagnetické i chemické vlastnosti látek. Její význam zasahuje do širokého pole oborů lidské činnosti. Je důležitým pojmem např. v průmyslových technologiích, ve výzkumu například kosmu, ale i v biologii.

Nejprve se začalo používat měření teploty na bázi roztažnosti kapalin. První dochované argumenty jsou ze starověku. Základem pro moderní a přesné měření teploty je závislost elektrických jevů na teplotě.

1.1. Měření teploty.

K určování teploty se využívá závislosti vhodně zvolených fyzikálních veličin na teplotě. To umožňuje převést měření teploty na měření jiné fyzikální veličiny.

Mezi teplotně závislé veličiny patří např. délkové rozměry, objem, tlak, elektrický odpor vodičů nebo polovodičů, elektromotorické napětí termoelektrických článků.

Pro měření vysokých teplot se používá zobrazení radiometrických vlastností elektromagnetických vln, které předměty o vysoké teplotě vyzařují. Tyto teploměry nazýváme pyrometry.

1.2. Teploměr a snímač teplot.

- **Teploměr** charakterizujeme jako přímé měření a zobrazení teploty v místě měření.
- **Snímač teploty** je určen k dálkovému přenosu analogových nebo číselných dat z měřeného místa k místu zobrazení teploty na zobrazovači. Je čidlem pro následnou regulaci.

1.3. Rozdělení podle funkčního principu teploměrů a snímačů teplot.

- **Kapalinový**, k měření teploty využívá teplotní roztažnosti kapalin (rtuť, líh atd.).
- **Bimetalový**, používá se bimetalový pásek ze dvou kovů s různými teplotními délkovými roztažnostmi. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se využívá. Nevýhodou je pomalá reakce na změnu teploty.
- **Plynový**, využívá závislosti tlaku plynu na teplotě při stejném objemu nebo obráceného jevu, závislost objemu plynu na teplotě při stejném tlaku.
- **Odporový**, využívá závislost elektrického odporu vodiče, polovodiče na teplotě. Součástka, která slouží ke zjištění teploty a následné regulaci se nazývá termistor.
- **Termoelektrický** (termočlánek), charakterizuje ho termoelektrický jev. Změnou teploty spoje mezi dvěma různými kovy se mění vzniklé termoelektrické napětí.
- **Polovodičový**, podstatou je závislost charakteristiky polovodiče (zesílení napětí v přechodu P-N) na teplotě.
- **Radiační** (Infrateploměr), teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření. Měří záření vysílané tělesy do okolí.

1.4. Speciální teploměry, snímače.

- **Kontaktní**, sepne kontakt při dosažení nastavené teploty. Používá se v regulaci a automatizaci, např. termostaty.
- **Maximo-minimální**, teploměr, který si pamatuje maximální a minimální teplotu za sledovaný čas. Využití má v meteorologii.
- **Radiační teploměr (Infrateploměr)** – teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření (Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon). Měří záření vysílané tělesy do okolí (na stejném principu pracují i světelná infračidla či naváděné střely). [1]

2. Teoretický úvod pro měření termokamerou. [2]

Infračervená oblast elektromagnetického záření (IR) zahrnuje vlnové délky delší než viditelné světlo až po oblast mikrovln. Infračervená oblast je často rozdělována do tří menších oblastí, z nichž nejkratší vlnové délky (0,75 – 3) μm tvoří **blízkou infračervenou oblast**, interval vlnových délek (3 – 6) μm **střední oblast**, (6-100) μm **dalekou infračervenou oblast**. Vlnové délky pro tyto oblasti se velmi často udávají také v nanometrech nebo v angströmech. Převodní vztah mezi jednotkami je

$$1 \text{ \AA} = 10^{-4} \mu\text{m}.$$

Vyzařování těles je možno popsat Stefanovým – Boltzmannovým zákonem ve tvaru

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4,$$

kde W je intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] ,

ε je emisivita,

σ je Stefanova – Boltzmannova konstanta,

T je termodynamická teplota.

Pro případ černého tělesa je emisivita $\varepsilon = 1$. Černé těleso je definováno jako objekt, který absorbuje veškeré záření, které na něj dopadá, bez ohledu na vlnovou délku. Pro šedé (nečerné) těleso, kterým je každý reálný objekt, je situace složitější. Existují tři jevy, které mohou odlišovat reálný objekt od černého tělesa: část dopadajícího záření [a] může být pohlcena, část záření [ρ] může být odražena a část [τ] může tělesem prostoupit. Tyto složky jsou obecně závislé na vlnové délce, a proto je nutné k jejich vyjádření použít spektrální veličiny.

Zavádí se proto - spektrální pohltivost a_λ ,

- spektrální odrazivost ρ_λ ,

- spektrální propustnost τ_λ ,

definované vždy jako poměr pohlcené, eventuálně odražené, propuštěné energie k celkové energii, dopadající na těleso.

Součet všech těchto tří faktorů musí být pro jakoukoliv vlnovou délku roven jedné.

Platí relace

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1.$$

Každé šedé těleso je charakterizováno svoji emisivitou ε definovanou poměrem mezi vyzařováním objektu a černého tělesa. Hodnoty emisivity se pro šedá tělesa pohybují v intervalu 0 – 1. Také emisivita se v obecném případě může měnit s vlnovou délkou, a proto musíme definovat emisivitu pro určitou hodnotu λ a označit jako **spektrální emisivitu** ε_λ .

Příkladem materiálu, jehož emisivita se radikálně mění s vlnovou délkou, je sklo. Pro vlnové délky zhruba pod 2,6 μm je sklo vysoce transparentní a emisivita se blíží k nule. Pro vlnové délky větší než 2,6 μm je sklo stále méně propustné. Pro vlnové délky větší než 4 μm je sklo zcela nepropustné a emisivita je nad 0,97.

Ze zákonů vyzařování vyplývá, že spektrální emisivita a spektrální pohltivost každého materiálu se rovnají, a to při jakékoliv teplotě a vlnové délce.

Platí vztah

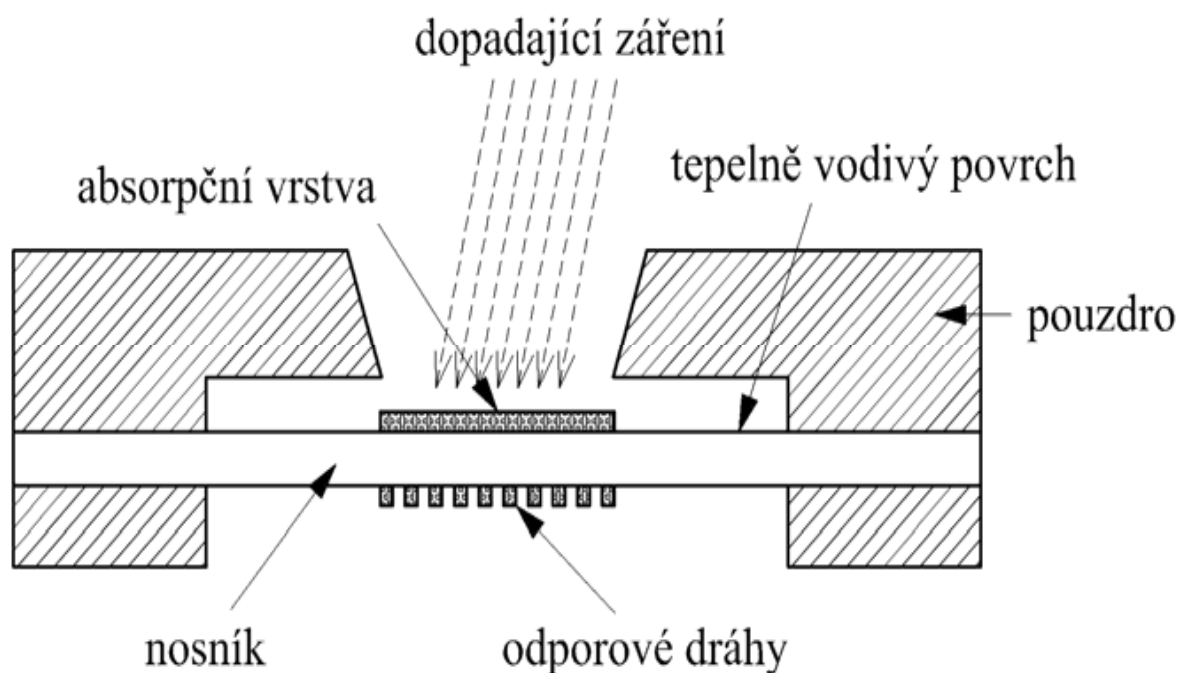
$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda.$$

Infračervená kamera měří a vytváří obraz na základě povrchem tělesa emitovaného infračerveného záření. Protože emitované infračervené záření závisí na teplotě povrchu tělesa, je možné pomocí termovizního měření stanovit teplotu tělesa.

Vlastní měření záření emitovaného povrchem objektu se provádí pomocí **bolometru**. Bolometry (z řeckého bole: paprsek) jsou senzory pro bezdotykové měření teploty pracující na principu pyrometrie, tzn. měření celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím infračerveného záření. Častěji se však bolometry vyskytují v podobě integrovaných obvodů obsahující uspořádání několika desítek, stovek nebo i tisíců bolometrů do matice, obecně označované jako mikrobolometry. Využívají se nejčastěji pro potřeby termovize, tedy pro infračervené snímání obrazu předmětů s následnou možností měření nebo detekce jejich teploty. Princip bolometrického detektoru infračerveného záření je znám od 80. let 19. století. Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě, která však závisí na množství absorbovaného dopadajícího

infračerveného záření. Množství dopadajícího záření může být tedy určeno ze změn odporu bolometru. Aby však byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému infračervenému záření, musí být vlastní bolometr tepelně izolován od svého okolí.

Mikrobolometr (microbolometer array) se od jednoduchého bolometru liší počtem odporových plošek na jednom senzoru. Obvykle jde o čtvercovou strukturu (dvourozměrné pole) pokrytých právě teplotně citlivým odporovým materiálem ve formě plošek, které absorbují infračervené záření. Celý mikrobolometrický senzor je pak vyroben jako monolitický křemíkový obvod.



Obr. č. 1 Princip bolometrického detektoru infračerveného záření. [2]

Vlastnosti bolometrů

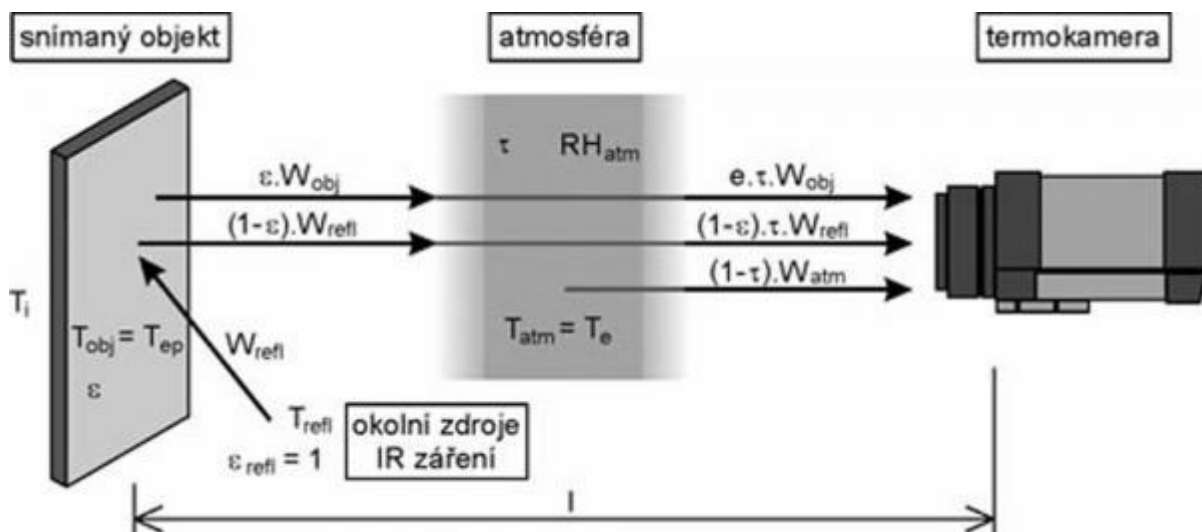
- jsou rychlé - krátká časová konstanta (až 1 ms)
- mají velkou citlivost
- spektrální citlivost v rozmezí (1,6 – 5000) μm
- velký pracovní teplotní rozsah (-40 °C až 100 °C)
- bez problémů lze měřit vysoký rozsah teplot měřeného objektu (i nad 1500 °C)

- malé rozměry (u mikrobolometrů jen desítky μm)
- není zde žádné ovlivnění měřeného objektu
- mikrobolometry – velký počet snímačů (i přes 80 tisíc) na malé ploše, infračervené snímání obrazu s rozlišením až 320x240 pixelů
- nevýhodou je vysoká cena
- některé typy je nutné chladit

Skutečná situace a měření je mnohem komplikovanější, protože infračervené záření vyzařované tělesem, kromě jeho teploty, závisí také na jeho **emisivitě**. Dále záření vzniká rovněž na okolních materiálech a je zkoumaným tělesem odraženo. Záření emitované tělesem a odražené záření může být navíc zeslabeno absorpcí ve vzduchu mezi objektem a kamerou. Stupeň absorpce pak silně závisí na vlhkosti vzduchu. Tyto vlivy tvoří soubor parametrů, které lze kvantifikovat zavedením příslušných korekčních koeficientů, a které je třeba před měřením zvolit.

Emisivita tělesa je, jak se ukazuje, nejdůležitější parametr, jehož volba ovlivňuje správnost výsledků při termovizních měřeních. Obecně materiály (jejich povrchy) vykazují emisivitu v rozmezí 0,1 – 0,95. Vysoce vyleštěný povrch má emisivitu pod 0,1. Lidská pokožka má emisivitu blízko jedné. Neoxidující kovy vykazují téměř dokonalou nepropustnost a vysokou spektrální odrazivost, která se příliš nemění s vlnovou délkou. Ze vztahu $[a_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1]$ pak vyplývá, že jejich emisivita je nízká, a roste pouze s teplotou. Pro nekovy je naopak emisivita větší a klesá s teplotou. Koeficient zohledňující **odraženou teplotu** kompenzuje vliv záření odraženého měřeným tělesem a vliv záření z atmosféry mezi objektem a kamerou na výsledky měření termokamerou. V některých případech, je-li emisivita malá, vzdálenost mezi objektem a kamerou velká a teplota objektu je blízko odražené teplotě, je důležité vliv odražené teploty správně kompenzovat.

Dalšími korekčními koeficienty, které lze před měřením v kameře nastavit, jsou **vzdálenost** mezi objektem a objektivem kamery a **relativní vlhkost** prostředí mezi objektivem a kamerou. Obvykle bývá předvolena hodnota 50%, která dobře vyhovuje v případě malých vzdáleností objektu a kamery. Vliv prostředí (vzdálenosti) mezi kamerou a objektem lze navolit pomocí parametru **externí optika**, který zohledňuje i případy, kdy použijeme jiný objektiv pro kameru nebo do cesty záření vložíme filtr.



