

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

David Mlejnek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NÁVRH BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ LÁVY Z VYSOKÉ PECE.

DESIGN OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT METHOD FOR BLAST FURNACE LAVA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Mlejnek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Fialka, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: David Mlejnek

ID: 230135

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh bezkontaktní metody měření lávy z vysoké pece.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je nastudování problematiky bezkontaktního měření teploty, provedení průzkumu trhu v oblasti bezkontaktního měření vysokých teplot a vytvoření podrobného srovnání jednotlivých snímačů. Na základě získaných teoretických poznatků navrhnout úpravu měřicího systému teploty lávy vytékající z vysoké pece, která je dále využívána při výrobě minerální vlny ve firmě ISOVER (Saint-Gobain) v Častolovicích.

1. Provést literární průzkum v oblasti bezkontaktního měření teploty se zaměřením na základní poznatky o záření, koncept absolutně černého tělesa, měření teploty reálných povrchů, vliv emisivity, pyrometry atd.
2. Provést průzkum trhu v oblasti výrobců průmyslových snímačů a měřicích systémů pro bezkontaktní měření vysokých teplot. Na základě tohoto průzkumu vytvořit přehledné srovnání hlavních parametrů jednotlivých používaných principů, technologických řešení, výrobců atd.
3. Realizovat zkušební měření v laboratoři s předloženou sadou infračervených snímačů. Pomocí referenčního černého tělesa ověřit přesnost snímačů, vliv emisního součinitele a vliv zorného pole snímače.
4. Popsat současný stav řešení měření teploty lávy při výtoku z vysoké pece a okolní podmínky v blízkosti pece. Definovat požadavky zadávající firmy na změny pro bezkontaktní měření teploty lávy v provozu.
5. Na základě průzkumu trhu a požadavků firmy ISOVER navrhnout a popsat vhodné řešení bezkontaktního měření teploty lávy vytékající z vysoké pece s ohledem na hutní podmínky ve výrobě.
6. Provést zhodnocení zvoleného řešení pro bezkontaktní měření teploty lávy, jeho výhody a případné nevýhody oproti původnímu systému měření teploty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. 1. vyd., 153 s., Praha: BEN, 2005.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jiří Fialka, Ph.D.

Konzultant: Jan Kaplan (Vedoucí automatizace - ISOVER)

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá teoretickým návrhem systému pro bezkontaktní měření teploty lávy vytékající z vysoké pece pro továrnu firmy Isover (Saint-Gobain) v Častolovicích. V úvodní části práce je proveden teoretický rozbor o elektromagnetickém záření, infračervené části elektromagnetického spektra. Navazující části práce se zaměřují na popis pracoviště s vysokou pecí, kde má být teoreticky navržen nový bezkontaktní systém měření teploty, popis současného systému měření teploty, průzkum trhu s bezkontaktními snímači teploty a návrh nového systému bezkontaktního měření teploty lávy.

Klíčová slova

bezkontaktní měření teploty, elektromagnetické záření, infračervené záření, emisivita, pyrometr, termokamera

Abstract

The Bachelor Thesis focuses on theoretical design of the system for contactless measurement of temperature of lava flowing out of the blast furnace for the factory of the company Isover (Saint-Gobain) in Častolovice. The initial part of the Thesis contains the theoretical analysis on electromagnetic radiation, infrared light of electromagnetic spectrum and experimental temperature measurement using contactless meters. The subsequent parts of the Thesis focus on description of the blast furnace workplace where the theoretical design of the new contactless system of temperature measurement shall take place, description of the current temperature measurement system, research of the contactless temperature sensor market and a design of the new system of contactless measurement of lava temperature.

Keywords

contactless temperature measurement, electromagnetic radiation, infrared radiation, emissivity, pyrometer, thermal camera

Bibliografická citace

MLEJNEK, David. *Návrh bezkontaktní metody měření lávy z vysoké pece*. [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159881>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Jiří Fialka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *David Mlejnek*

VUT ID studenta: *230135*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2023/24*

Téma závěrečné práce: *Návrh bezkontaktní metody měření lávy z vysoké pece.*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 21. května 2024

podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Fialkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, za jeho cenné konzultace a podporu, při vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Janu Kaplanovi za praktické a věcné rady a za svůj čas, který mi věnoval. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině, která mě vždy v těžkých chvílích podržela a bez které bych se při studiu na vysoké škole nedostal takto daleko.

V Brně dne: 21. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. TEORETICKÉ ZÁKLADY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty	13
1.1 HISTORIE ZKOUMÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.....	13
1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ.....	14
1.3 KONCEPT ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA.....	15
1.3.1 <i>Příklad absolutně černého tělesa, Slunce</i>	16
1.3.2 <i>Příklad absolutně černého tělesa, dutina se štěrbinou</i>	17
1.4 VYZAŘOVÁNÍ ABSOLUTNĚ ČERNÝCH TĚLES	17
1.4.1 <i>Stefanův-Boltzmannův zákon</i>	17
1.4.2 <i>Wienův posunovací zákon</i>	18
1.4.3 <i>Planckův radiační zákon</i>	19
1.5 MĚŘENÍ TEPLoty NA REÁLNÉM POVRCHU	19
1.6 PYROMETRY	21
1.6.1 <i>Širokopásmové pyrometry</i>	21
1.6.2 <i>Úzkopásmové pyrometry</i>	21
1.6.3 <i>Poměrové pyrometry</i>	21
1.7 LINESCANNERY	22
1.8 TERMOGRAFIE	22
2. SOUČASNÁ ŘEŠENÍ MĚŘENÍ TEPLoty VÝTOKU LÁVY A EMISIVITA ROZTAVENÉHO ČEDIČE	24
2.1 MĚŘENÍ TEPLoty ROZTAVENÉHO ŽELEZA	24
2.2 MĚŘENÍ TEPLoty ROZTAVENÉHO ŽELEZA S APLIKOVANOU UMĚLOU NEURONOVOU SÍTÍ	27
2.3 EMISIVITA ROZTAVENÉHO ČEDIČE.....	29
3. PRŮZKUM TRHU V OBLASTI BEZKONTAKTNÍCH TEPLotNÍCH SNÍMAČŮ	32
3.1 PRŮZKUM TRHU V OBLASTI PYROMETRŮ.....	32
3.2 PRŮZKUM TRHU V OBLASTI LINESCANNERŮ	33
3.3 PRŮZKUM TRHU V OBLASTI TERMOKAMER.....	34
4. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ SE SADOU INFRAČERVENÝCH SNÍMAČŮ	36
4.1 SADA SNÍMAČŮ.....	36
4.2 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI SNÍMAČŮ NA REFERENČNÍM ČERNÉM TĚLESU	39
4.3 MĚŘENÍ Vlivu EMISIVITY.....	40
4.4 MĚŘENÍ Vlivu ZORNÉHO POLE SNÍMAČE.....	41
4.5 MĚŘENÍ Vlivu ROZDÍLNÉ EMISIVITY MATERIÁLŮ	45
5. POPIS PRACOVIŠTĚ VYSOKÉ PECE A SOUČASNÉ ŘEŠENÍ BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty VÝTOKU LÁVY	48
5.1 POPIS PRACOVIŠTĚ.....	48
5.2 PODMÍNKY NA PRACOVIŠTI.....	49
5.3 SOUČASNÝ SYSTÉM MĚŘÍCÍ TEPLoty VÝTOKU LÁVY.....	50

5.4	DATA Z MĚŘENÍ TEPLoty ČEDIČOVÉ LÁVY	53
5.5	DEFINOVÁNÍ POŽADAVKŮ NA ZMĚNU MĚŘÍCIHO SYSTÉMU	55
6.	NÁVRH NOVÉHO SYSTÉMU MĚŘENÍ TEPLoty LÁVY	56
6.1	PYROMETR NA LINEÁRNÍM POSUVU	56
6.1.1	<i>Šroubovicové lineární vedení</i>	58
6.1.2	<i>Řemenové lineární vedení</i>	59
6.1.3	<i>Výběr pyrometru</i>	59
6.2	PYROMETR NA OTOČNÉM PODSTAVCI.....	59
6.3	LINESCANNER.....	61
6.4	TERMOKAMERA.....	61
6.5	ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ	62
6.5.1	<i>Návrh pyrometru na lineárním posuvu</i>	62
6.5.2	<i>Návrh pyrometru na otočném podstavci</i>	63
6.5.3	<i>Návrh termokamery</i>	63
7.	ZÁVĚR.....	64
	LITERATURA.....	65
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Elektromagnetické záření a průběh jeho složek. [3] upraveno	14
Obrázek 2 Elektromagnetické spektrum. [4]	15
Obrázek 3 Spektrum slunečního záření. [5]	16
Obrázek 4 Dutina simulující absolutně černé těleso. [7]	17
Obrázek 5 Spektrum vyzařovaných vlnových délek v závislosti na teplotě. [8]	18
Obrázek 6 Rozložení dopadajícího záření na reálný povrch [2]	20
Obrázek 7 Rozdíly mezi měřením pomocí bodového pyrometru a linescanneru, [9] upraveno	22
Obrázek 8 Termogramy elektromotorů, nalevo standardní, napravo s funkcí MXS. [10]	23
Obrázek 9 Obecné schéma vysoké pece na zpracování železné rudy [12]	24
Obrázek 10 Reálné pracoviště v hutích společnosti Liuzhou Steel Co. [12]	25
Obrázek 11 Postupné aplikace operací počítačového vidění pro lokalizaci oblasti s roztaveným železem na termogramu [12] upraveno	26
Obrázek 12 Teplotní mapa a) celkové rozložení b) po aplikaci Gaussovy distribuce [12]	26
Obrázek 13 Porovnání naměřených hodnot pomocí teplotní mapy a termočláнку [12]	27
Obrázek 14 Pracoviště struskovníku s termokamerou [13]	28
Obrázek 15 Železo se struskou před a) b) c) a po d) e) f) segmentaci obrazu. [13]	28
Obrázek 16 Naměřené hodnoty teplot s použitím metody mapování a kompenzační metody [13]	29
Obrázek 17 Spektrální hodnoty emisivity čediče při teplotě 1042 °C. [14] upraveno	30
Obrázek 18 Spektrální hodnoty emisivity čediče při různých teplotách. [11] upraveno	31
Obrázek 19 Porovnání měření teploty čediče na dvou různých vlnových délkách. [11]	31
Obrázek 20 Pyrometry z průzkumu, nalevo IFM TW2001, uprostřed Omega OS-MINI, napravo Fluke- Raytek-E3MH Endurance. [30],[35],[37]	32
Obrázek 21 Ochranný a chladič obal pro pyrometr firmy Fluke-Raytek. [18]	33
Obrázek 22 Linescanner společnosti Land-Ametek LSP HD 12. [50], [51] upraveno	34
Obrázek 23 Termokamera DIAS, PYRONIC určena pro spalovací komory. [61]	34
Obrázek 24 Snímač Raytek 10 s náhledem na řídicí jednotku. [19]	36
Obrázek 25 Snímač Meterman IR 608 (vlevo), snímač Kecheng KC-180B-1 (vpravo). [20]	37
Obrázek 26 Metex M-3850D se sondou Raytek Raynger IP.	37
Obrázek 27 Snímače Raytek MX Phototemp (vlevo) Raytek MX Raynger (vpravo). [22], [23]	38
Obrázek 28 Termokamera Fluke Thermal Imager Ti55FT. [25]	38
Obrázek 29 Černý zářič v infračerveném spektru (vlevo) ve viditelném (vpravo).	40
Obrázek 30 Přípravek s terčíkem a dráhou s připevněným snímačem Raytek 10.	41
Obrázek 31 Velikost zorného pole snímače Raytek 10 při poměru 10:1. [19]	42
Obrázek 32 Velikost zorného pole snímače Raytek MX Phototemp. [22]	42
Obrázek 33 Terčík přípravku v infračerveném spektru.	43
Obrázek 34 Průběh naměřených hodnot v závislosti na vzdálenosti od terčíku.	44
Obrázek 35 Zorné pole snímače Raytek MX ve vzdálenosti 30 cm (vlevo), ve vzdálenosti 10 cm (uprostřed) a ve vzdálenosti 80 cm (vpravo)	44
Obrázek 36 Přípravek s plotýnkami využitý pro měření vlivu emisivního součinitele.	45
Obrázek 37 Plotýnky v infračerveném spektru.	46
Obrázek 38 Půdorys pracoviště vysoké pece.	48
Obrázek 39 Půdorys pracoviště se znázorněnými body, kde byla měřena teplota.	49
Obrázek 40 3D model pracoviště, zaměření současného pyrometru na výtok z pece.	50
Obrázek 41 Fotka „rampouchu“ vytvořeného na výtokovém žlabu pece.	51
Obrázek 42 Pohled na výtok ze stávajícího pyrometru.	52

Obrázek 43 Graf vývoje rozdílu naměřených teplot kontaktně a pyrometrem za období od 11. 3. 2024 - 22. 3. 2024.....	54
Obrázek 44 Návrh nové pozice pyrometru	56
Obrázek 45 Návrh blokového diagramu měřicího systému	57
Obrázek 46 Lineární posuv se šroubovicí společnosti ESES. [28]	58
Obrázek 47 Motorizovaná jednotka firmy Land-Ametek Spot Actuator. [52] upraveno	60
Obrázek 48 OPTRIS PI 05M. [29]	61
Obrázek 49 Doplnkové vybavení pro termokameru Optris PI 05M. [29].....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výsledky klasifikace stavů neuronové sítě ShuffleNet v2 [13]	29
Tabulka 2 Teploty naměřené snímači na kalibračním přístroji Voltcraft IRS-350	39
Tabulka 3 Naměřené hodnoty při změnách hodnoty emisivity na přístrojích.....	40
Tabulka 4 Naměřené hodnoty měření vlivu zorného pole snímače	43
Tabulka 5 Naměřené teploty v okolí vysoké pece.	49
Tabulka 6 Parametry stávajícího pyrometru	52
Tabulka 7 5 nejvyšších kladných rozdílů teplot z dodaných dat (Příloha B -).....	53
Tabulka 8 5 nevyšších záporných rozdílů teplot z dodaných dat (Příloha B -).....	54
Tabulka 9 Optické parametry kamery na vzdálenost 370 cm.	62

ÚVOD

Tato práce se zabývá teoretickým návrhem nového systému bezkontaktního měření teploty čedičové lávy vytékající z vysoké pece pro výrobní podnik firmy Isover (Saint-Gobain) v Častolovicích. Současný systém měření teploty je založen na pyrometru, který je zaměřený na okraj výtoku, kterým proudí láva. Systém dle informací a poskytnutých dat snímá teplotu v určitých případech nepřesně, kdy se teplota naměřená pyrometrem značně odlišuje od teploty referenčně naměřené kontaktním termočlánkem. Podle informací konzultanta z firmy je problém způsoben nahromaděním tuhnoucí lávy na výtoku, která odkloní proud tekuté lávy. Pyrometrem snímaná oblast v tomto případě nesnímá pouze teplotu lávy, ale také teplotu oblasti za lávou. Toto je důvod návrhu nového měřicího systému, který by i v této situaci, která v průběhu výroby nastává, zajistil přesnější určení hodnoty teploty lávy.

V rámci této práce je proveden literární průzkum v oblasti bezkontaktního měření teploty a popis současných metod bezkontaktního měření lávy v hutích z dostupných článků. Dále je v práci proveden průzkum trhu v oblasti bezkontaktních snímačů teploty a srovnání hlavních parametrů těchto snímačů.

Nakonec jsou v práci teoreticky navrženy nové měřicí systém pro pracoviště vysoké pece a měření teploty lávy, které jsou následně diskutovány a porovnávány se současným systémem.

1. TEORETICKÉ ZÁKLADY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty

V bezkontaktním měření teploty se využívá lidským okem neviditelné infračervené záření, které vyzařuje tepelnou energii objektů. Objekty vyzařují svoji tepelnou energii formou infračerveného záření, které je emitované do okolí. Bezkontaktní teplotní snímače pracují na bázi snímání tohoto záření vyzařovaného objekty na dálku a umožní pomocí matematických rovnic její převod na měřenou teplotní veličinu, například jednotky stupně Celsia. [2]

1.1 Historie zkoumání elektromagnetického záření

První bezkontaktní snímač, který lidé využívali k určení teploty objektu bylo lidské oko. Například řemeslníci museli vědět, na jakou teplotu mají zahřát kov, než ho začnou upravovat. Před vynalezením teploměru Galileem Galileim mohli řemeslníci odhadnout správnou teplotu zahřátého kovu, aniž by se ho dotkli, pouze podle jeho barvy. Na základě zkušeností a znalostí s barvou kovů věděli kdy dosáhl daný druh kovu správné barvy, a tím i teploty pro další zpracování.

Sir Isaac Newton (1642-1727) během svého vědeckého působení zkoumal i optiku. Během experimentů se skleněnými hranoly přišel na to, že pomocí hranolů se může rozložit bílé, viditelné světlo na barevné spektrum. Na spektru byly barvy vedle sebe postupně od nejmenšího zalomení po největší v tomto pořadí: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová. Mezi jednotlivými barvami byly postupné přechody.

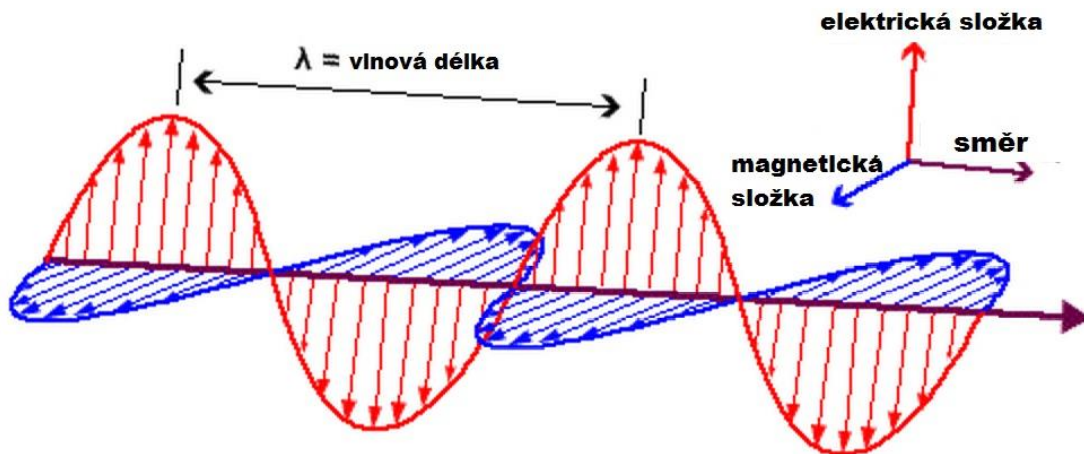
Infračervené záření objevil v roce 1800 Frederick William Herschel (1738-1822). Prováděl experiment, při kterém použil hranol k rozložení bílého světla do barevného spektra a k jednotlivým barvám světla dopadajícího na zem přikládal teploměr. Teploměr ukazoval tím vyšší teplotu, čím blíže byl krajní červené barvě. Při pokusu posunout teploměr za krajní červenou barvu teploměr ukázal ještě vyšší teplotu než na jakékoliv z ostatních barev. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že větší část tepelné energie je přenášena na jiném spektru než na viditelném světle, a to v infračerveném spektru, jinak řečeno „pod červenou“.