Obr. č. 2 Schéma měření termokamerou a vliv okolí na přesnost měření. [3]

Vzdálenost mezi kamerou a objektem pro případ vzduchu nemá obvykle příliš velkou váhu ve srovnání s ostatními parametry ovlivňujícími přesnost určení teploty povrchu objektu. V případě jiného prostředí mezi kamerou a objektem (např. sklo nebo jiný materiál) musíme vliv tohoto parametru posoudit. Jeho hodnotu nejlépe určíme tak, že kameru namíříme na povrch černého tělesa, který je ohřátý na definovanou teplotu, např. 100°C , nastavíme správnou hodnotu emisivity pro černé těleso (rovnou 0,99) a správnou hodnotu teploty (100°C) doladíme úpravou hodnoty parametru „externí optika“, který je v menu kamery přednastaven na hodnotu 1. Snížení hodnoty tohoto parametru pod hodnotu 1 znamená, že část energie infrazářením je absorbována v prostoru mezi kamerou a objektem. O této skutečnosti se jednoduše můžete přesvědčit vložením materiálu, který jen zčásti propouští infračervené záření, mezi objekt a kameru. Jestliže se nezmění hodnota parametru „externí optika“, měřená teplota bude menší než skutečná.[2]

3. Tepelné vlastnosti materiálů. [4]

Vyjadřují chování materiálů, které jsou vystaveny účinkům tepla nebo mrazu, jakožto jedné z forem energie. Jistým způsobem se chovají látky při přenosu tepla, kdy mění svůj tvar nebo objem, mění své mechanické vlastnosti, pevnost, tvrdost,

tažnost, rozpadají se vysušením, chemickým rozpadem, cyklickým střídáním tepla a mrazu apod.

Přenos tepla se může dít vedením, kdy teplo přechází z teplejšího místa na chladnější bezprostředním stykem hmotných částic nebo prouděním, kdy teplo přechází prouděním molekul nebo jednotlivých částic plynů, či tekutiny z teplejších míst do chladnějších anebo záření, kdy teplejší látka vysílá elektromagnetické záření k látce chladnější i přes vakuum. K nejdůležitějším tepelně technickým vlastnostem patří:

3. 1. Tepelná vodivost.

Je to schopnost látky vést teplo. Popisuje se součinitelem tepelné vodivosti λ , který udává tepelný výkon ve Watech přenášený v materiálu plochou 1 m^2 do vzdálenosti 1 m při teplotním spádu 1° K . Jednotkou je $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Podle součinitele tepelné vodivosti se materiály rozdělují na dobré vodiče tepla, například kovy a na špatné vodiče tepla, k nim patří většina stavebních materiálů. Klesne-li součinitel tepelné vodivosti λ pod hodnotu $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, mluvíme o látkách tepelně izolačních.

Tepelná vodivost materiálu záleží na jeho složení, struktuře, pórovitosti, mezerovitosti, vlhkosti, vrstevnatosti a na teplotě. Zejména vliv vlhkosti u mikroporézních látek má mimořádně nepříznivý dopad na tepelnou vodivost, neboť součinitel tepelné vodivosti λ rychle vzrůstá a původní, vysoce účinná tepelná izolace ztrácí při zvýšené vlhkosti svůj význam.

3. 2. Měrná tepelná kapacita.

Měrná tepelná kapacita c vyjadřuje teplo, které musíme dodat 1 kg látky, aby se ohřál o 1 K . Tato veličina je potřebná pro všechny tepelně technické výpočty v neustáleném stavu. Jednotkou je $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Největší měrnou tepelnou kapacitu má voda $c = 4,186 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, nejmenší pak některé anorganické látky, např. olovo $c = 0,13 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Materiály přírodního původu mají měrnou tepelnou kapacitu kolem $1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Závisí, podobně jako tepelná vodivost, na vlhkosti a teplotě, zvyšuje-li se vlhkost, vzrůstá. Je to dáno velkou hodnotou měrné tepelné kapacity vody. Změna měrné tepelné kapacity v souvislosti se změnami teploty souvisí se

strukturálními změnami látky účinkem teploty a může dosáhnout u některých látek i několikanásobné hodnoty. V tomto případě se jedná o látku makromolekulární.

3. 3. Tepelná jímavost.

Tepelná jímavost b souvisí úzce s teplotní vodivostí. Vyjadřuje schopnost látky přijímat a uvolňovat teplo. Vyšší hodnota jímavosti znamená, že se látka sice rychleji ohřeje, ale také rychleji ochladne. Velkou tepelnou jímavost mají například kovy, kámen, beton, apod. Malou pak pěnové nebo vláknité tepelně izolační materiály.

Obě tyto vlastnosti - tepelná jímavost i teplotní vodivost rozhodují při neustálém vedení tepla, např. při přerušovaném vytápění o kolísání vnitřní teploty prostředí.

Bude-li teplotní vodivost malá a tepelná jímavost velká, bude se prostor sice déle ohřívat, zato ale po přerušení dodávky tepla svoji teplotu déle podrží a její pokles bude pozvolný.

3. 4. Odolnost proti teple.

Odolnost proti teple se uvádí ve $^{\circ}\text{C}$. Určuje se teplotou látky, při níž právě dojde k dohodnuté změně mechanických vlastností látky. Umožňuje srovnání i různých materiálů na základě změny jedné vlastnosti. Odolnost vůči teple většiny stavebních materiálů dosahuje několik set $^{\circ}\text{C}$. [4]

4. Návrh, vývoj a výroba boxu pro měření tepelných vlastností.

Po prostudování literatury, která se zabývá tepelnými vlastnostmi materiálů, především materiálů ve stavebnictví. Důležité jsou též vlastnosti a podmínky správného měření termokamerou. Nedílnou součástí samotného měření je dodržet českou a mezinárodní normu ČSN ISO 18434-1 část 1. Všeobecné postupy, popisuje typické postupy a jejich účel při monitorování stavu strojů a zařízení včetně diagnostiky. Ač se jedná zdánlivě o jednoduchý postup s moderní měřicí technikou, musel jsem si stanovit na začátku podmínky, za jakých bude měřicí box funkční pro opravdu různé materiálové vzorky a především zajistit co nejlépejší podmínky pro měření povrchové teploty materiálů termokamerou bez vlivu měřicího boxu a prostředí laboratoře.

4.1. Stanovené podmínky měřicího boxu.

- Bezpečný zdroj tepla bez regulace, pouze zapnuto – vypnuto.
- Maximální dosažitelná teplota do 100 °C.
- Vyzařující teplo usměrněné na zkušební materiál.
- Měření teploty uvnitř vyhřívací komory co nejbližší k měřenému bloku.
- Pro objektivní sledování teplot uvnitř boxu, měřit teplotu za zdrojem tepla.
- Samotná vyhřívací komora dostatečně tepelně odizolovaná od nosných částí.
- Povrch měřicího boxu by neměl přesáhnout teplotu 30 °C, mimo měřeného bloku.
- Jednoduchá obsluha a manipulace s boxem.
- Didaktická a názorná učební pomůcka.
- Zásoba měřených bloků by měla být součástí celého boxu.
- Bezpečnost práce bez speciálního pokynu či školení, platí bezpečnostní předpisy laboratoře.
- Elektroinstalace odborně provedena dle norem ČSN autorem diplomové práce.

4.2. Vývoj měřicího boxu.

4.2.1. Vyhřívací komora.

Prvním předpokladem bylo vybrat zdroj tepla a k tomu vytvořit samotný tvar vyhřívací komory. Po průzkumu českého trhu jsem zvolil jako nejlepší alternativu infražárovku o výkonu 150 W. Při měření tvaru reflektoru odrazu uvnitř žárovky jsem chtěl zjistit ohnisko největší vyzařované teploty. Problémem bylo změřit vzdálenost vlákna vůči reflektoru. Tuto vzdálenost se mi nezdařilo odměřit s patřičnou přesností tak, aby výsledná vzdálenost ohniska odpovídala skutečnosti. Zvolil jsem metodu měření nejvyšší teploty v ose žárovky. Ve vzdálenosti od skla žárovky byla v 95 mm nejvyšší teplota naměřená 56 °C. Tuto vzdálenost jsem určil pro budoucí polohu vnitřní stěny měřicího bloku, jako místo efektivní vzdálenosti a nejrychlejšího ohřevu materiálu. Této vzdálenosti jsem přizpůsobil ostatní rozměry konstrukce vytápěného prostoru.

4.2.2. Měřený blok.

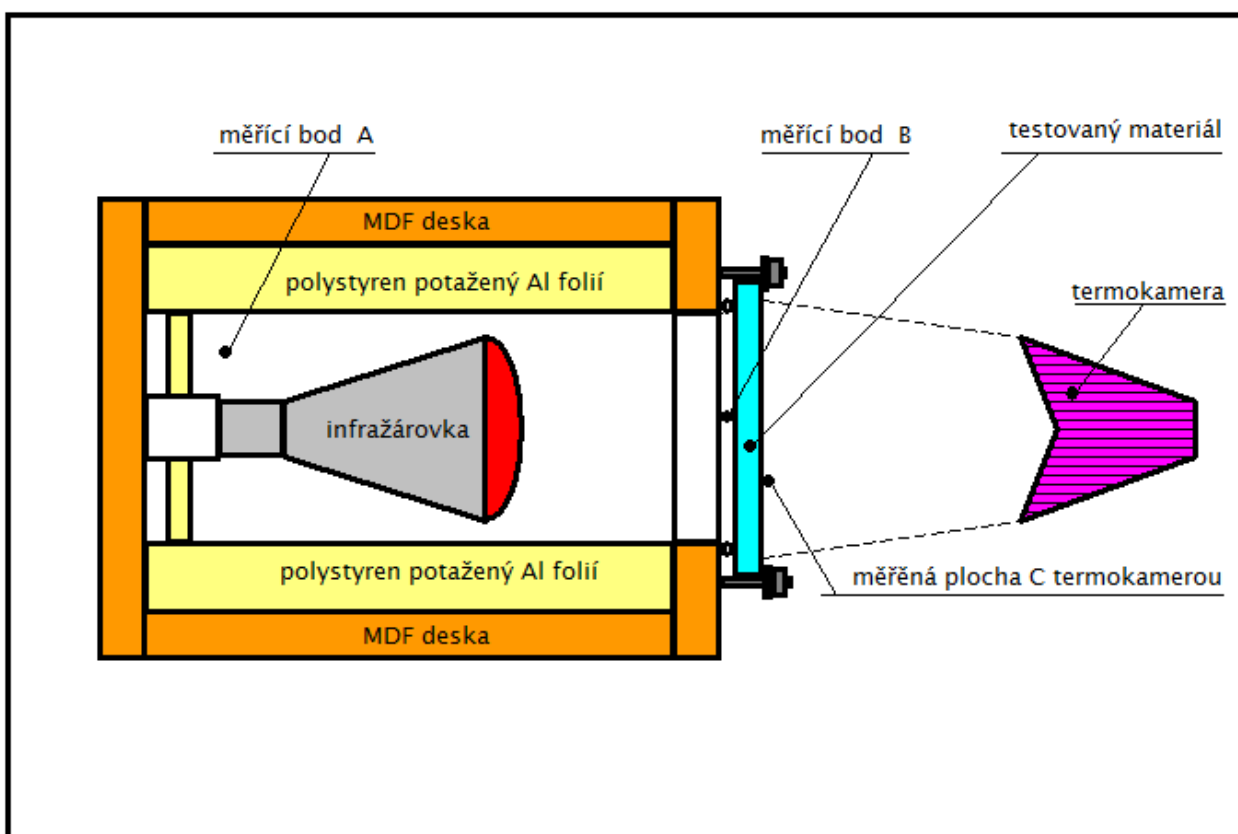
Měřeným blokem se rozumí zkušební materiál o rozměrech 190 x 190 mm. Zvolil jsem čtverec pro jednodušší manipulaci při zakládání do zkušebního prostoru. Tloušťka materiálu je bohužel různá, protože nebylo v mých možnostech kvalitně materiál dělit nebo získat stejnou tloušťku od různých dodavatelů. Sehnal jsem různé druhy stavebních materiálů od dobře vodivých teplo až po hůře vodivých teplo. Úmyslně jsem se vyhnul stavebním materiálům, které se považují za izolanty a materiálům sice dobře vodivým teplo, obsahující prvky železa a jím podobné, z důvodu příliš krátkému času ohřevu a jeho použití ve stavebnictví, není bez použití izolačních materiálů na venek včetně betonu, který má podobnou teplotní roztažnost jako železo či ocel.

Měřený blok se připevňuje dvěma šrouby M6 s křídlovou maticí a přes zvětšenou podložku se přimáčkne na silikonové těsnění měřicí komory. Tento systém zaručí, že veškeré usměrněné teplo se přenesou na vnitřní stěnu měřeného bloku a díky tepelné vodivosti se převede na vnější stranu bloku.

Pro kvalitní zjištění stavu chování vnitřního prostoru jsem vytvořil **měřicí bod A**, který snímá teplotu prostoru za zdrojem tepla.

Měřicí bod B snímá teplotu prostoru v těsné blízkosti testovaného materiálu ze strany zdroje tepla.

Teplotu vnější plochy snímá staticky seřazená termokamera, **měřená plocha C**.



Obr. č. 3 Situační schematický obrázek měření teploty termokamerou.

5. Termokamera GUIDE M8.

Samotné měření jsem prováděl termokamerou M8. Výrobce Guide. Její nespornou devizou je kvalita výrobku s mnoha ovládacími prvky a s opravdu profesionálním SW.

Jen jsem litoval, že pracuje s reálným časem a při zpracování výsledků nelze urychlit zpracování dat, vše je v čase nasnímaném při měření. Zřejmě je to od výrobce úmysl a ví proč tomu tak je.

S termokamerou se pracovalo velmi pohodlně a bez jakéhokoli konfliktu nebo poruchy. Její technické parametry jsou vysoké a v praxi okamžitě využitelné. Grafika výstupů je dostatečná k tisku na formáty A4 i na A3.

5.1. Některá technická data termokamery M8. [5]

Detektor typ: FPA nechlazený mikrobolometr 160×120 pix, 25μm

Spektrální rozsah: 8 to 14μm

Field of View (FOV): 20,6°×15,5°, manuální, automatické ostření

Teplotní citlivost: ≤0,1°K při 30°C

Snímací frekvence: 50Hz PAL/60 NTSC

Elektronický zoom: 2x

Digitální foto: CMOS senzor, 1600 x 1200 pix, 224 color

Externí display: 2.4" TFT vysoké rozlišení LCD

Display: Barevný 256 odstínů, 9 palet (duha, ocel, Č&B, atd.)

Video výstup: PAL/ NTSC, kompozitní video

Teplotní rozsah měření: -20°C až +250°C +350/1.200°C

Přesnost: ±2°C nebo ±2% platí vyšší hodnota

Měřicí módy: Bod, oblast, automaticky hot a cold bod, střední teplota, isotermy, profily, auto alarm

Korekce emisivity: od 0.01 po 1.00 (po 0.01 krocích). Automatická korekce na základě relativní vlhkosti, atmosférické propustnosti a použité optice

Paměť typ: 2 GB SD karta

Formát snímku: JPG (individuálně infra + viditelný + hlasové poznámky)

Hlasová poznámka: až 60 sec ke každému snímku

Video: až 30 min. živého videa na kartu

Laserový značkováč: třída 2 semiconductor laser

Akumulátory: Li-ion nabíjecí

Operační doba: Více než 3,5 hodiny nepřetržitého měření

Nabíjení: v kameře přes adaptér, v externím nabíječi

Spotřeba: 2W

Pracovní teplota: -10°C až +60°C

Skladovací teplota: -20°C až +60°C

Vlhkost: 10% to 95%, nekondenzující při skladování i měření

Krytí: IP54

Náraz: 25G, IEC 68-2-29

Vibrace: 2G, IEC 68-2-6

Interface: USB 2.0/RS 232 pro ovládání/ ukládání přímo do/z PC

Snímek (termální & vizuální), měření, hlas a digitální video transfer do PC

Rozměry: 120mm×60mm×30mm (standard model)

Váha: 0.265kg (s aku) [5]

6. Pracoviště v laboratoři.



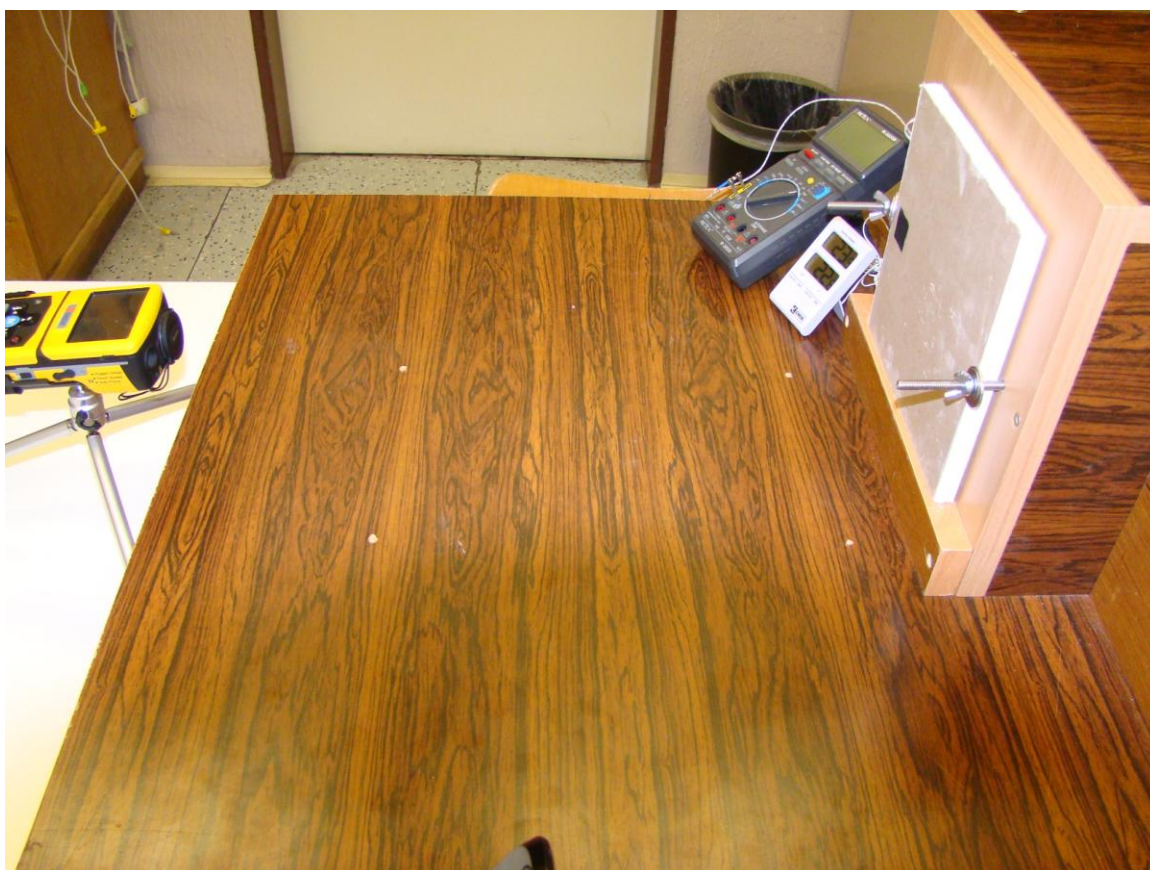
Obr. č. 4 Celkový pohled na pracoviště měření termokamerou.



Obr. č. 5 Z pohledu termokamery na měřenou plochu C.



Obr. č. 6 Celkový pohled na pracoviště z druhé strany.



Obr. č. 7 Boční pohled zprava na pracoviště.

6.1. Příprava před měřením.

6.1.1. Emisivita.

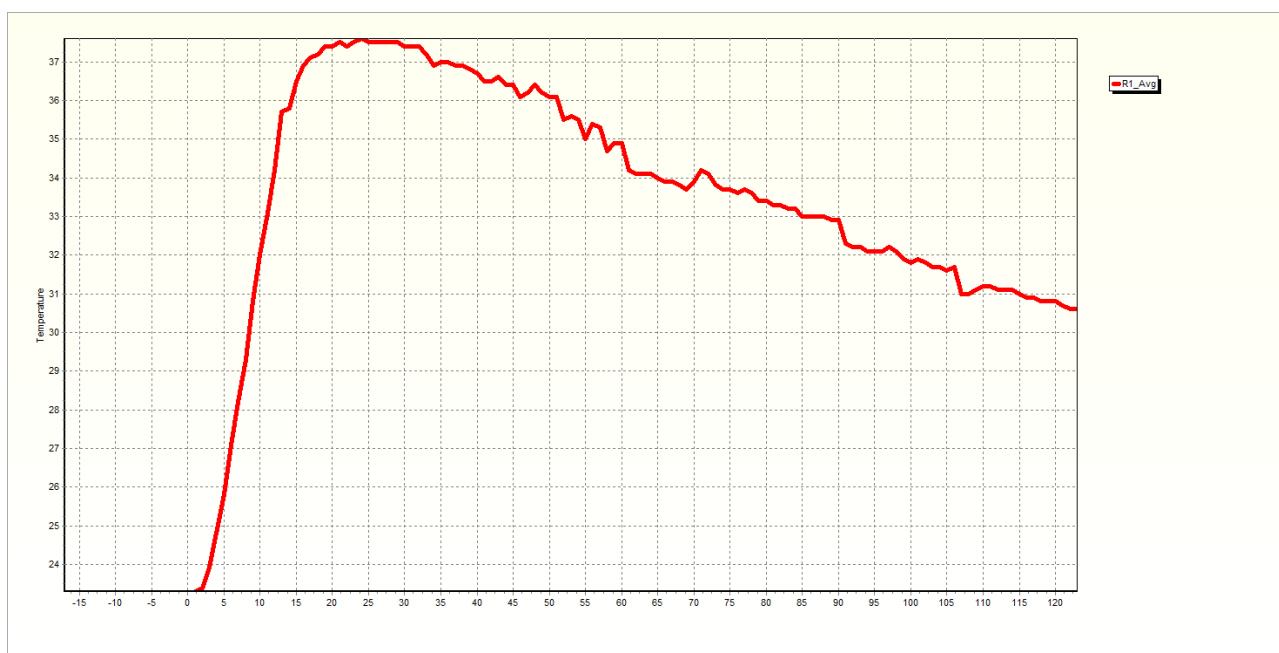
Před každým měřením je nutné sladit emisivitu povrchu měřeného materiálu. Je to z důvodu přesnosti snímání teploty, termokamera snímá s teplotní citlivostí $0,1 \text{ }^{\circ}\text{K}$ a s přesností 2 %. Je důležité snímat aktuální a reálnou, hlavně skutečnou teplotu povrchu.

Emisivita se nejlépe seřizuje na matnou černou plochu snímaného povrchu. Využil jsem Al lepenky s tenkou vrstvou lepidla. Lepenku jsem nastříkal matnou černou nitro barvou. A čtverec $20 \times 20 \text{ mm}$ jsem nalepil na měřený povrch mimo centrum zkoumané povrchové teploty. Tím jsem dosáhl přibližně stejné povrchové teploty čtverečku

s měřeným materiálem pro stanovení emisivity. Tuto hodnotu jsem nastavil v menu termokamery.

7. Provedené měření termokamerou.

7.1. Měřený materiál – keramika podlahové dlaždice

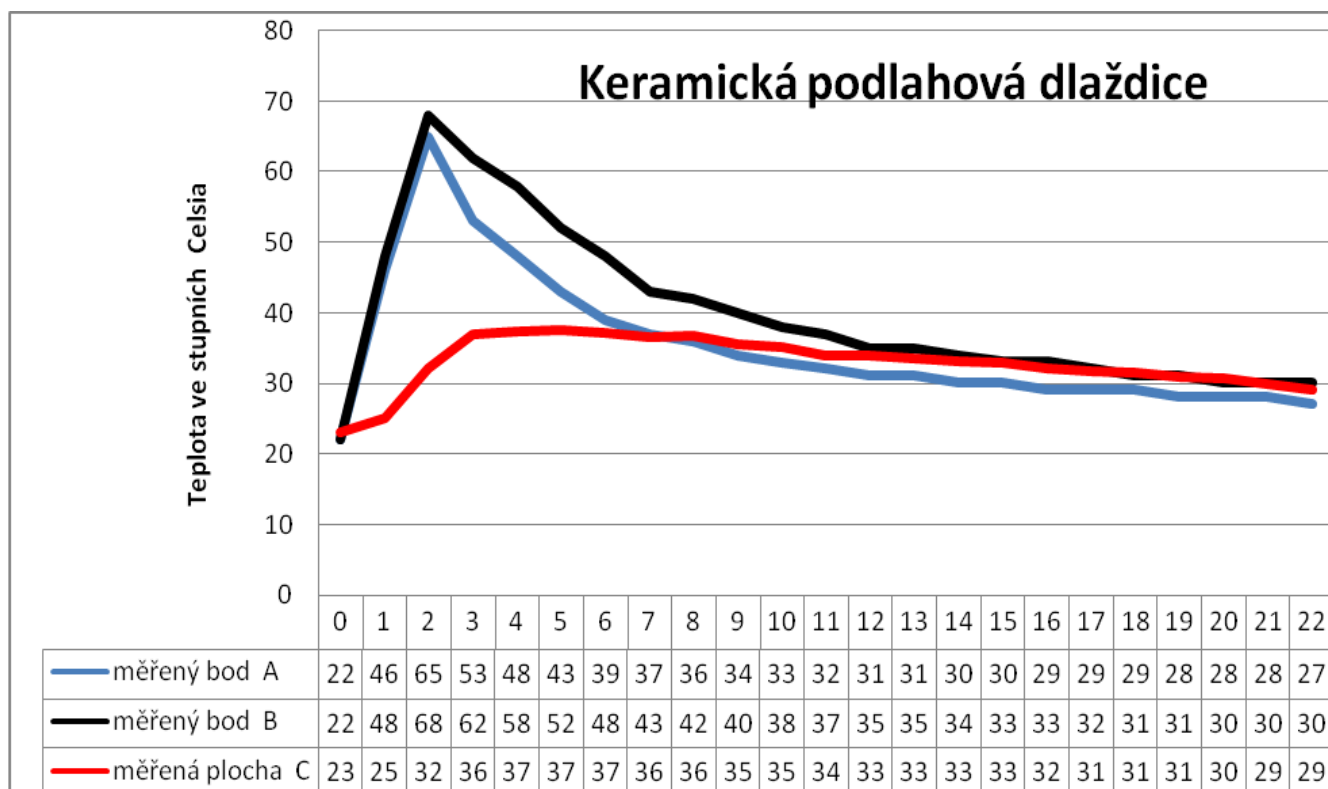


Obr. č. 8 Graf teploty měřené plochy C zaznamenáván po 10 sekundách.
(Vodorovná osa – počet měření po 10 sekundách
Svislá osa – teplota měřené plochy C ve stupních Celsia)

Z grafu je poznat dostatečný zdroj teploty ohřevu pouze 2 min. do 70 °C v měřeném bodě B. Nárůst je postatě kolmý. Velmi dobře je znázorněno vypnutí zdroje tepla a následný doběh vzestupu tepla. Je to též dáno samotným materiálem, keramika, která se vyznačuje velkou tepelnou jímavostí. Po vypnutí zdroje je znát setrvačnost doběhu teploty. Samotné chladnutí je pozvolné. Vlastnost keramiky setrvávat v teplotě je využívána hojně v různých odvětvích průmyslu. Fluktuace je zřejmě způsobeno neklimatizovaným prostředím laboratoře.

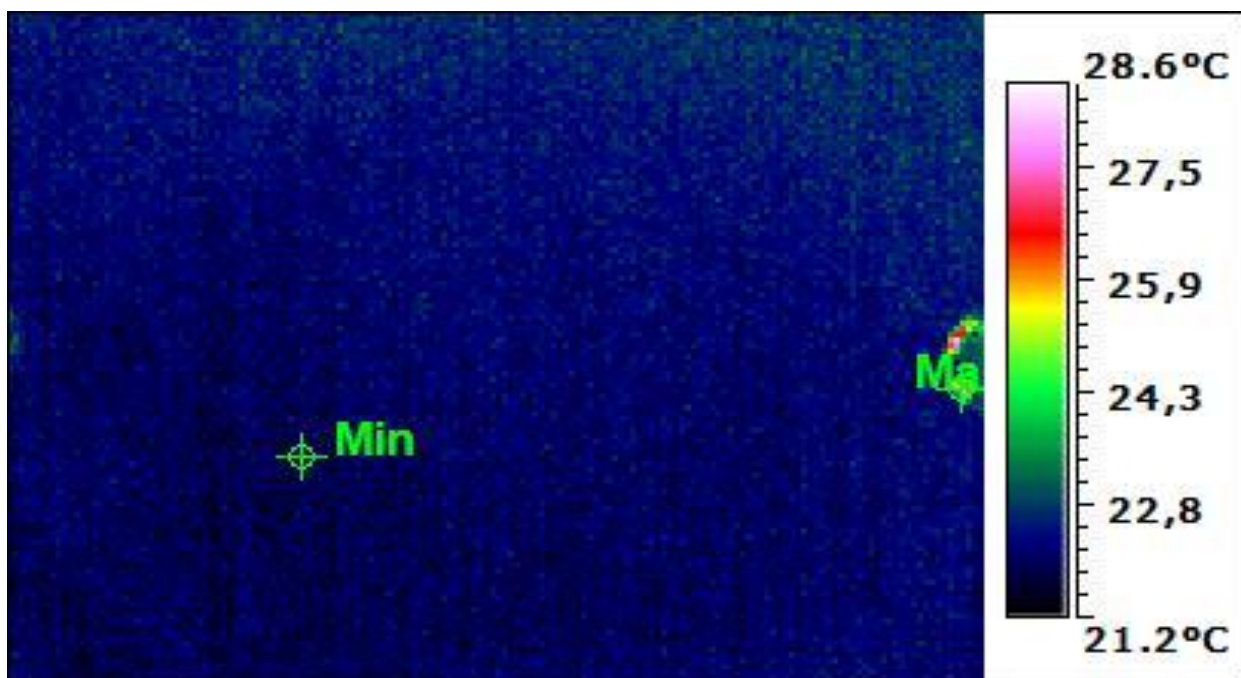
TABULKA MĚŘENÍ TERMOKAMEROU				
materiál - keramická podlahová dlaždice				
	teplota prostředí	tl. materiálu	emisivita kamery	pozn.
	22° C	11 mm	0,93	
min.	měřený bod A	měřený bod B	měřená plocha C	
0	22	22	23,0	zapnuto
1	46	48	25,1	
2	65	68	32,2	vypnuto
3	53	62	36,9	
4	48	58	37,4	
5	43	52	37,6	
6	39	48	37,1	
7	37	43	36,6	
8	36	42	36,7	
9	34	40	35,5	
10	33	38	35,2	
11	32	37	34,0	
12	31	35	33,9	
13	31	35	33,6	
14	30	34	33,1	
15	30	33	33,0	
16	29	33	32,2	
17	29	32	31,8	
18	29	31	31,6	
19	28	31	31,0	
20	28	30	30,7	
21	28	30	29,8	
22	27	30	29,0	

Tab. č. 1 Tabulka dosažených teplot v měřených bodech.