Dalším důležitým milníkem studia záření byl výzkum Jamese Clerka Maxwella (1831-1879), který během jeho výzkumu elektromagnetismu teoreticky odvodil rychlost elektromagnetického vlnění a zjistil, že rychlost vlnění je blízká rychlosti světla, z čehož odvodil, že světlo je také elektromagnetické vlnění o určitých vlnových délkách. V rámci dalších navazujících výzkumů záření je důležité zmínit fyzika Gustava Roberta Kirchhoffa (1824-1887), který v roce 1860 představil koncept absolutně černého tělesa, o kterém se více pojednává v podkapitole 1.3, a fyzika Maxe Karla Ernsta Ludwiga

Plancka (1858-1947), jenž přišel s teorií, že energie se skládá z malých částic, kvant, jejichž energii je možné spočítat pomocí Planckovy konstanty. [2]

1.2 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření se skládá z magnetické složky a vůči ní kolmé elektrické složky. Obě složky vlnění jsou zároveň kolmé k směru pohybu. Elektrická i magnetická složka mají stejnou frekvenci a fázi, jak je vidět názorně na Obrázek 1. [3]



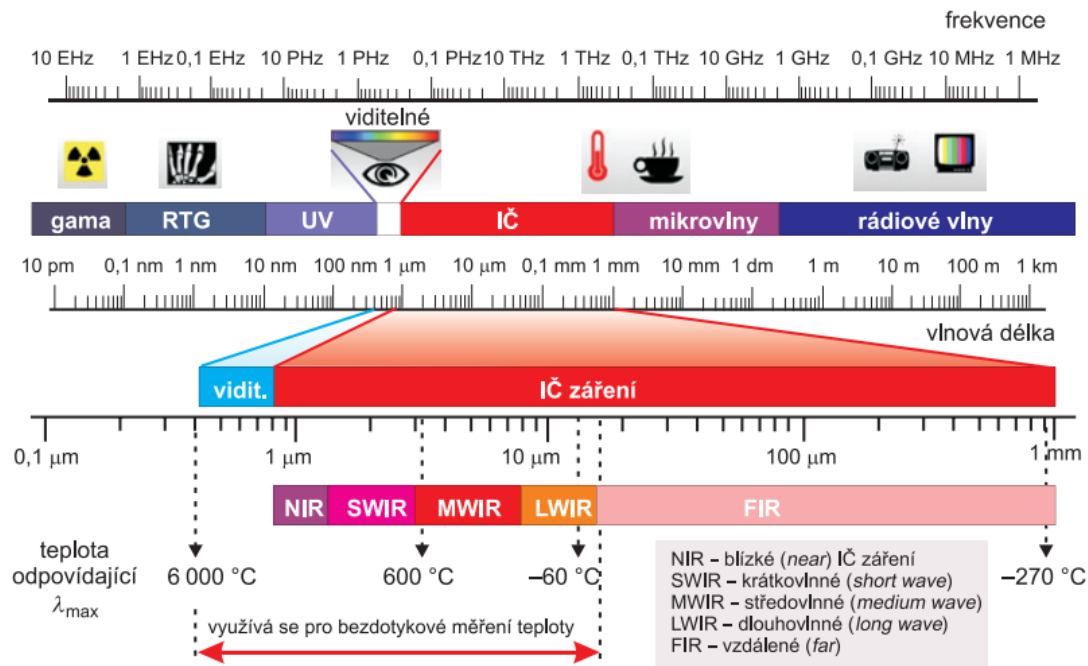
Obrázek 1 Elektromagnetické záření a průběh jeho složek. [3] upraveno

Na Obrázek 2 je vidět elektromagnetické spektrum v závislosti na velikosti vlnové délky a frekvence. Jelikož je rychlost pohybu záření stejná, tudíž platí, že čím je menší vlnová délka, tím je vyšší frekvence a naopak, když je větší vlnová délka, potom je nižší frekvence. Čím je vyšší frekvence, tím je vyšší energie záření.

Na levé části spektra, kde jsou nejkratší vlnové délky, vidíme vysokoenergetické gama záření vznikajícího během rozpadu jader atomu. Naopak na druhé části spektra, kde je vlnová délka nejdelší se nachází oblast nízkoenergetických rádiových vln. Ty jsou využívány v bezdrátových komunikačních technologiích jako přenosové médium.

V rámci této práce se budeme pohybovat v oblasti tepelného záření, které se nachází přibližně mezi vlnovými délkami $0,1 \mu\text{m}$ až $1000 \mu\text{m}$. V této oblasti se nachází část ultrafialového záření, celé viditelné spektrum a infračervené záření. Infračervené pásmo se dělí na tři oblasti: [2]

- Blízké infračervené pásmo ($\lambda = 0,78 \mu\text{m} - 3,00 \mu\text{m}$)
- Střední infračervené pásmo ($\lambda = 3,00 \mu\text{m} - 30,00 \mu\text{m}$)
- Vzdálené infračervené pásmo ($\lambda = 30,00 \mu\text{m} - 300,00 \mu\text{m}$)



Obrázek 2 Elektromagnetické spektrum. [4]

1.3 Koncept absolutně černého tělesa

Koncept absolutně černého tělesa je základem radiační termometrie. Kirchhoff definoval absolutně černé těleso jako povrch, který pohltí veškeré dopadající záření, a zároveň vyzařuje veškerou svoji energii. Zde vzniká důležitý parametr, který se využívá v bezkontaktním měření teploty, a to je emisivita (značena ε), pro teoretické absolutně černé těleso je $\varepsilon = 1$.

Emisivita je parametr, který vyjadřuje vyzařování tepelné radiace absolutně černého tělesa ve srovnání s reálným povrchem při stejné teplotě. Pro reálné povrchy se emisivita určuje jako celkové množství energie vyzářené povrchem v poměru s celkově vyzářenou energií absolutně černým tělesem při stejné teplotě. Pro měření reálných povrchů je důležité znát jejich emisivitu z důvodu možného zkreslení měření.

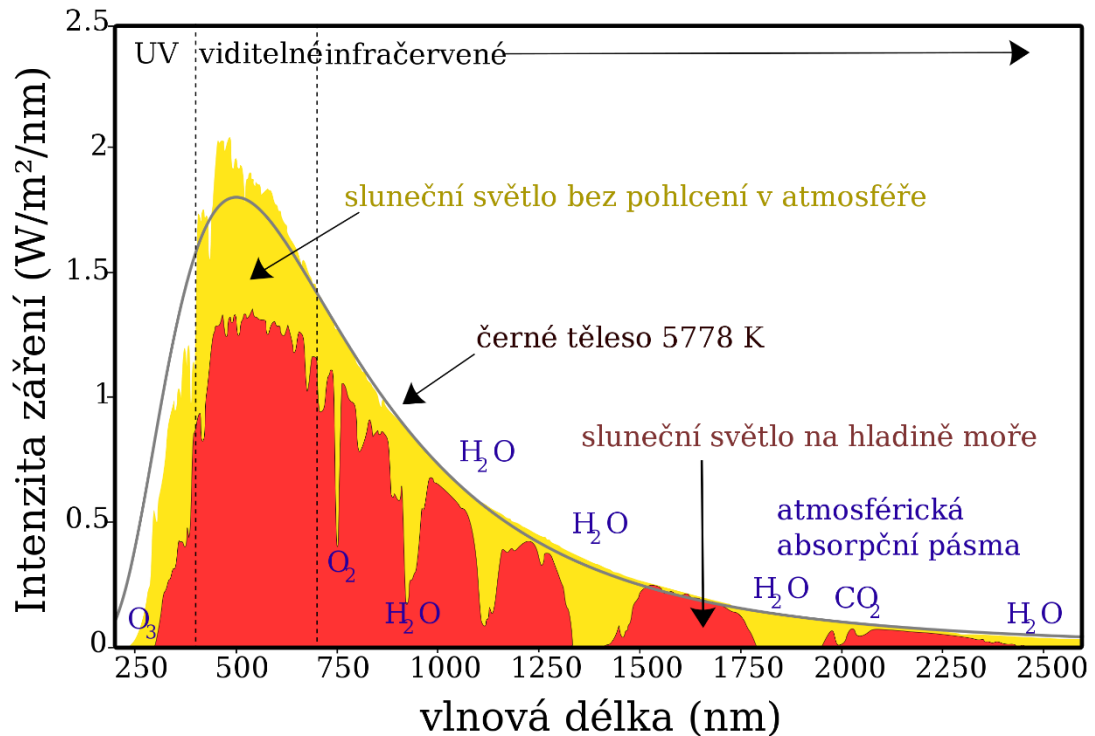
U reálných povrchů se hodnota emisivity pohybuje v rozmezí $0 < \varepsilon < 1$. Hodnoty emisivity je možné dohledat ve veřejně dostupných tabulkách, případně když ji nelze dohledat tak lze ji nastavit pomocí kontaktního teploměru, kterým změříme referenční teplotu měřeného objektu a postupně na bezkontaktním teploměru budeme nastavovat emisivitu, dokud nebude výsledná naměřená teplota shodná s hodnotou naměřenou na kontaktním teploměru.

V reálném prostředí se využívá černý zářič, který simuluje absolutně černé těleso a má emisivitu $\varepsilon \approx 1$. Černé zářiče se využívají pro kalibraci bezkontaktních teplotních snímačů. [2]

1.3.1 Příklad absolutně černého tělesa, Slunce

Jako příklad absolutně černého tělesa jsou hvězdy, které absorbují okolní záření a zároveň veškerou svojí energii vyzařuje do okolí. Tímto splňují definici absolutně černého tělesa. A lze je pokládat za absolutně černé těleso

Spektrum slunečního záření (Země)

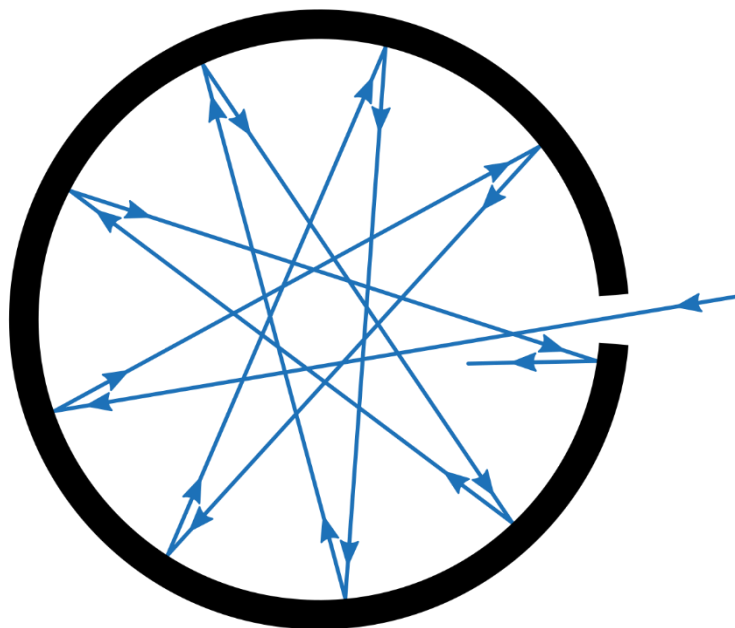


Obrázek 3 Spektrum slunečního záření. [5]

Na Obrázek 3 lze vidět žlutě znázorněné spektrum slunečního záření před dopadem na atmosféru Země a červeně znázorněnou část spektra měřenou u hladiny moře. Jak lze vidět ve spektru záření, které dopadá na Zemi, jsou mezery na určitých vlnových délkách a zároveň intenzita záření není tak velká, jako původní intenzita, před dopadem na Zemi. Na Obrázek 3 lze také vidět, že mezery ve spektru světla měřeného na hladině moře jsou způsobeny absorpcí těchto vlnových délek prvky, které se nachází v atmosféře. Například ozon (chemická značka O₃) absorbuje část pro člověka nebezpečného, ultrafialového záření. Také lze vidět, že mezi vlnovými délkami 1250 nm až 1500 nm v infračerveném spektru je pásmo, které absorbuje vodní pára v atmosféře. Maximum intenzity záření na spektru se nachází v oblasti viditelného záření. Pro bezkontaktní měření teploty je důležité uvědomit si, na jaké vlnové délce měřený objekt vyzařuje tepelné záření a v jakém prostředí záření měříme; může se stát, že na vlnových délkách, na kterých měříme, je záření absorbováno prostředím, kterým se pohybuje, to může vést k chybám měření. [6]

1.3.2 Příklad absolutně černého tělesa, dutina se štěrbinou

Dalším příkladem objektu aproximující absolutně černé těleso může být dutina se štěrbinou. Štěrbinou, která je oproti rozměrů dutiny malá, vstupuje do dutiny záření, které je buď absorbováno, nebo se od stěny odráží, kdy s každým dalším odrazem se snižuje intenzita záření a tím pádem se záření více a více absorbuje. Ze štěrbiny poté vystupuje ven zanedbatelné množství záření. Na Obrázek 4 lze vidět dutinu a modré šipky označující záření, které vstupuje do dutiny a odráží se od jejích stěn. [2]



Obrázek 4 Dutina simulující absolutně černé těleso. [7]

1.4 Vyzařování absolutně černých těles

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.3, absolutně černé těleso, jak ho definoval Kirchhoff je těleso, které dokonale pohltí veškeré dopadající záření na povrch, ale zároveň také vyzařuje veškerou svoji energii do okolí. Vyzařování těchto těles bylo zkoumáno v druhé polovině 19. a začátkem 20. století a vedlo ke zrodu kvantové fyziky. V této podkapitole budou shrnuty postupné objevy k problematice vyzařování absolutně černých těles. [2]

1.4.1 Stefanův-Boltzmannův zákon

Jedná se o vztah, který vyvodil v roce 1879 fyzik Stefan na základě experimentálních výsledků a následně upravil Ludwig Boltzmann. Zákon říká, že energie vyzařování

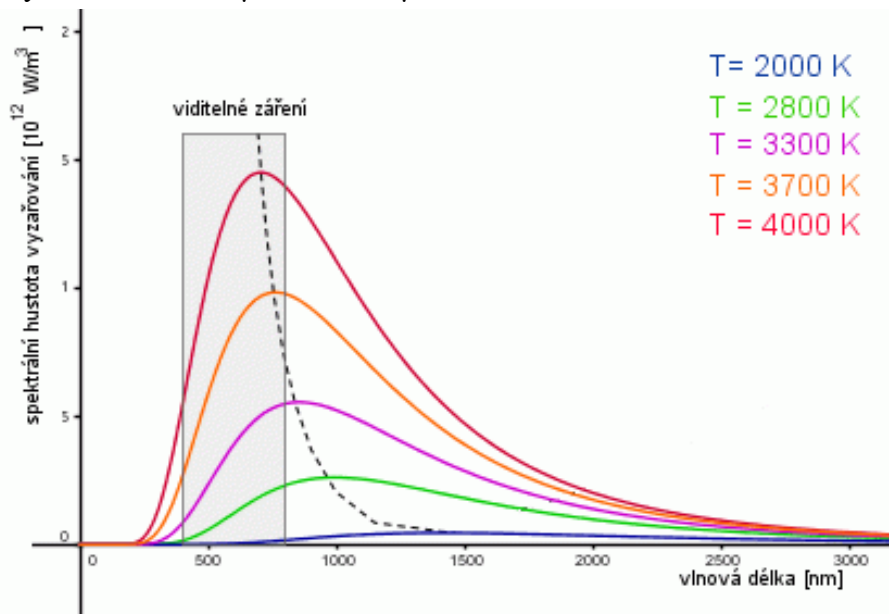
absolutně černého tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině teploty tohoto tělesa, jak lze vidět dle vzorce:

$$E = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), T je teplota absolutně černého tělesa a E je vyzařovaná energie na jednotku plochy (W/m^2). [2]

1.4.2 Wienův posunovací zákon

Wienův posunovací zákon popisuje chování vyzařovaného spektra absolutně černým tělesem v závislosti na teplotě tělesa. Vyzařované spektrum tepelného záření se nachází mezi vlnovými délkami 0,1 μm až 1000 μm .



Obrázek 5 Spektrum vyzařovaných vlnových délek v závislosti na teplotě. [8]

Na Obrázek 5 je vidět graf, který znázorňuje vyzařované spektrum vlnových délek absolutně černým tělesem v závislosti na teplotě tělesa. Na ose x je hodnota vlnové délky, na ose y je hodnota spektrální hustoty. Spektrální hustota určuje, kolik energie je na jednotlivých vlnových délkách přenášeno. V grafu jsou vyznačeny křivky, které znázorňují, jak je rozložena spektrální hustota vyzařování v závislosti na teplotě absolutně černého tělesa. Z obrázku jde názorně vidět, že s rostoucí teplotou se posouvá nejintenzivněji vyzařovaná vlnová délka (λ_{max}) směrem doleva k nižším vlnovým délkám. Když tyto spektra porovnáme s Obrázek 3, na kterém je spektrum vyzařování Slunce, lze vidět, že maximum je přibližně v oblasti 500 nm, což odpovídá přibližně modro-zelené

barvě. Hyperbola označena v grafu čárkovaně představuje graf Wienova posuvu, na kterém jsou vždy nejvíce energeticky vyzařované vlnové délky.

Wienův zákon tedy popisuje, jaká vlnová délka má maximální vyzařovací energii v závislosti na teplotě absolutně černého tělesa.