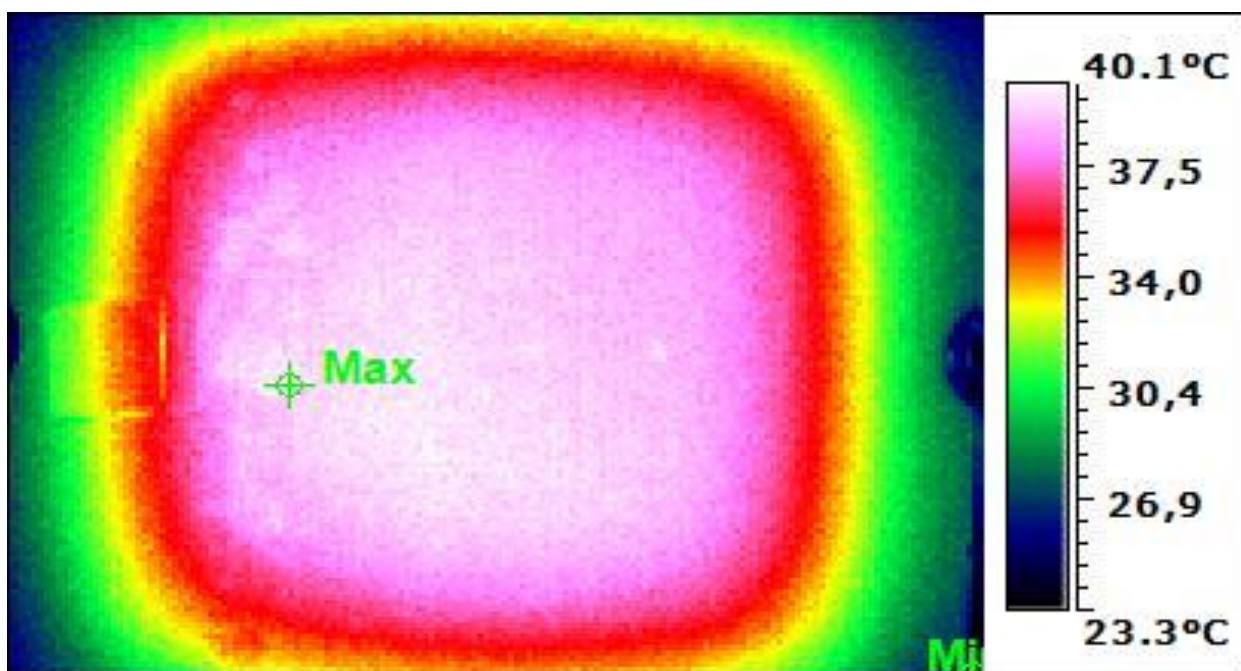


Obr. č. 9 Graf zobrazující hodnoty teplot měřených bodů po minutách.
(vodorovná osa – minuty)

Na tomto grafu je patrná přímá vzestupná teplota uvnitř vyhřívací komory po zapnutí zdroje tepla. Po dvou minutách byl zdroj vypnut, což se projevilo okamžitým poklesem obou měřených teplot a pozdějším ustálením kolem 30ti ° C. U měřené plochy termokamerou je vidět pozdější nárůst teploty po zapnutí zdroje. Po vypnutí zdroje tepla je vidět setrvačnost a opravdu pozvolné pomalé chladnutí. Co je zde zajímavé, že od 12 minuty měření chladnutí jsou teploty obou stran měřeného bloku minimálně rozdílné.

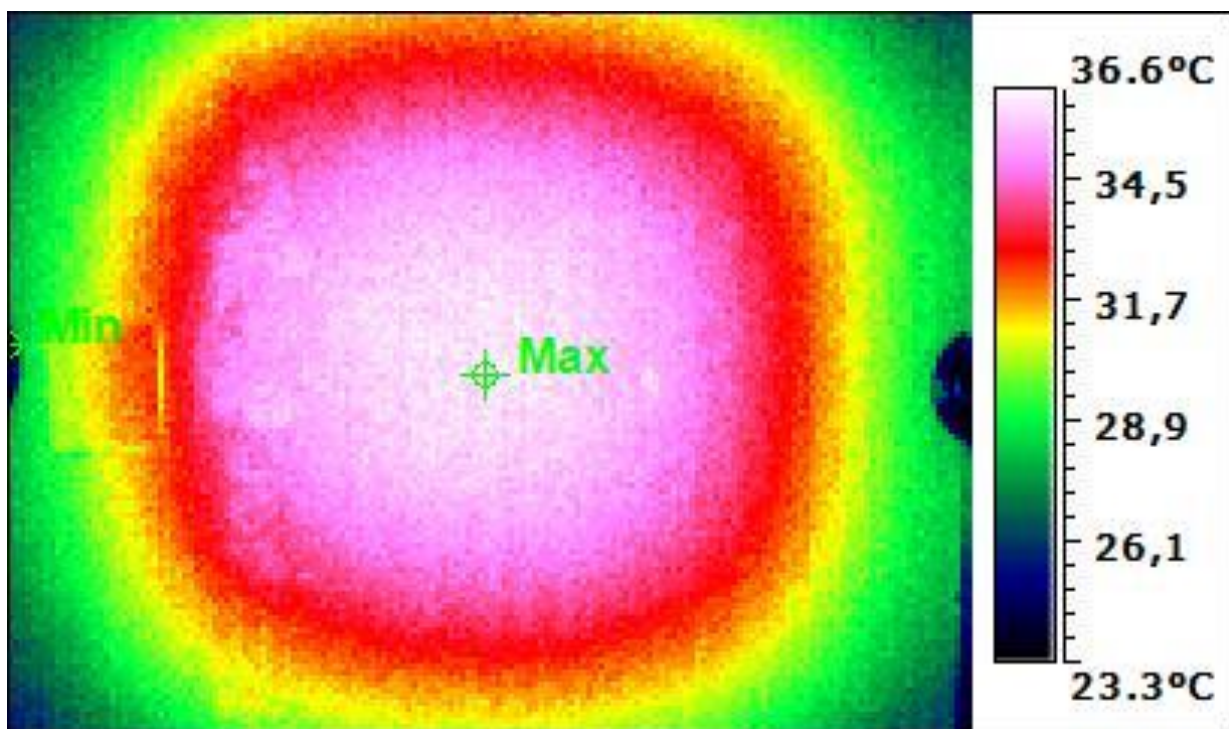


Obr. č. 10 Snímek termokamery na počátku měření.

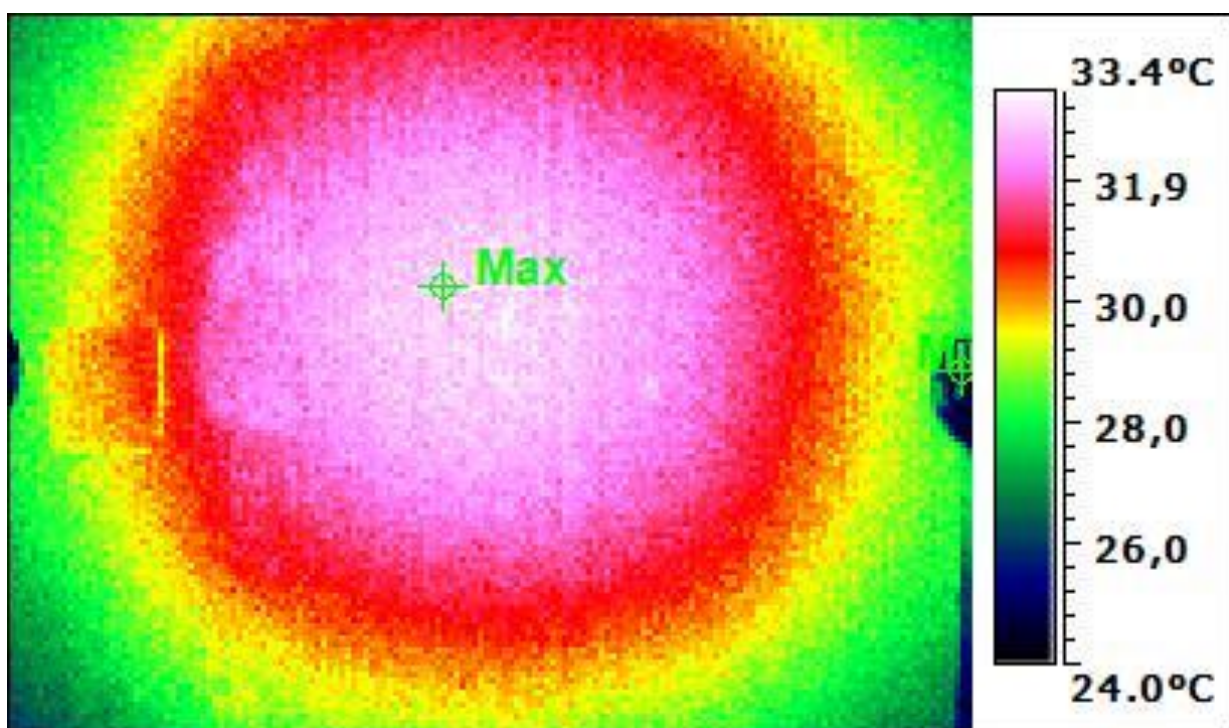


Obr. č. 11 Snímek termokamery po 5ti minutách měření.

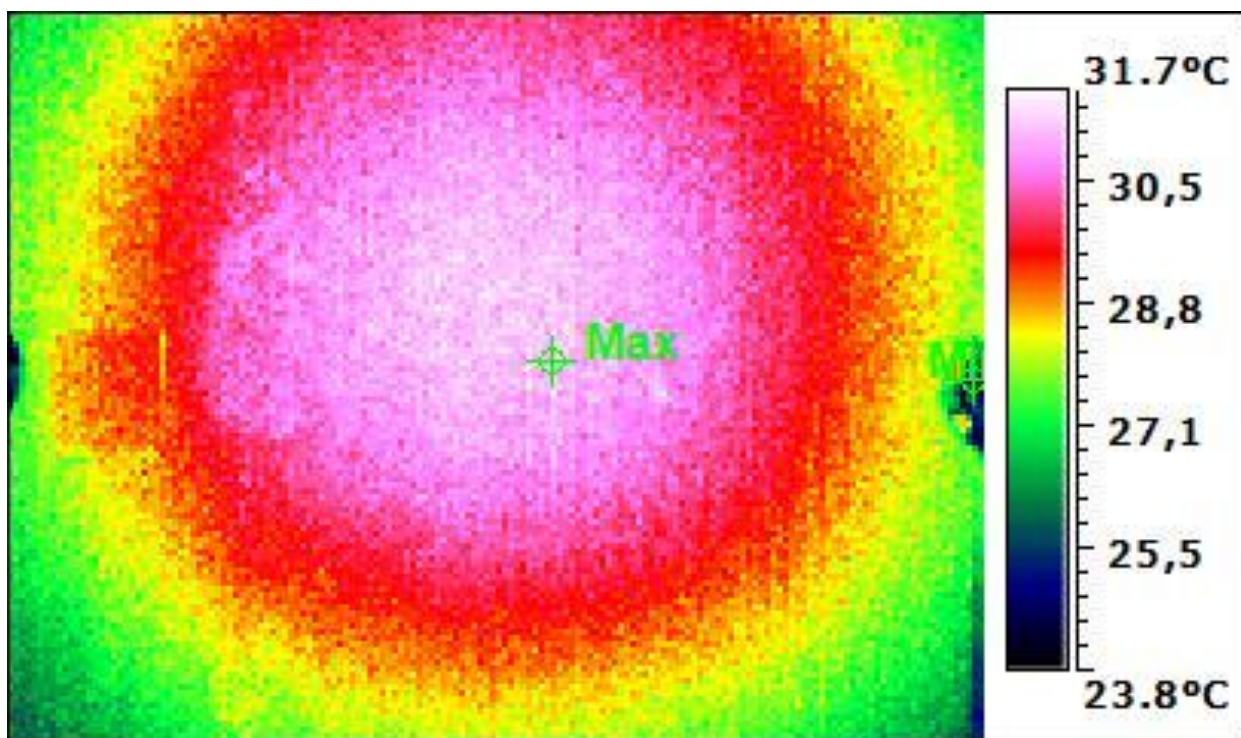
Zde je zajímavé to, že tvar obrysů teplot poměrně dobře kopíruje tvar průchodného otvoru tepla na zkušební materiál, což nemůžeme říci o následujících snímcích. Za pozornost stojí i deformace obrazu teplot v oblasti Al lepenky použité pro seřízení emisivity.



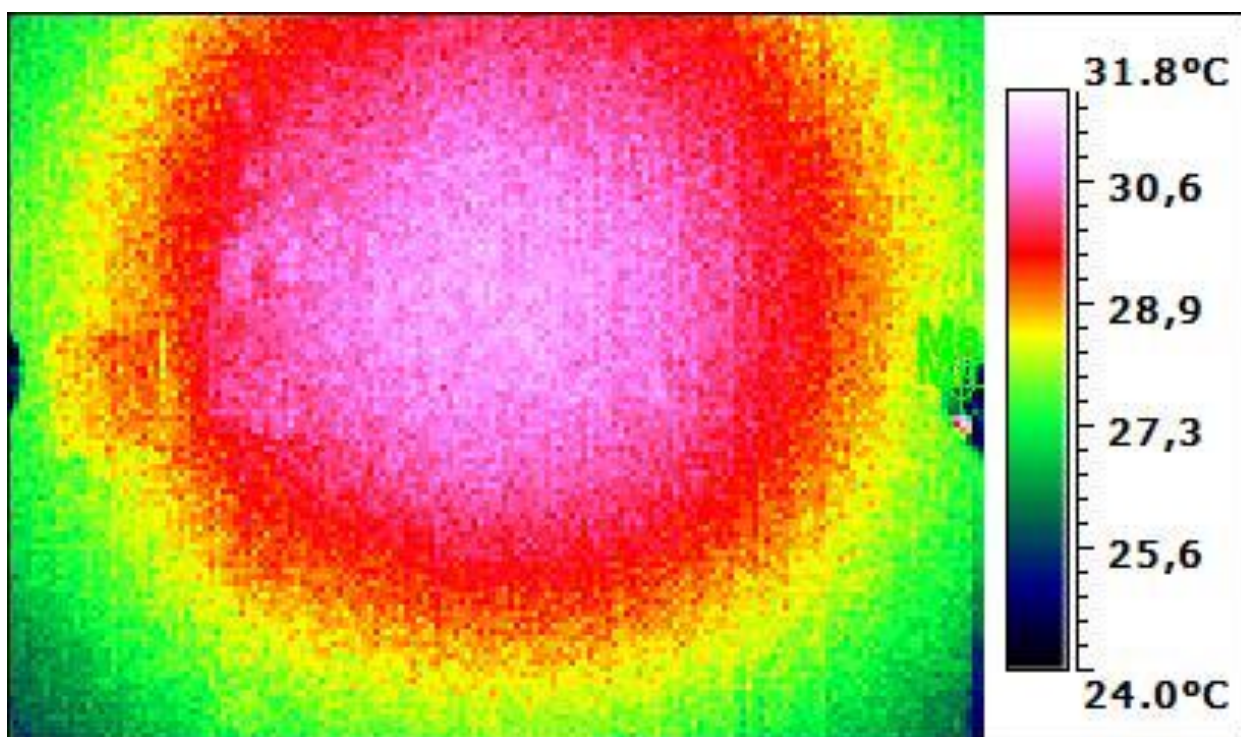
Obr. č. 12 Snímek termokamery po 10ti minutách měření.