Tvar výpočtu maximální vlnové délky je:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.2)$$

kde b je Wienova konstanta ($b \approx 2897,7 \mu\text{m}$), T je teplota tělesa a λ_{max} je výsledná vlnová délka. [2]

1.4.3 Planckův radiční zákon

Planck popsal ve své teorii, která byla následně potvrzena, že záření v sobě nese diskrétní množství energie, které jsou označeny jako fotony nebo kvanta. Velikost kvanta se určí pomocí Planckovy konstanty $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ a frekvence záření v Hz.

Vzorec pro výpočet energie je:

$$E = h\nu \quad (1.3)$$

Kde h je Planckova konstanta, ν je frekvence záření a E je energie záření. [1]

„Závažným důsledkem Planckovy hypotézy byl závěr, že tělesa mohou vyzařovat energii, jen po určitých kvantech rovných součinu ($h \cdot \nu$). Tento princip vedl k zavedení pojmu foton. Fotonu byl přisouzen dvojitý charakter-korpuskulární a vlnový. Fyzikální podstatou záření je tedy soubor fotonů, šířící se prostorem (ve vakuu) rychlostí světla c .“ (V. Lysenko 2005, s. 100) [1]

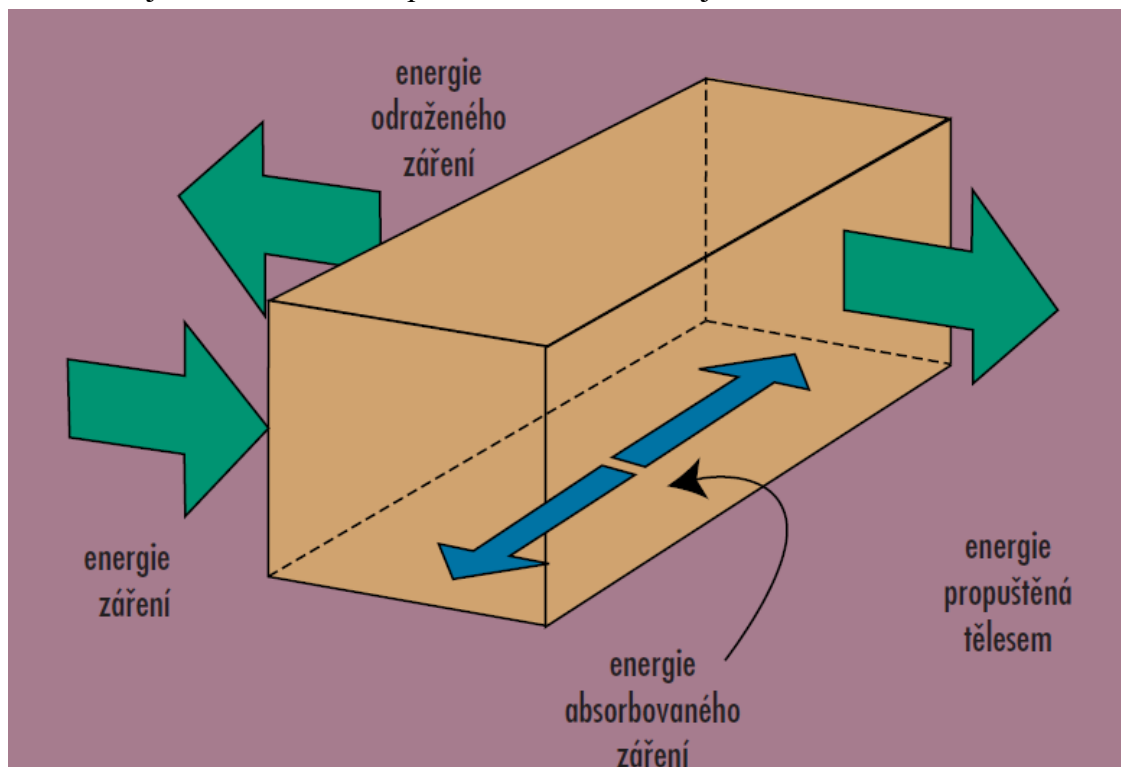
1.5 Měření teploty na reálném povrchu

Žádný povrch nemůže být dokonalým černým tělesem. Koncept černého tělesa pomáhá vyjádřit chování objektů, které vyzařují teplo a jak se mění vyzařované spektrum vlnových délek v závislosti na měnící se teplotě objektu. Reálná tělesa dopadající záření buď absorbují, propustí, nebo odrazí. Součet energií záření, které bylo absorbováno, propuštěno, nebo odraženo, se vždy musí rovnat energii záření, které na povrch dopadlo. Dle vzorce:

$$p + \tau + \alpha = 1 \quad (1.4)$$

Kde p je energie odražena, τ je energie propuštěna a α je energie absorbována.

Černé těleso má absorpci záření rovnou jedné, to znamená, že energie propuštěná a odražená je rovna nule. Pro lepší vizualizaci rovnice je zde Obrázek 6.



Obrázek 6 Rozložení dopadajícího záření na reálný povrch [2]

U reálných povrchů se musí také počítat s parametrem emisivity, která již není jak v případě absolutně černého tělesa rovna jedné, jelikož se pohybuje v intervalu $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Musí se vzít v úvahu, že existují materiály, jejichž emisivita se při různých teplotách mění. Je tedy vhodné před měřením nastudovat emisivitu známého měřeného povrchu a její chování při měnící se teplotě. Další faktor, který je nutné zohlednit je, na jakých vlnových délkách povrch vyzařuje, protože žádný reálný povrch nevyzařuje tak efektivně, jako černé těleso. Proto je důležitý parametr, na jakých vlnových délkách snímač měří tepelné záření.

Tepelné záření na krátkých vlnových délkách (ultrafialové a viditelné záření) je více citlivé na změnu teploty z důvodu přesunu vrcholu spektra směrem k těmto vlnovým délkám. Je zde ale omezující parametr, a tím je minimální teplota, při kterých je v těchto krátkovlnné oblasti možné měřit. Při snižující se teplotě se posouvá spektrum směrem

k delším vlnovým délkám, což způsobuje snížení přesnosti měření. Z tohoto důvodu se používá pro měření teploty spektrum v oblasti delších vlnových délek.

Dalšími příklady parametrů ovlivňujících měření může být vyzařování cizích zdrojů nebo ztráta záření vlivem prostředí, které záření absorbuje, jaký je například vidět na Obrázek 3, kde určité části slunečního spektra absorbuje atmosféra Země. [2]

1.6 Pyrometry

Pyrometry jsou zařízení, která snímají bezdotykově teplotu objektu. Snímání teploty objektu probíhá na základě tepelného záření, které objekt emituje do okolí. Toto záření je pomocí snímačů a optických systémů zachyceno a následně po analýze měřicími systémy převedeno na měřenou teplotu. Existují také pyrometry, kde se namísto optických systému využívají termoelektrické články pro snímání infračerveného záření. Po změření intenzity záření je provedena korekce emisivity povrchu, díky čemuž dostaneme výslednou teplotu měřeného objektu. Pyrometry je možné základně dělit na tyto typy:

- Širokopásmové pyrometry
- Úzkopásmové pyrometry
- Poměrové pyrometry

Jednotlivé typy pyrometrů budou popsány v podkapitolách níže. Toto rozdělení je jenom základní, pyrometry lze rozdělit do mnoha dalších podskupin.

1.6.1 Širokopásmové pyrometry

Širokopásmové pyrometry pracují s vlnovými délkami od 0,3 μm do 20 μm . Jedná se o podstatnou část tepelného záření. Mezi pyrometrem a měřeným objektem je vyžadováno průhledné prostředí z důvodu, že kdyby se nacházely v tomto prostoru plyny, které by absorbovaly některé vlnové délky měřeného spektra, byly by naměřené hodnoty nižší než skutečná hodnota. Optický systém je potřeba udržovat v čistotě.

1.6.2 Úzkopásmové pyrometry

Na rozdíl od širokopásmových pyrometrů pracují úzkopásmové pyrometry pouze s úzkým pásmem vlnových délek. Detektory záření jsou konstruovány tak, aby byly citlivé pouze na určité spektrum vlnových délek, nebo jsou použity filtry, které propustí pouze určité spektrum záření. Díky tomuto procesu jsou citlivější na změny intenzity záření v určitém spektru.