Obr. č. 13 Snímek termokamery po 15ti minutách měření.

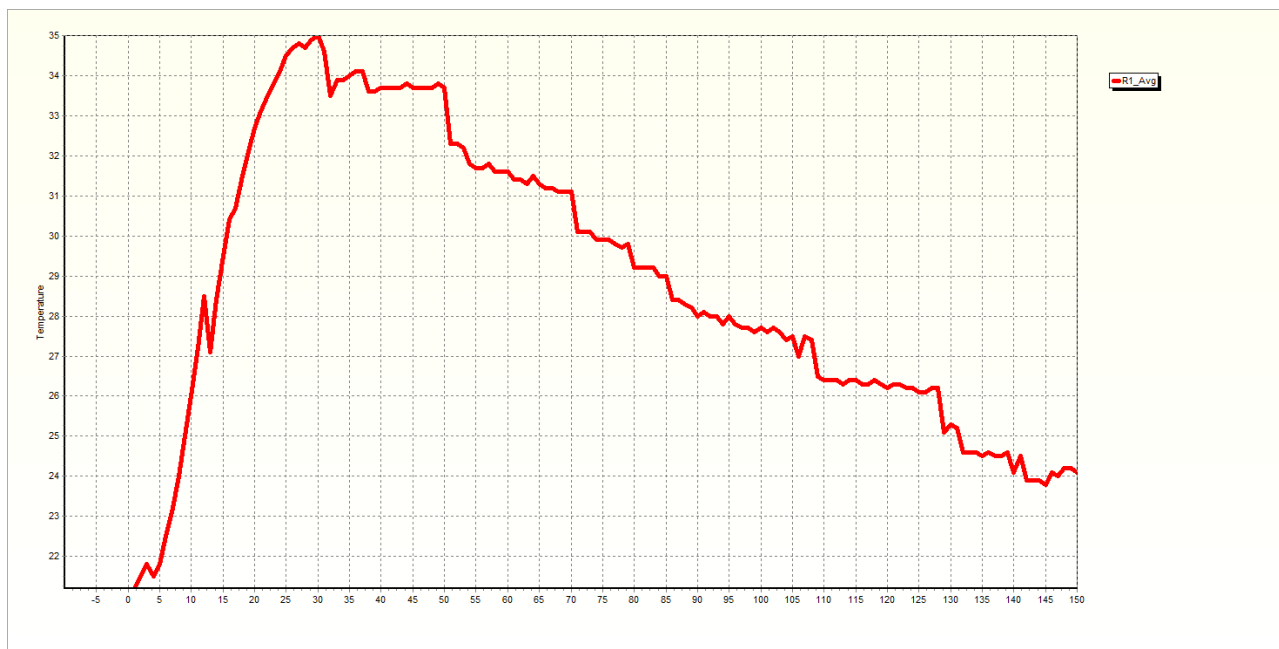


Obr. č. 14 Snímek termokamery po 20ti minutách měření.



Obr. č. 15 Snímek termokamery na konci měření.

7.2. Měřený materiál – sádrokarton klasik

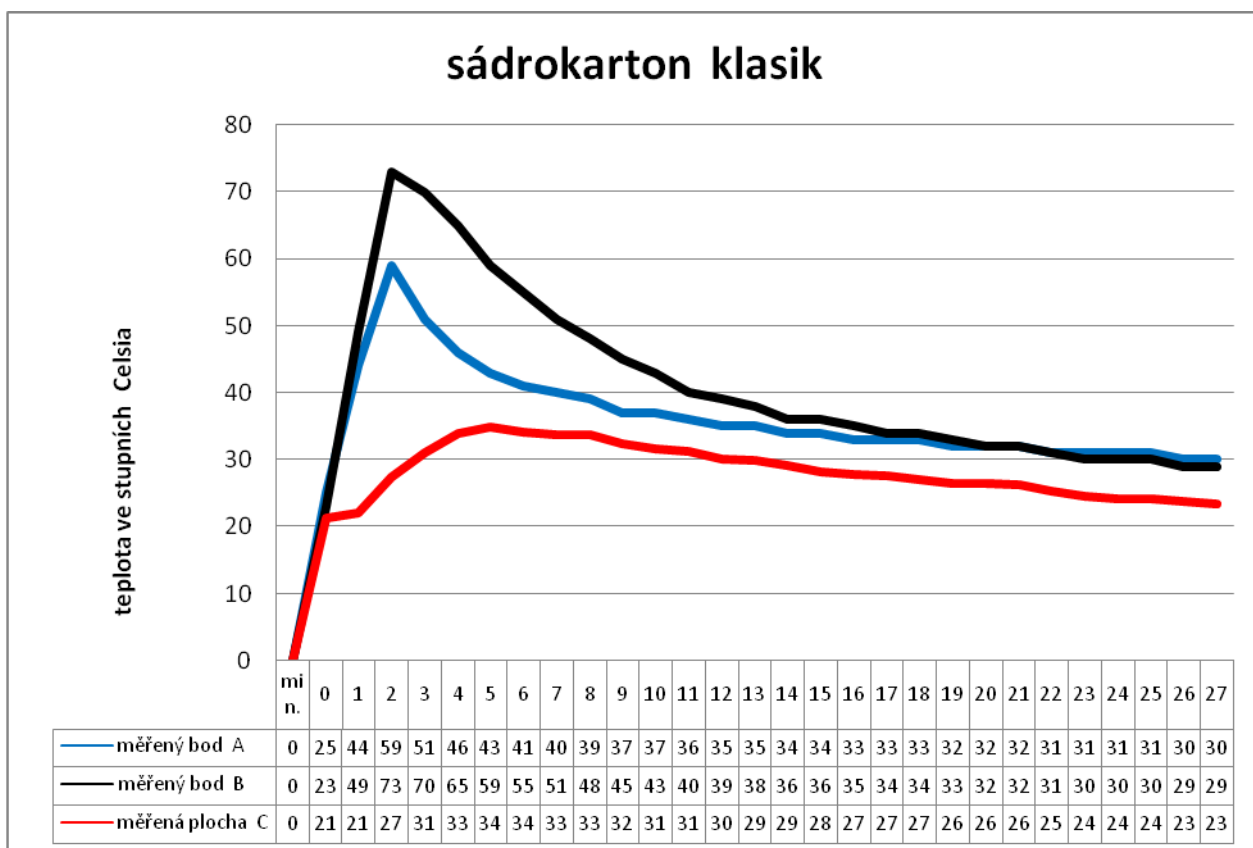


Obr. č. 16 Graf teploty měřené plochy C zaznamenáván po 10 sekundách.
(Vodorovná osa – počet měření po 10 sekundách
Svislá osa – teplota měřené plochy C ve stupních Celsia)

Zapnutí ohřevu je se zpožděním znát až po jedné minutě. Vypnutí zdroje ve dvou minutách je výrazně znázorněno poklesem teploty. Teplota uvnitř boxu ovlivnila další nárůst teploty vně měřeného materiálu. Samotné chladnutí je roztěkané a skokové, ovlivněné dvěma materiály, papír a sádra.

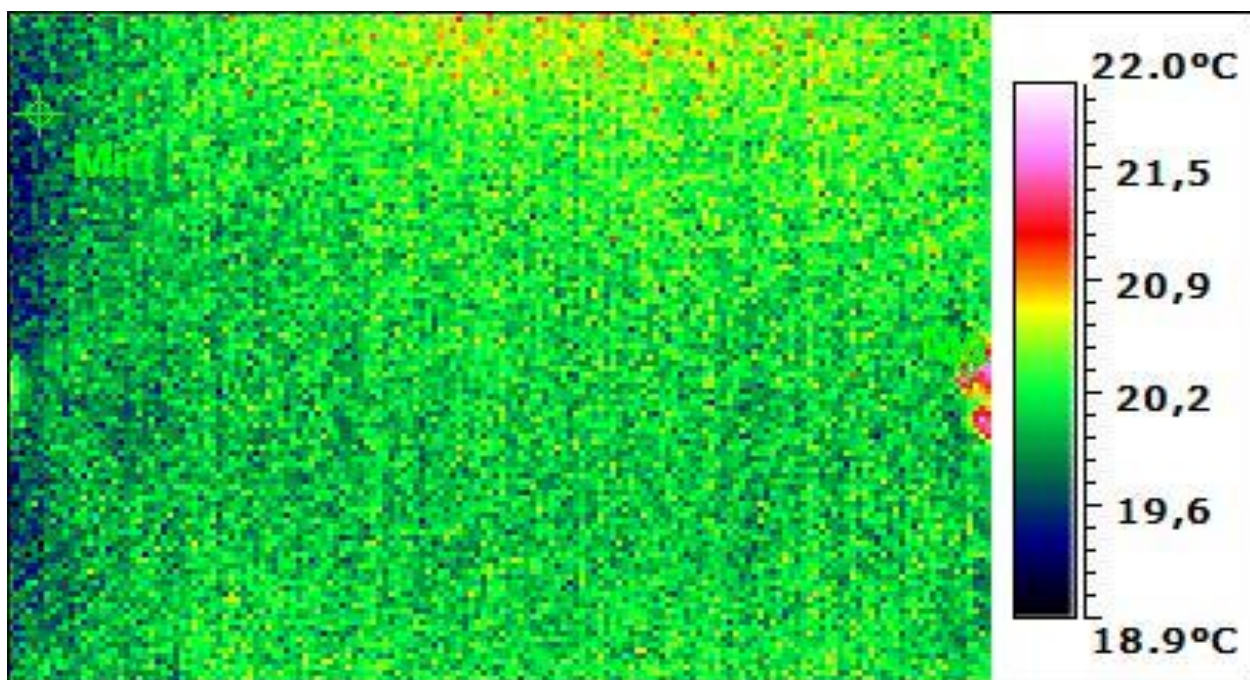
TABULKA MĚŘENÍ TERMOKAMEROU				
materiál - sádkarton klasik				
	teplota prostředí	tl. materiálu	emisivita kamery	pozn.
	21° C	13 mm	0,93	
min.	měřený bod A	měřený bod B	měřená plocha C	
0	25	23	21,2	zapnuto
1	44	49	21,9	
2	59	73	27,4	vypnuto
3	51	70	31,0	
4	46	65	33,8	
5	43	59	34,8	
6	41	55	34,0	
7	40	51	33,7	
8	39	48	33,7	
9	37	45	32,3	
10	37	43	31,6	
11	36	40	31,2	
12	35	39	30,1	
13	35	38	29,8	
14	34	36	29,1	
15	34	36	28,2	
16	33	35	27,7	
17	33	34	27,6	
18	33	34	27,0	
19	32	33	26,4	
20	32	32	26,3	
21	32	32	26,1	
22	31	31	25,2	
23	31	30	24,5	
24	31	30	24,0	
25	31	30	24,1	
26	30	29	23,7	
27	30	29	23,4	

Tab. č. 2 Tabulka dosažených teplot v měřených bodech.

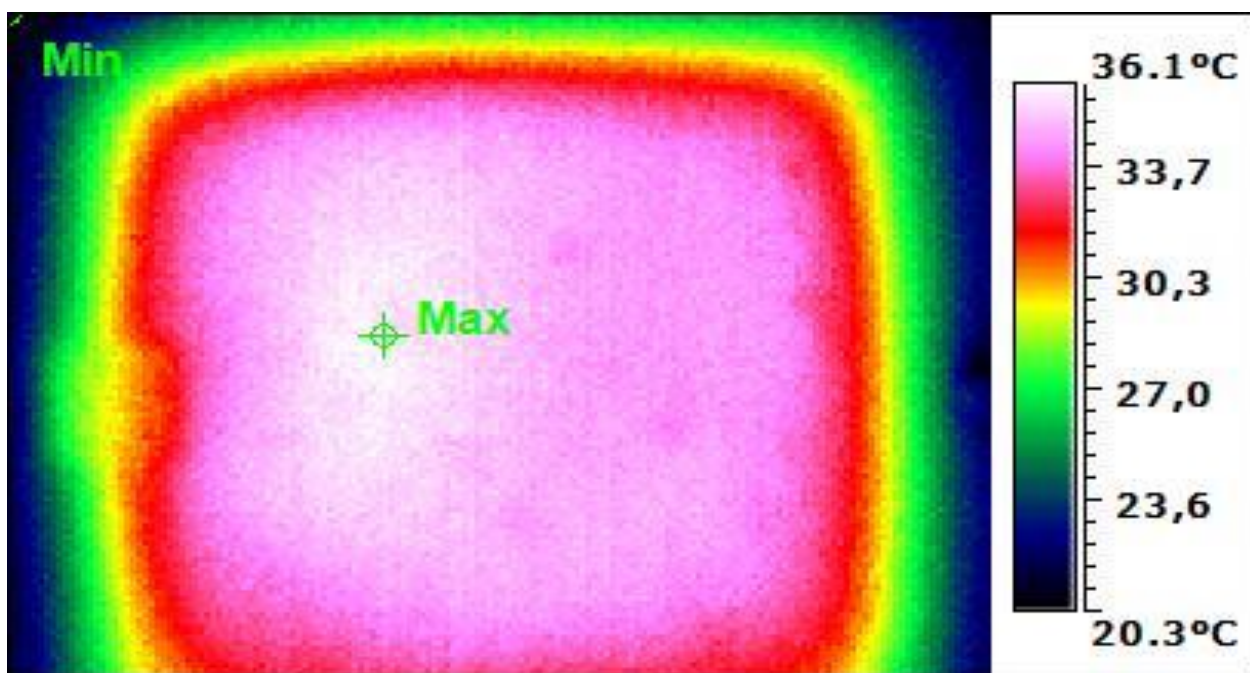


Obr.č. 17 Graf zobrazující hodnoty teplot měřených bodů po minutách.

Povrchová teplota měřená termokamerou má výrazné zpoždění co do času, ale též i do výše teploty. Tento materiál dokáže v malé míře jímat teplo a částečně se chovat jako izolant tepla. Pokles teplot při chladnutí je vždy cca. o 10 ° C než teplota ze strany zdroje tepla a během měření se obě teploty nevyrovnaly.