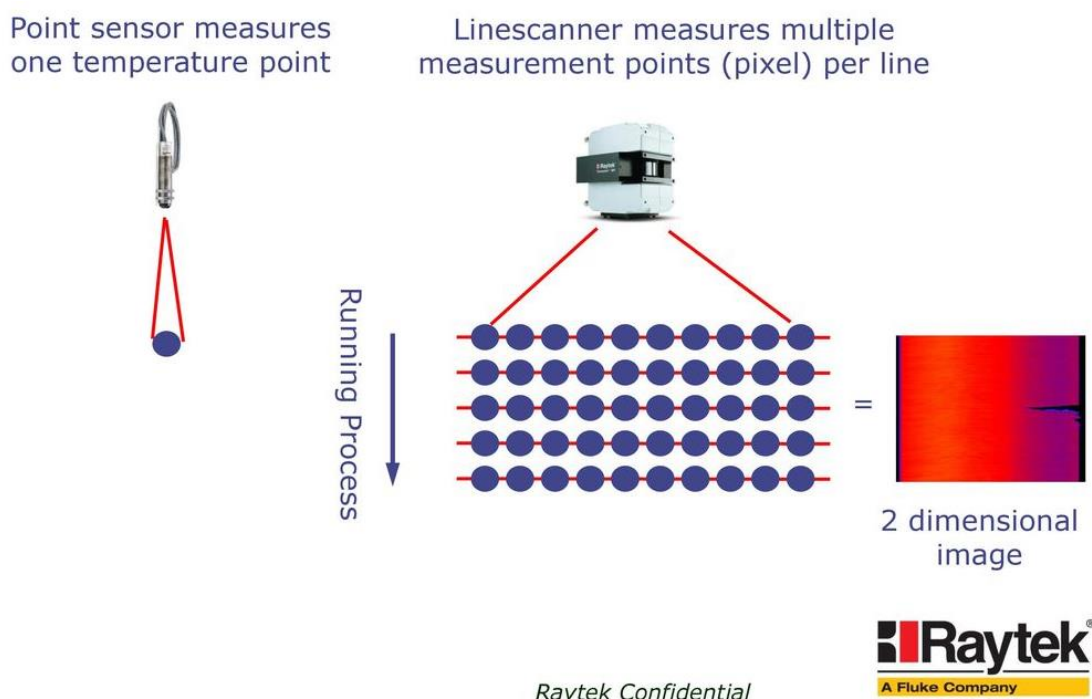
1.6.3 Poměrové pyrometry

Princip funkce poměrových pyrometrů spočívá v měření poměru intenzit dvou anebo více úzkých pásem vlnových délek tepelného záření. Výhoda těchto pyrometrů spočívá v tom, že jakýkoliv parametr, který ovlivní obě pásma stejným způsobem, nebude mít vliv na

měřenou teplotu, a to díky tomu, že matematický poměr dvou měřených energií to nezmění. Problém nastává u parametrů, které nezmění všechny vlnové délky stejně, ale každou délku ovlivní jinak.

1.7 Linescannery

Linescanner bývá také nazýván lineární pyrometr. Jedná se o zařízení, které se používá k měření teploty na pohyblivém povrchu anebo v průmyslových procesech, v případech, kdy je nutné sledovat teplotní profil přes určitou délku anebo šířku, například při výrobě skleněných tabulí. Princip funkce linescanneru je stejný, jako u pyrometru, v tomto případě je ovšem pyrometr umístěn na otočné hlavici a snímá více za sebou jdoucích bodů v jedné linii na měřeném objektu. Na Obrázek 7 jsou znázorněny rozdíly mezi měřením pomocí bodového pyrometru a mezi měřením linescannerem. Jak je vidět, linescanner může pomocí naměřených hodnot skládat 2D obraz mapy teplot na postupujícím procesu. Tyto mapy jsou vhodné pro průmyslové procesy jako například detekce horkých míst na výše zmíněných tabulích skla. Každopádně musí jít o proces, kde se měřený objekt pohybuje kolmo vůči směru snímání linescannerem.

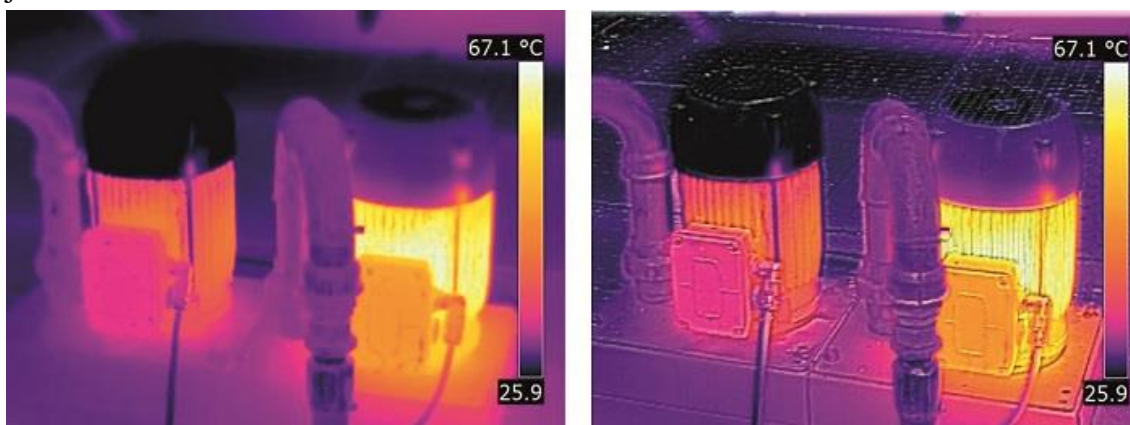


Obrázek 7 Rozdíly mezi měřením pomocí bodového pyrometru a linescanneru, [9] upraveno

1.8 Termografie

V termografii měříme teplotu v 2D obraze pomocí termokamery, která funguje jako klasická kamera či fotoaparát, ovšem místo detektoru citlivého na viditelné světlo je

vybavena detektorem citlivým na tepelné záření v infračerveném spektru. Vlnové délky infračerveného spektra, na který je detektor citlivý, jsou stanoveny výrobcem detektorů. Historicky první termografické přístroje měly jeden detektor a otočné zrcátko, kterým snímaly obraz před sebou. Zrcátko se po každé nasnímané hodnotě pootočilo a měřilo další bod. Problém této prvotní konstrukce byl zdlouhavý proces snímání obrazu. Tento koncept nahradil detektor statický složený z více snímačů. Rozlišení těchto detektorů bývalo 320x244 pixelů. Nyní má například ruční termokamera Workswell WIC IP 67 dle zdroje [56] detektor o rozlišení 640 x 512 pixelů, které jsou v současnosti standardem. Existují ale i termokamery se snímači o rozlišení 1968 x 1476 pixel [59]. Zobrazovací technika obrazu nemusí být vždy součástí termokamery, v průmyslových aplikacích je obraz přenášen na sběrnících dat nebo samostatným médiem ke vzdáleným zobrazovacím jednotkám. Naopak přenosné nebo ruční termokamery využívané například hasiči, armádou nebo policií mají již v sobě zabudovanou zobrazovací jednotku.



Obrázek 8 Termogramy elektromotorů, nalevo standardní, napravo s funkcí MSX. [10]

Dle zdroje [10] jsou na Obrázek 8 zobrazeny termogramy z termokamery firmy FLIR, kde nalevo je standardní, který využívá pouze hodnoty nasnímané detektorem infračerveného záření a napravo je termogram s funkcí MSX, která kombinuje nasnímané hodnoty detektorem s reálným snímkem z kamery, kterou termokamera disponuje. Je vidět rozdíl kontrastu, který je v případě funkce MSX vyšší.

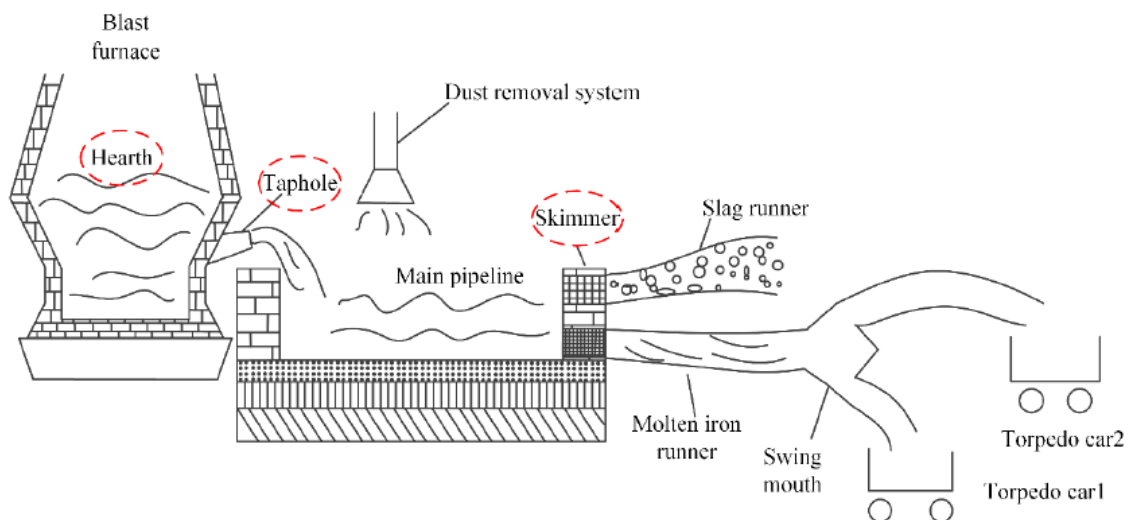
Termografie se dělí na dva obory, a to snímání obrazu a zpracování obrazu. V rámci zpracování se používají operace s počítačovým viděním, úprava emisivity a další aplikace. Společnosti vyrábějící termokamery vyvíjejí také svoje prostředí kompatibilní se snímači pro zpracování snímků. [2]

2. SOUČASNÁ ŘEŠENÍ MĚŘENÍ TEPLOTY VÝTOKU LÁVY A EMISIVITA ROZTAVENÉHO ČEDIČE

Dle dostupných materiálů bude v této kapitole popsáno, jaké systémy pro měření teploty lávy z vysoké pece se využívají v dnešních hutích. Pro tuto kapitolu bude čerpáno z článků uvedených ve zdrojích [11], [12], [13], [14]. Jedná se o články zabývající se měřením teploty roztaveného železa a emisivitou čediče, který tvoří podstatnou část vsázky vysoké pece ve firmě Isover.