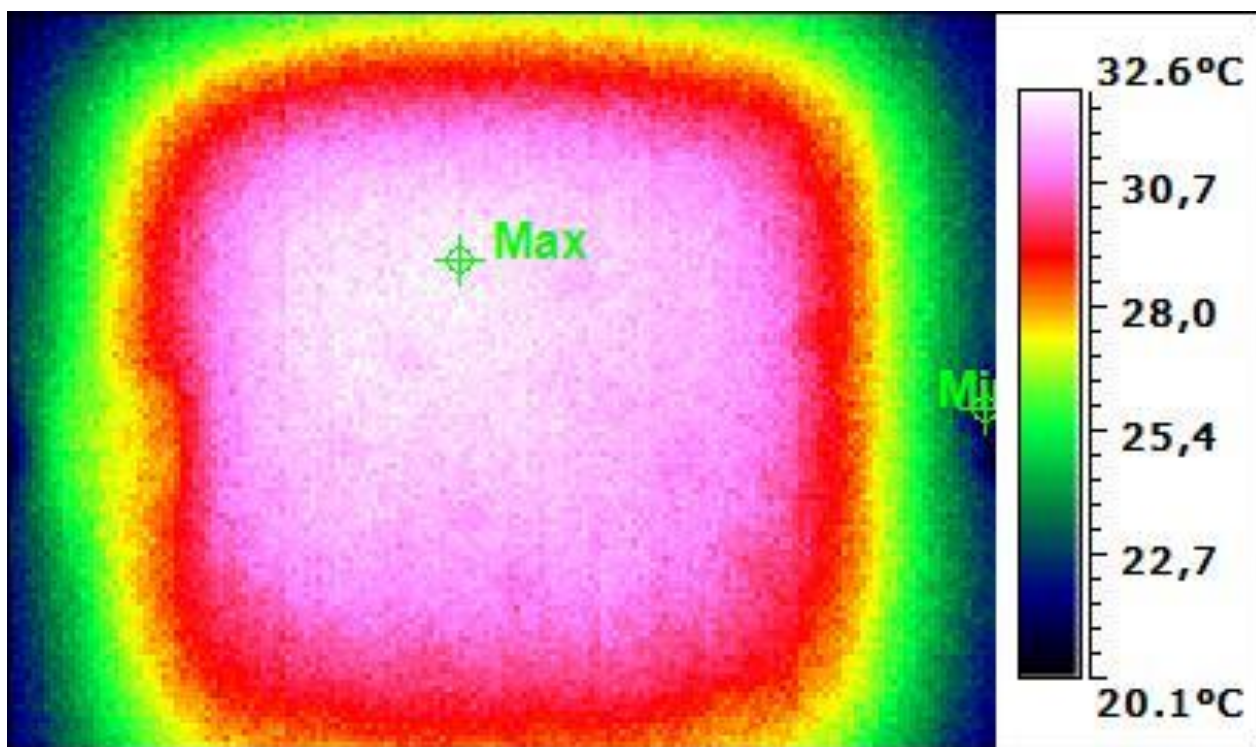


Obr. č. 18 Snímek termokamery na počátku měření.

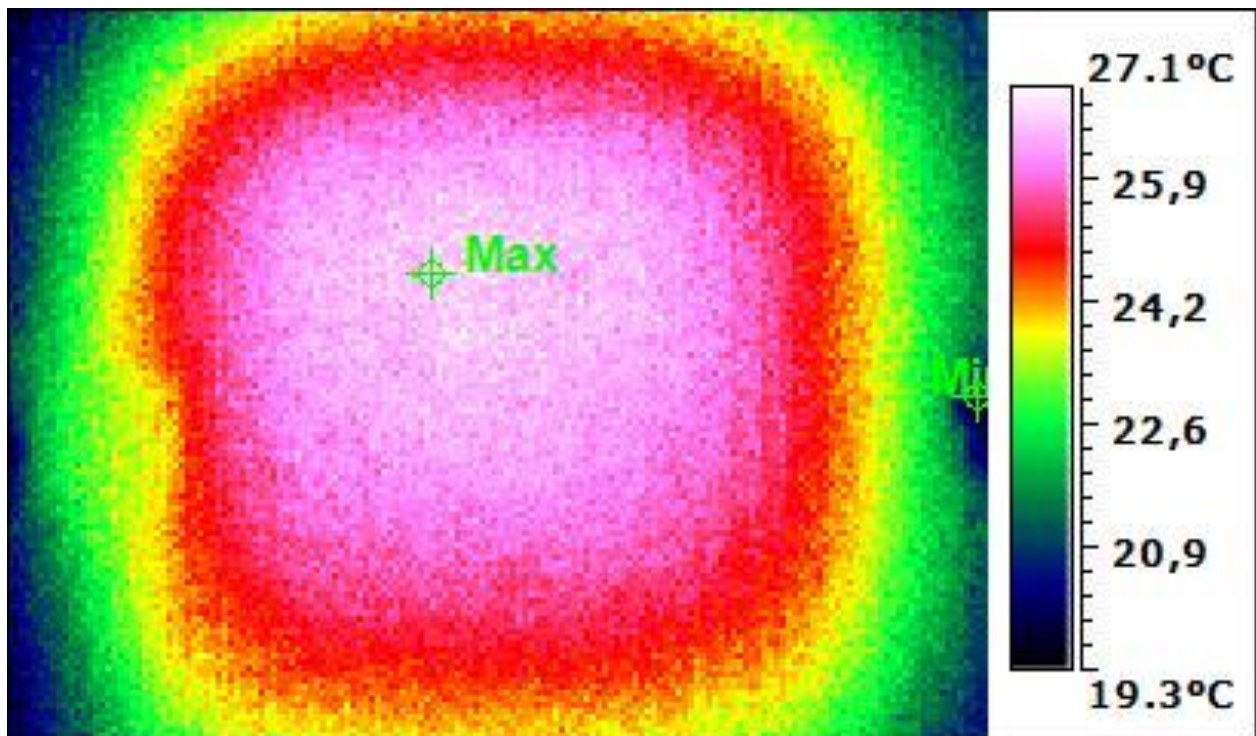


Obr. č. 19 Snímek termokamery po 5ti minutách měření.

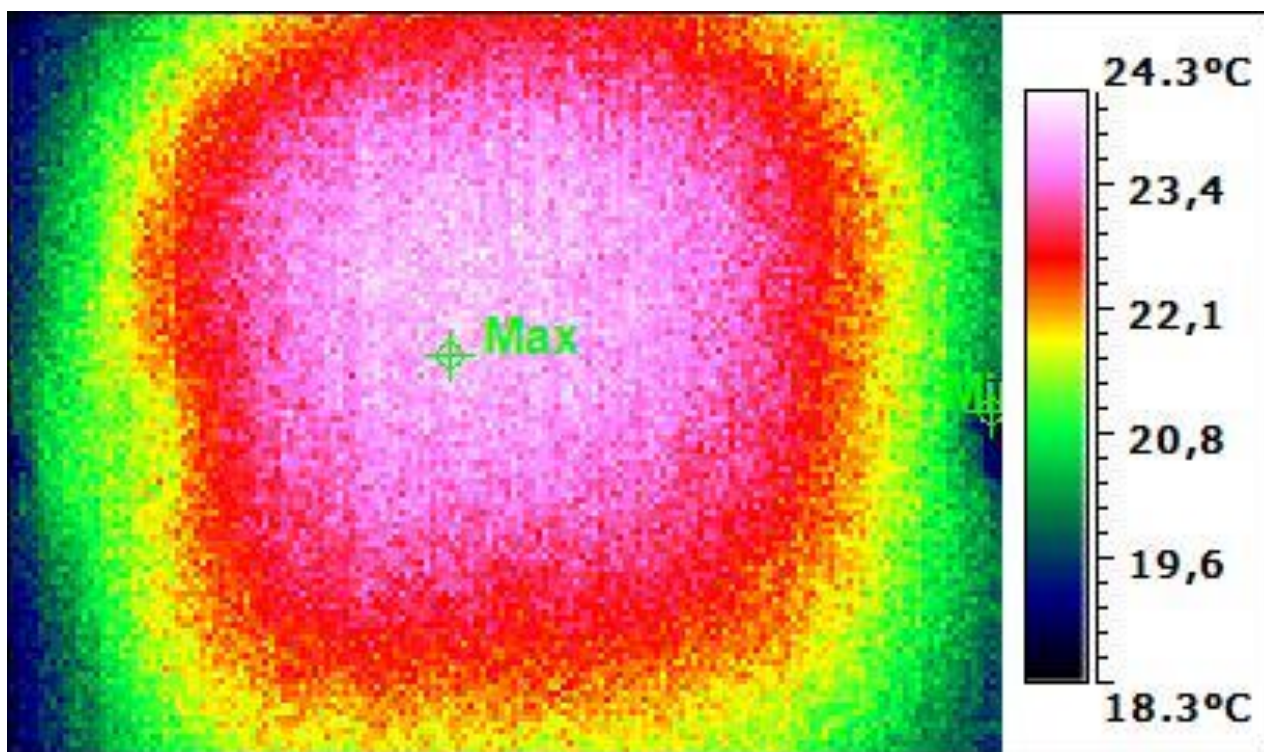
Na tomto snímku je opět vidět prostup tepla podle průchodu v boxu. Vlevo je znatelný jemný posun teplot od Al lepenky. Pozvolné chladnutí rozšiřuje širší pásma barev, tedy postupně se vyrovnávají teploty po celé ploše.



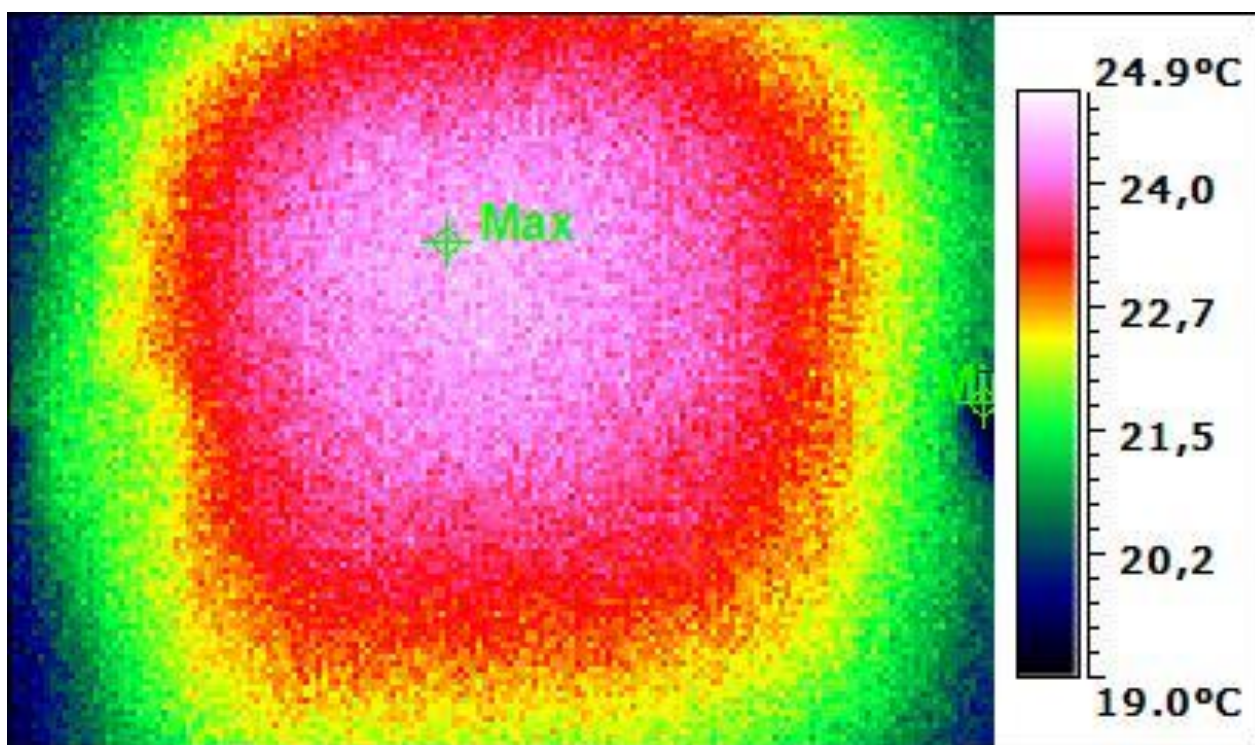
Obr. č. 20 Snímek termokamery po 10ti minutách měření.



Obr. č. 21 Snímek termokamery po 15ti minutách měření.

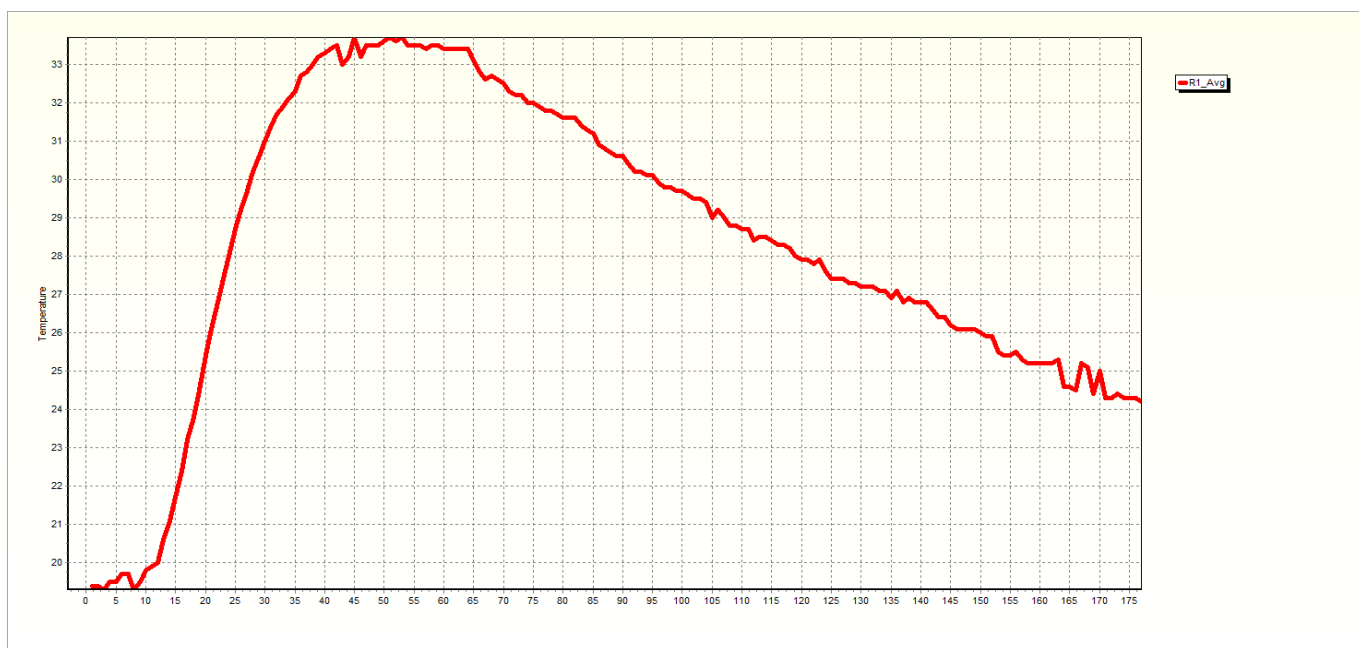


Obr. č. 22 Snímek termokamery po 20ti minutách měření.



Obr. č. 23 Snímek termokamery na konci měření.

7.3. Měřený materiál – stavební dřevotříska voděvzdorná

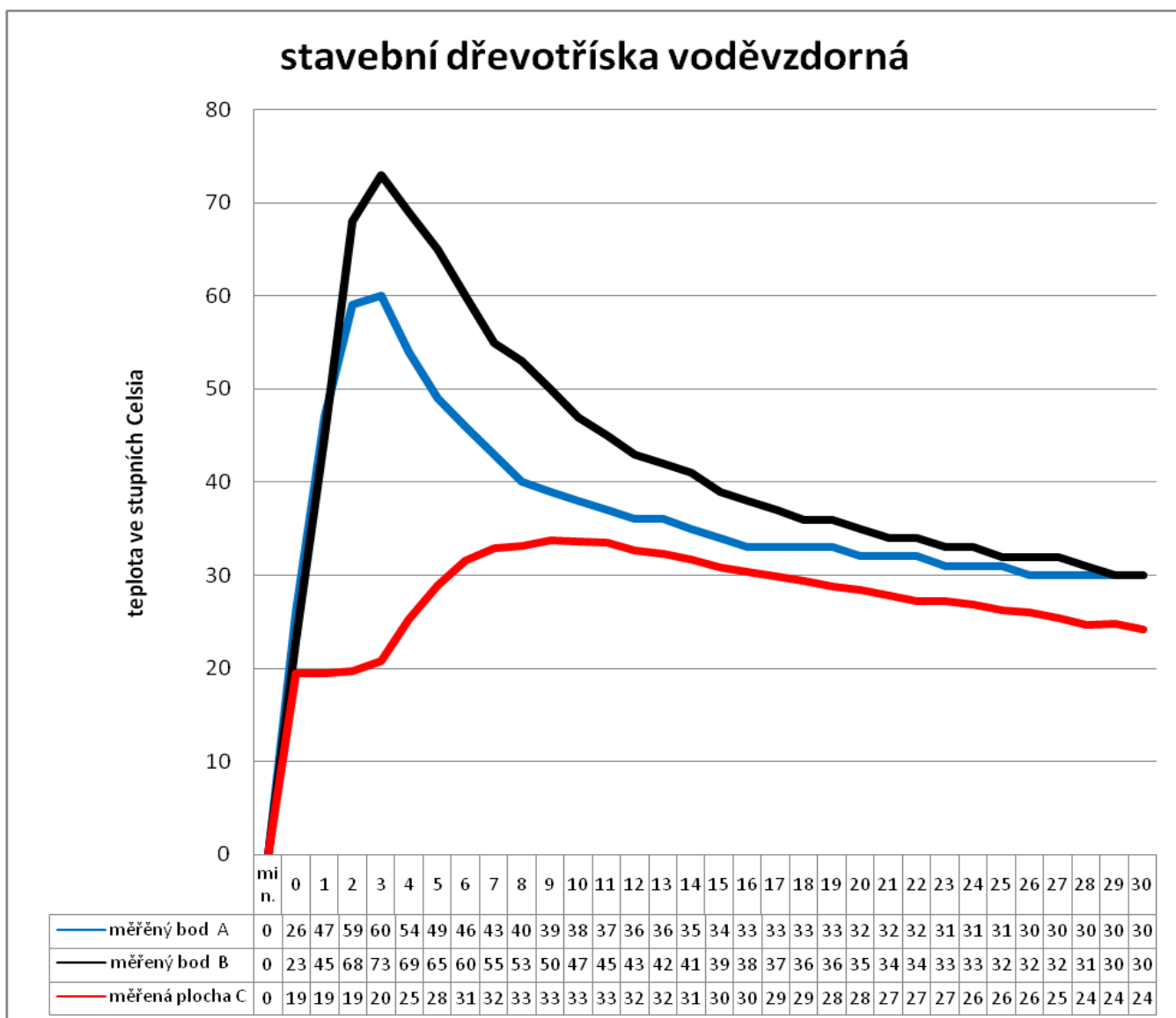


Obr. č. 24 Graf teploty měřené plochy C zaznamenáván po 10 sekundách.
(Vodorovná osa – počet měření po 10 sekundách
Svislá osa – teplota měřené plochy C ve stupních Celsia)

Po zapnutí zdroje tepla můžeme vidět velké zdržení prostupu teploty na měřenou plochu termokamerou. Prudký nárůst je zaznamenán až po vypnutí zdroje, kdy uvnitř v boxu v bodě B je teplota nad 70 °C. Vrchol nejvyšší teploty není ostrý, ale velmi oblý. Pokles teploty začíná až po desáté minutě měření a je poměrně klidný a pozvolný. Skokové chladnutí se projevilo až v závěru měření, kdy se dosáhla teplota 25 °C.

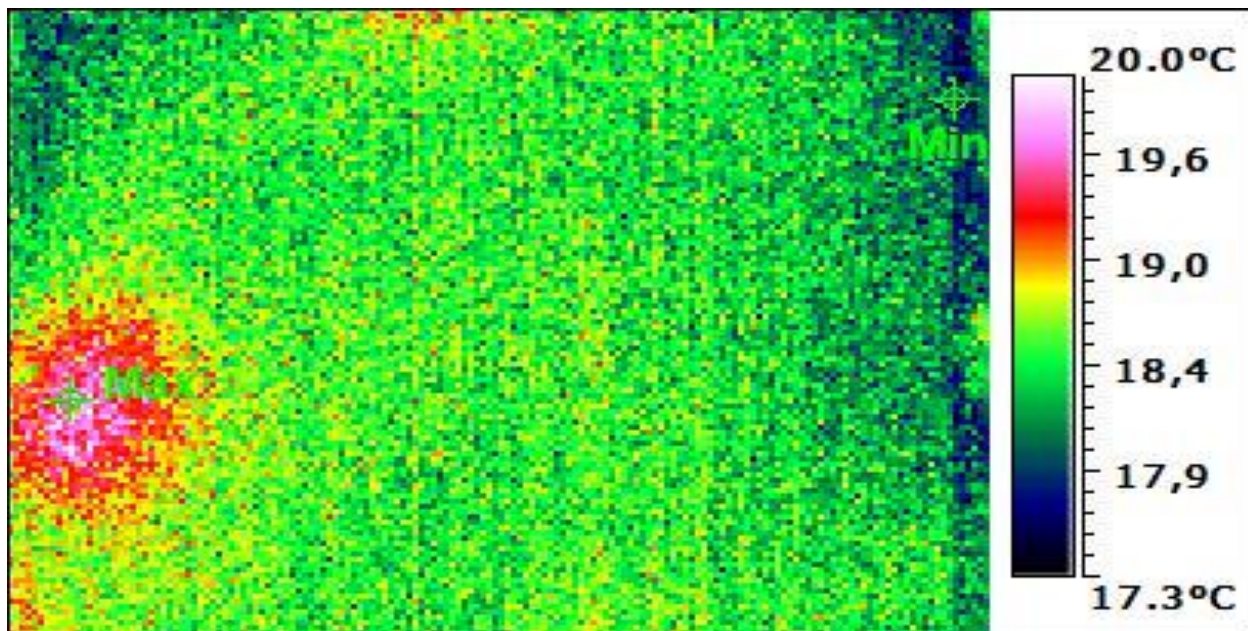
TABULKA MĚŘENÍ TERMOKAMEROU				
materiál - stavební dřevotříska voděvzdorná				
	teplota prostředí	tl. materiálu	emisivita kamery	pozn.
	21° C	13 mm	0,93	
min.	měřený bod A	měřený bod B	měřená plocha C	
0	26	23	19,5	zapnuto
1	47	45	19,5	
2	59	68	19,7	vypnuto
3	60	73	20,8	
4	54	69	25,2	
5	49	65	28,9	
6	46	60	31,5	
7	43	55	32,9	
8	40	53	33,1	
9	39	50	33,7	
10	38	47	33,6	
11	37	45	33,4	
12	36	43	32,6	
13	36	42	32,2	
14	35	41	31,7	
15	34	39	30,8	
16	33	38	30,3	
17	33	37	29,8	
18	33	36	29,4	
19	33	36	28,7	
20	32	35	28,4	
21	32	34	27,8	
22	32	34	27,2	
23	31	33	27,2	
24	31	33	26,8	
25	31	32	26,2	
26	30	32	26,0	
27	30	32	25,4	
28	30	31	24,7	
29	30	30	24,8	
30	30	30	24,2	

Tab. č. 3 Tabulka dosažených teplot v měřených bodech.

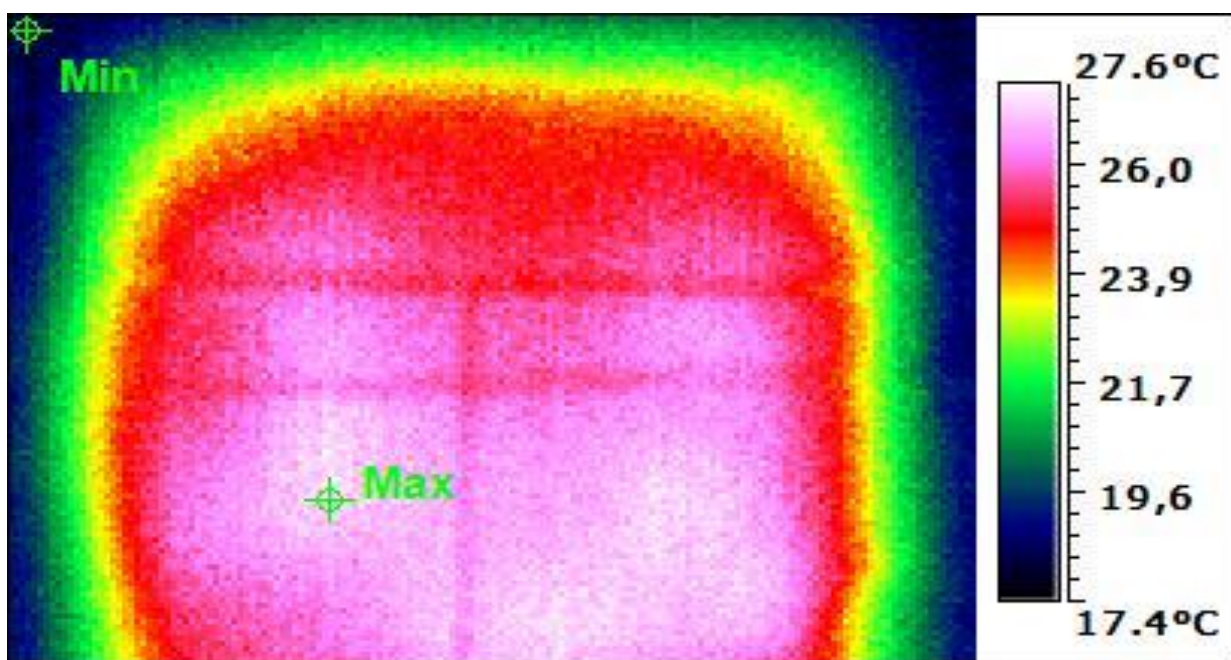


Obr.č. 25 Graf zobrazující hodnoty teplot měřených bodů po minutách.

Na grafu je zobrazen současný nárůst teplot uvnitř boxu. Za to plocha C má velké zpoždění, až ve třetí minutě počne stoupat její průměrná teplota. V tento čas prudce klesá teplota v boxu a obě teploty A i B se v závěru měření vyrovnají. Plocha sledovaná termokamerou pomalu bez dramatických výkyvů chladne, až v závěru jsou vidět drobné výkyvy.

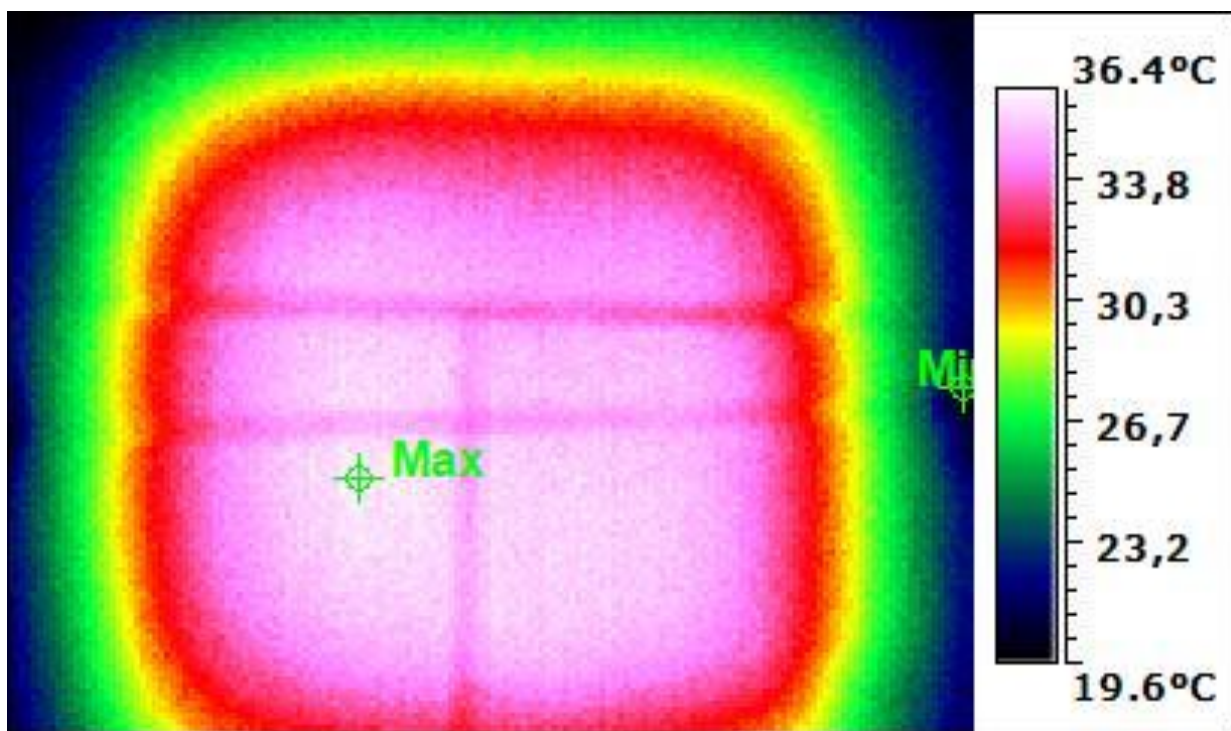


Obr. č. 26 Snímek termokamery na počátku měření.