2.1 Měření teploty roztaveného železa

Na základě článků uvedených ve zdrojích [12] a [13] byla provedena rešerše současných řešení měření teploty proudu lávy z dostupných zdrojů. Oba zdroje jsou zaměřeny na hutě zpracovávající železnou rudu a měření teploty roztaveného železa. Článek, uvedený ve zdroji [12], se zabývá měřením teploty roztaveného železa v hutích společnosti Liuzhou Steel Co. v Číně. Na Obrázek 9 je znázorněno obecné schéma vysoké pece na zpracování železné rudy. V tomto procesu se začíná s železem vytékajícím z odpichu vysoké pece (Taphole) dále směrem k sběrači strusky (Skimmer), po dobu tohoto toku se pomocí ventilace odebírá prach. Ve sběrači strusky se odděluje struska od roztaveného železa.



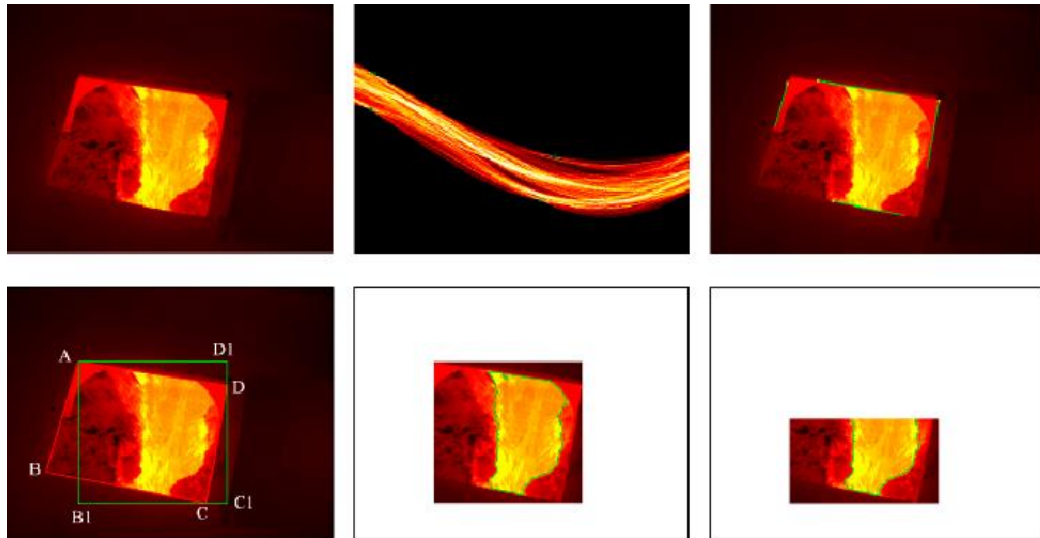
Obrázek 9 Obecné schéma vysoké pece na zpracování železné rudy [12]



Obrázek 10 Reálné pracoviště v hutích společnosti Liuzhou Steel Co. [12]

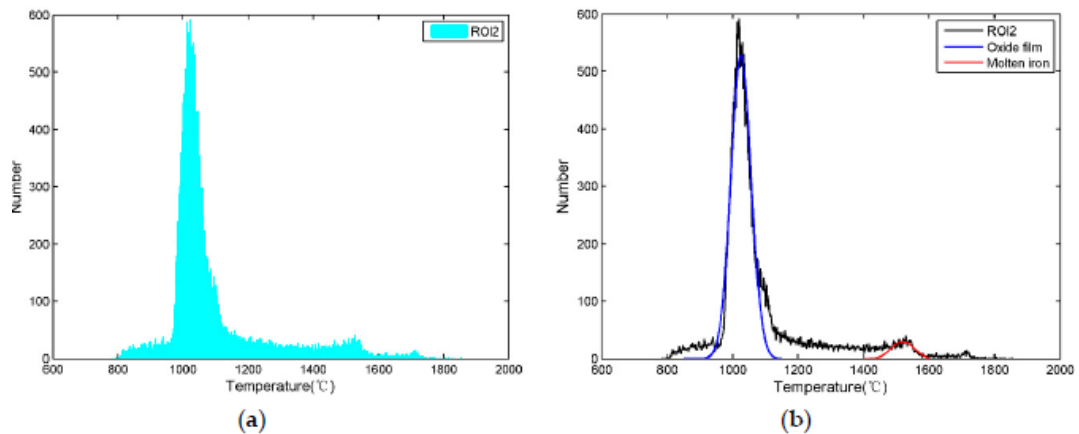
Na Obrázek 10 je znázorněné reálné pracoviště zmiňované v článku s popisky, je zde vidět ventilační zařízení a oddělený proud strusky ze struskovníku (Skimmer). Dle článku se měří teplota roztaveného železa až za struskovníkem v oblasti na obrázku označené jako okno (Window), kde je již oddělený proud roztaveného železa od strusky. Hodnota teploty naměřená v těchto místech má reflektovat hodnotu teploty uvnitř pece, byť proud již po určitou dobu je mimo pec a v kontaktu s okolním prostředím se ochlazuje. Reálnější hodnoty by se naměřily přímo u odpichu, ovšem bylo by velmi složité umístit měřicí přístroj do těchto drsných podmínek, jak lze vidět i na Obrázek 10. K naměření hodnot teploty byly dle článku využity metody kontaktní a bezkontaktní. Jako kontaktní byl použit stávající systém v hutích, a to termočlánek, který operátor pece, zakroužkován na obrázku červeně, umíšťoval do proudu taveniny přes okno. A jako bezkontaktní byla použita termokamera FLUKE TiX1000, která byla umístěna přibližně 1,7 m nad oknem. Pro zpracování obrazu z termokamery byla využita Houghova transformace pro detekce

hran a další operace počítačového vidění, které z obrázků detekovaly pouze oblast, kde se vyskytuje roztavené železo. Tento proces je znázorněn na Obrázek 11.



Obrázek 11 Postupné aplikace operací počítačového vidění pro lokalizaci oblasti s roztaveným železem na termogramu [12] upraveno

Po zpracování termogramu lze vidět, že se v zeleném ohraničeném okruhu nachází na povrchu železa ještě oxidovaná vrstva, která vzniká po kontaktu surového železa se vzduchem. Dle článku byl vytvořen teplotní kompenzační model pro zjištění teploty železa, který funguje tak, že z ohraničené oblasti hodnota každého pixelu převedena na teplotu, která byla následně převedena do teplotní mapy znázorněné na Obrázek 12 a), kde lze vidět dva teplotní vrcholy.

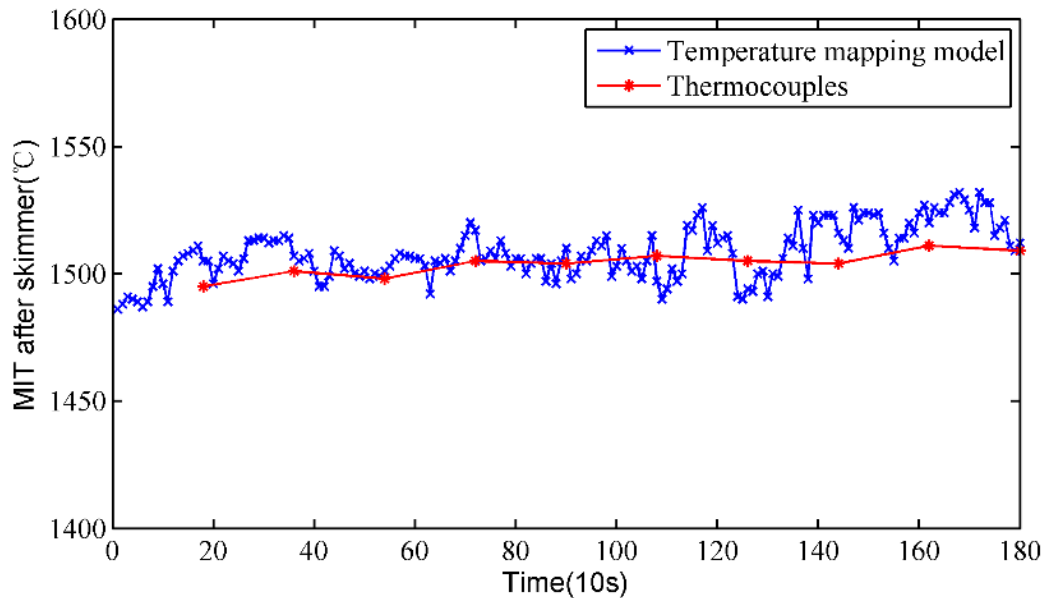


Obrázek 12 Teplotní mapa a) celkové rozložení b) po aplikaci Gaussovy distribuce [12]

Dalším krokem v článku byla aplikace Gaussovy distribuce pro zjištění hodnot teploty železa. Na Obrázek 12 b) lze vidět zobrazené pravděpodobnostní rozložení teplot

oxidované vrstvy a železa. Hodnota představující teplotu železa byla vybrána tak, že z oblasti Gaussovy distribuce pro železo byl vybrán vrchol naměřených hodnot.