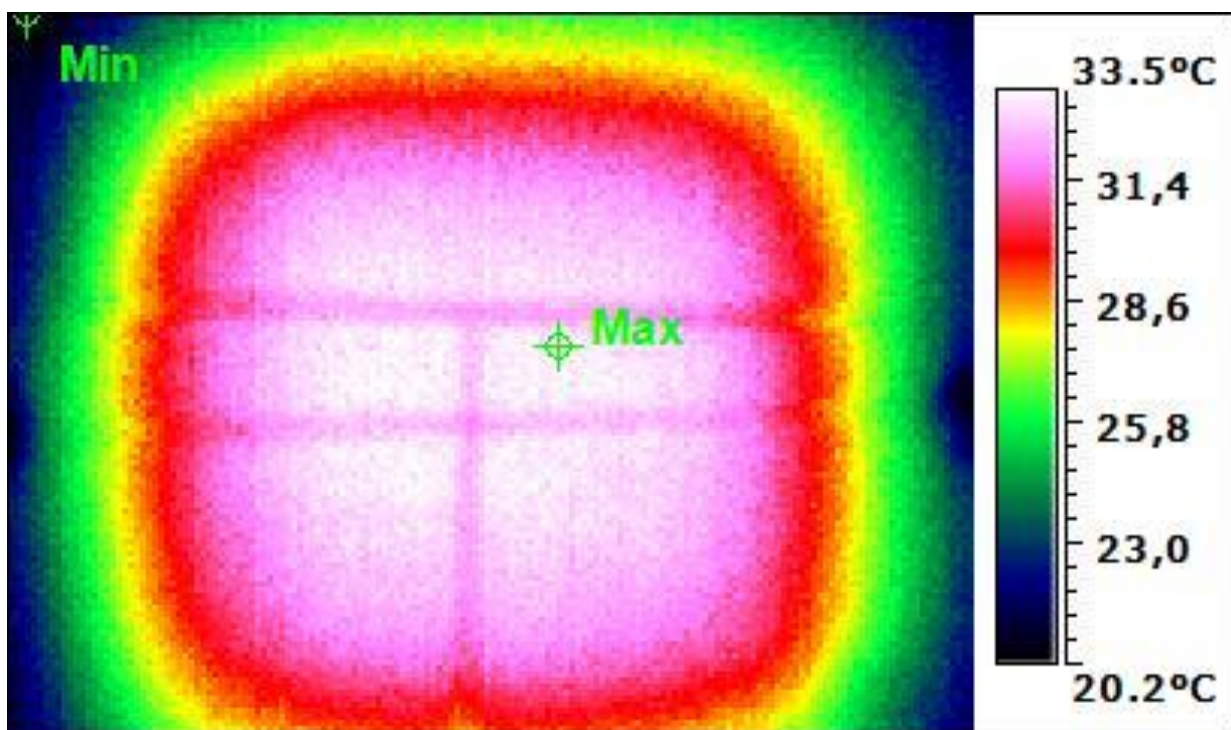


Obr. č. 27 Snímek termokamery po 5ti minutách měření.

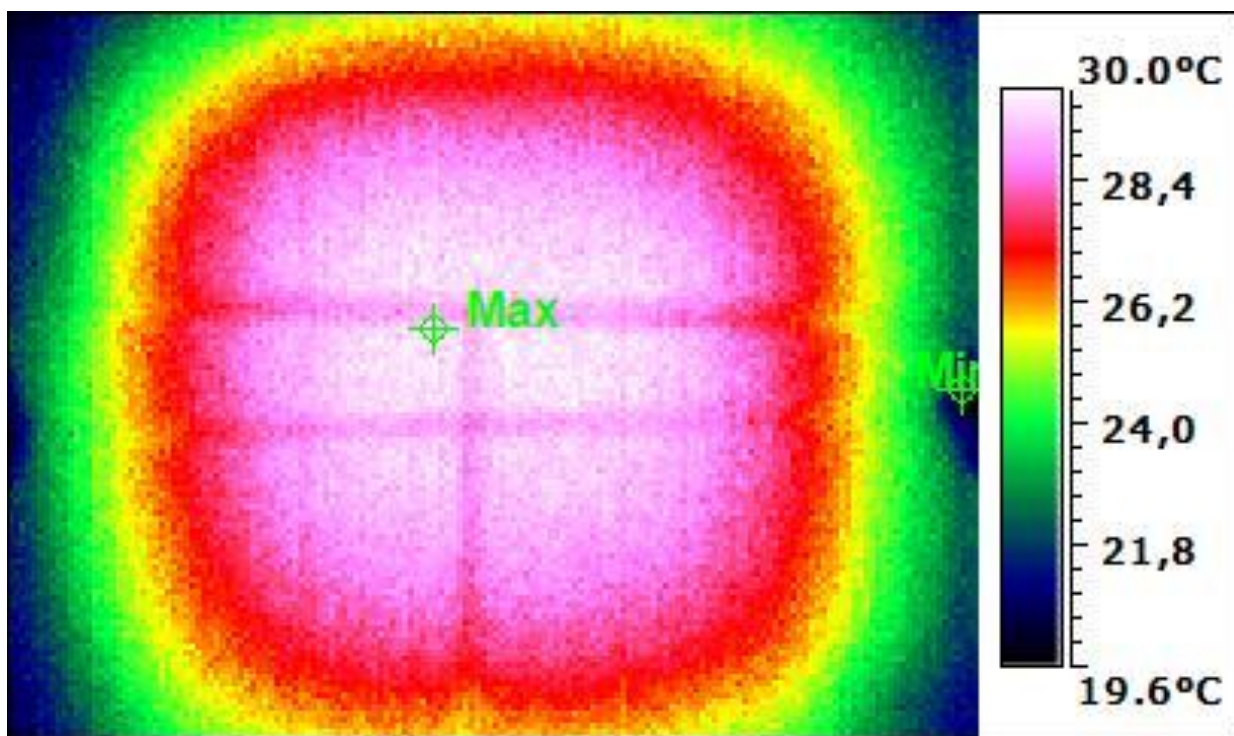
Snímek dokazuje nižší povrchovou teplotu než u předcházejících materiálů. Povrch byl již od výrobce matně černý, bohužel jsou vidět vygumované čáry od obyčejné tužky, které mají rozdílnou emisivitu. U následujících snímků je rozpoznat při chladnutí nejmenší rozptyl barev teplot u tohoto materiálu, to znamená, že tento materiál má při chladnutí nejmenší rozdíly teplot na povrchu snímaném termokamerou.



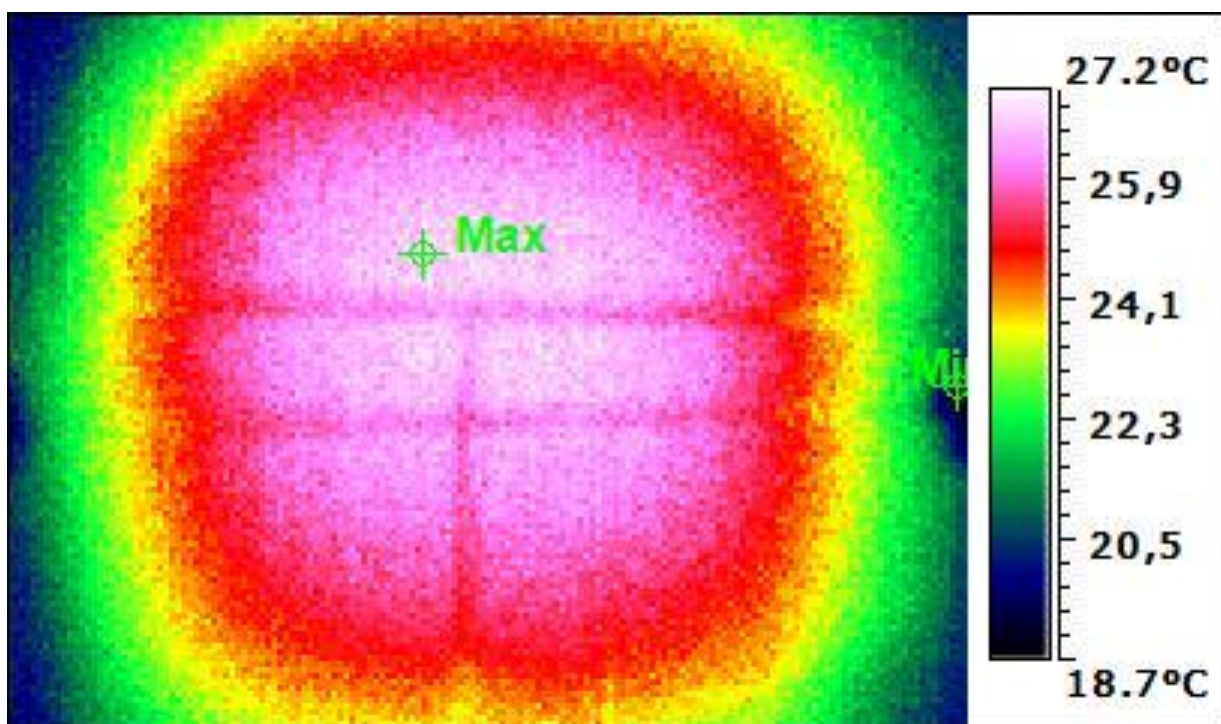
Obr. č. 28 Snímek termokamery po 10ti minutách měření.



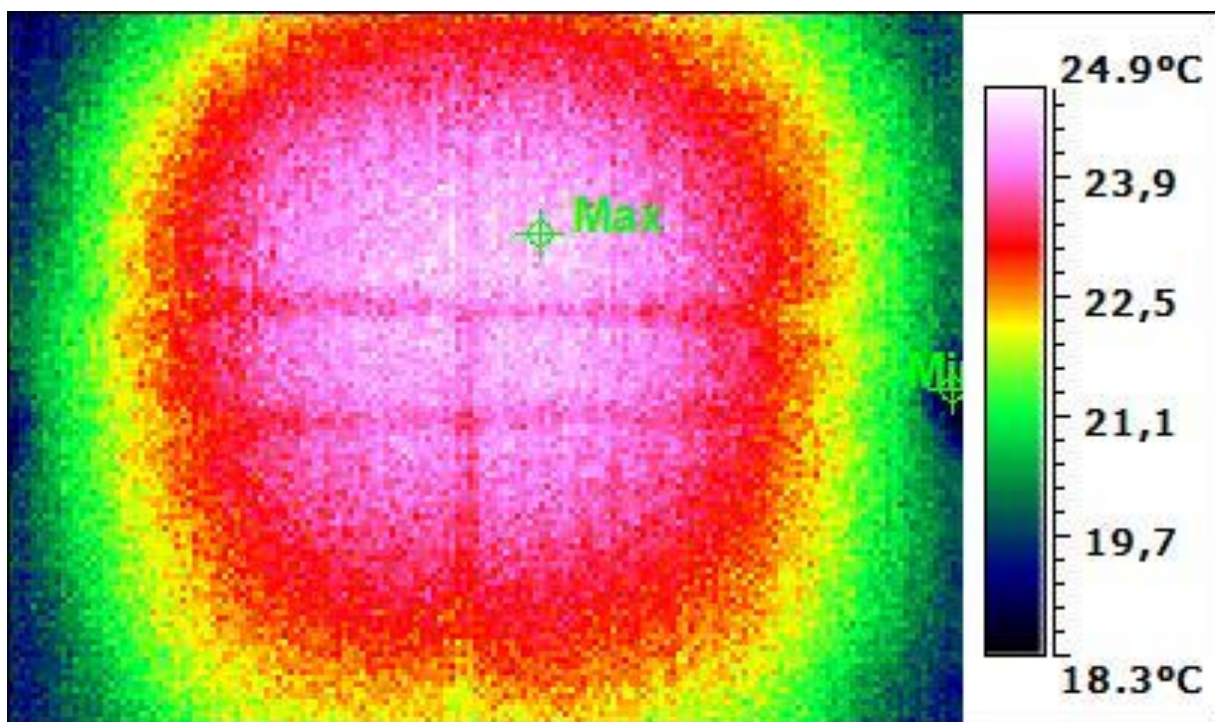
Obr. č. 28 Snímek termokamery po 15ti minutách měření.



Obr. č. 29 Snímek termokamery po 20ti minutách měření.



Obr. č. 30 Snímek termokamery po 25ti minutách měření.



Obr. č. 31 Snímek termokamery na konci měření.

Závěr.

Výše vybrané tři materiály jsou zástupci materiálové škály, která se nejčastěji vyskytují ve stavebnictví. Každý materiál se chová různě ve stejných podmínkách. Keramika je materiálem z hlediska tepelné jímavosti z použitých vzorků největší. Opakem keramiky je dřevotříska. Sádrokarton se pohybuje svými parametry někde mezi keramikou a dřevotřískou. Tepelná jímavost a vodivost rozhodují o přijímání a akumulaci tepla. Z hlediska tepelné izolace je dřevotříska nejlepším izolantem, pak následuje sádrokarton a keramika. Nejrychlejší vzrůst teploty v bodě B byl u keramiky, pak sádrokartonu a dřevotřísky. Nejnižší teploty chladnutí za měřený čas dosáhl sádrokarton, pak dřevotříska a keramika.

Tato bakalářská práce je návodem pro použití termokamery pro monitorování stavu strojů a zařízení v každém oboru činnosti člověka. Lze využít pro vyhledávání a digitalizování odchylky od normálního stavu. Tyto odchylky jsou obvykle způsobeny např. nedostatečným mazáním či chlazením. V elektrotechnice velkým přechodovým odporem nebo abnormálně namáhanou součástíou.

[6] Infračervená termografie je založena na měření rozložení vyzařované tepelné energie emitovaného z povrchu měřeného objektu a na její konverzi na mapu rozdílů v intenzitě záření vzniká tak zvaný termogram.

Pracovník provádějící toto měření musí disponovat znalostmi o teple, teplotách a o různých druzích přenosu tepla, což jsou základní předpoklady pro práci v oboru termografie.

Tepelná energie je přítomna při provozu všech strojů. Může vznikat při tření, projevovat se ve formě energetických ztrát nebo může být součástí procesu zpracování, případně může jít o kombinace předchozích. Výsledkem je, že teplotu lze použít jako klíčový parametr pro monitorování výkonu strojů, stavu strojů a pro diagnostiku problémů strojů. Pro takové monitorování teploty je ideální technologií infračervená termografie, protože poskytuje kompletní tepelný obraz stroje nebo strojní součásti a to bezkontaktně, kdy většinou také vyžaduje jen minimální přípravu a výsledky poskytuje ve velmi krátkém čase.

Infračervená technologie je přínosem, ale má také svá omezení v případech měření objektů s velmi nízkou emisivitou povrchu, kdy může být výsledná hodnota zatížena nepřijatelnou chybou v měření termokamerou. [6]

Použitá literatura.

- [1] Zdeněk Frank, Hlídače teploty, Silnoproudé rozvody, r.č.CZ.1.07/1.1.10/01.0015, SOSE, COP Hluboká nad Vltavou, 2011
- [2] 10. Vyzařování těles v infračervené oblasti
euler.fd.cvut.cz/new/ctrl.php?act=show,file,873
- [3] <http://www.imaterialy.cz/image-cache/max-600x280/156-image>
- [4] Jiří ADÁMEK, Bohumil NOVOTNÝ a Jan KOUKAL. FAKULTA STAVEBNÍ VUT BRNO. *Stavební materiály*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1997. ISBN 80-214-0631-3.
- [5] <http://www.guide-infrared.cz/termokamery-rucni/termokamera-guide-m8>
- [6] Česká technická norma, Monitorování stavu a diagnostika strojů – -termografie, Část 1: Všeobecné postupy, ČSN ISO 18434-1, UNMZ Praha, 2009