Za zmínku ještě stojí zjištění hodnoty emisivity železa, která je v článku popsána tak, že po velikém počtu pokusů, při kterých se referenční hodnota zjišťovala kontaktním termočlánkem a na termokameře se upravovala hodnota emisivity, se dospělo k závěru, že efektivní hodnota emisivity železa za struskovníkem v prostředí těchto hutí činí 0,56.

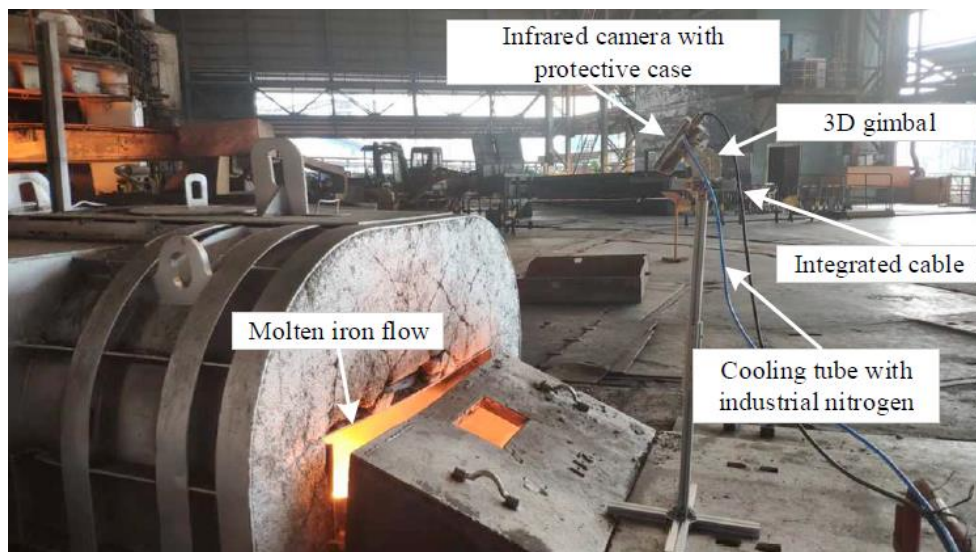


Obrázek 13 Porovnání naměřených hodnot pomocí teplotní mapy a termočlánku [12]

Závěr článku zhodnocuje Obrázek 13, kde jsou výsledky měření teploty pomocí termočlánku a termokamery. Relativní chyba měření termokamerou vůči termočlánku je většinou nižší než 1 %. Teplotní model s termokamerou dokázal získat hodnotu teploty každých 10 sekund, zatímco pomocí termočlánku se zjistila hodnota přibližně jednou za 3 minuty. Měření kontaktně termočlánky je přesnější, ale obsluha se vystavuje nebezpečí a ke každému měření je potřeba použít nový termočlánek. Nakonec článek popisuje vytvoření matematického modelu teploty u odpichu vysoké pece, u kterého se hodnota teploty naměřená pomocí termokamery vkládá jako vstupní parametr.

2.2 Měření teploty roztaveného železa s aplikovanou umělou neuronovou sítí

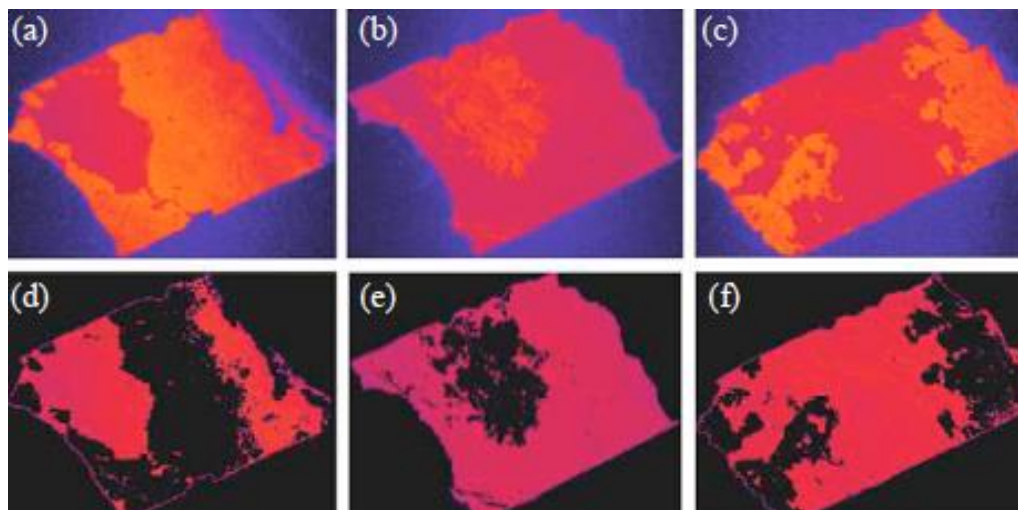
V článku uvedeném ve zdroji [13] je popsán další způsob bezkontaktního měření teploty roztaveného železa. Jedná se o nastavbu předchozího článku, kde jsou aplikované modely pro rozeznávání teploty za přítomnosti strusky anebo prachu, které mohou působit jako chyby měření. Na snímky z termokamery je aplikovaná umělá neuronová síť ShuffleNet v2 na rozeznání stavu, kdy se nachází na obrázku struska, roztavené železo, nebo je vyšší koncentrace prachu. Nutno podotknout, že odpadní struska se může objevit i za struskovníkem v hlavním proudu železa. Pracoviště je znázorněno na Obrázek 14.



Obrázek 14 Pracoviště struskovníku s termokamerou [13]

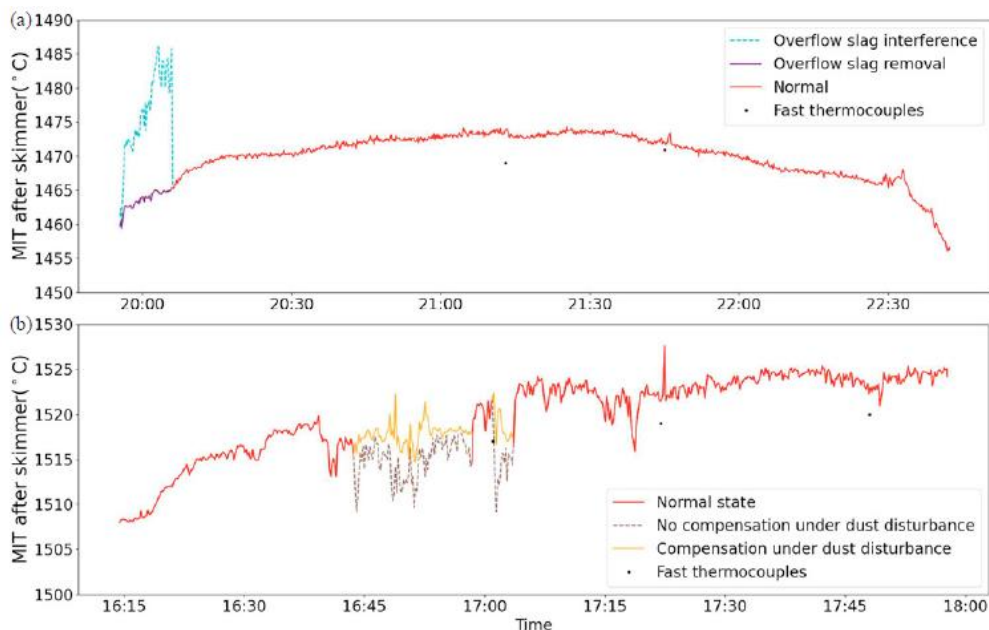
Jako trénovací množina bylo pořízeno dle článku 8247 snímků na obou pecích, na kterých byla neuronová síť ShuffleNet v2 trénována pro rozeznání stavu, kdy se nachází na snímku struska, kdy je stav normální nebo když je v oblasti snímání koncentrace prachu. Neuronová síť byla trénována při odpojení konvoluční a poolingové vrstvy, byla trénována pouze poslední plně propojená vrstva s nízkým parametrem learning rate.

Ke zjištění správné hodnoty teploty železa za přítomnosti strusky byl vytvořen mapovací model, který funguje na bázi segmentace obrazu. Na základě segmentace obrazu a znalosti, že emisivita strusky je vyšší než železa, Obrázek 15, je možné vybrat oblasti, kde se nachází železo, na které se poté použije teplotní kompenzační model z kapitoly 2.1. V případě stavu, kdy je vyšší koncentrace prachu, byl vytvořen kompenzační model.



Obrázek 15 Železo se struskou před a) b) c) a po d) e) f) segmentaci obrazu. [13]

Dle závěru článku se podařilo i s pouze jedinou vrstvou neuronové sítě ShuffleNet v2 dosáhnout dobrých výsledků, což dokazuje graf na Obrázek 16 a Tabulka 1.



Obrázek 16 Naměřené hodnoty teplot s použitím metody mapování a kompenzační metody [13]

Na Obrázek 16 a) lze vidět modře křivku teploty, která byla naměřena s přítomností strusky v obraze a fialově její hodnotu kompenzovanou mapovacím modelem. Na Obrázek 16 b) vidíme čerchovaně teplotu, která by byla naměřena standartním měřicím modelem a žlutě teplotu, která byla naměřena kompenzačním modelem pro vyšší výskyt prachu. Na obou obrázcích jsou znázorněné černé tečky, jedná se o hodnoty naměřené v daný okamžik kontaktně pomocí termočlánků, které byly brány jako referenční.

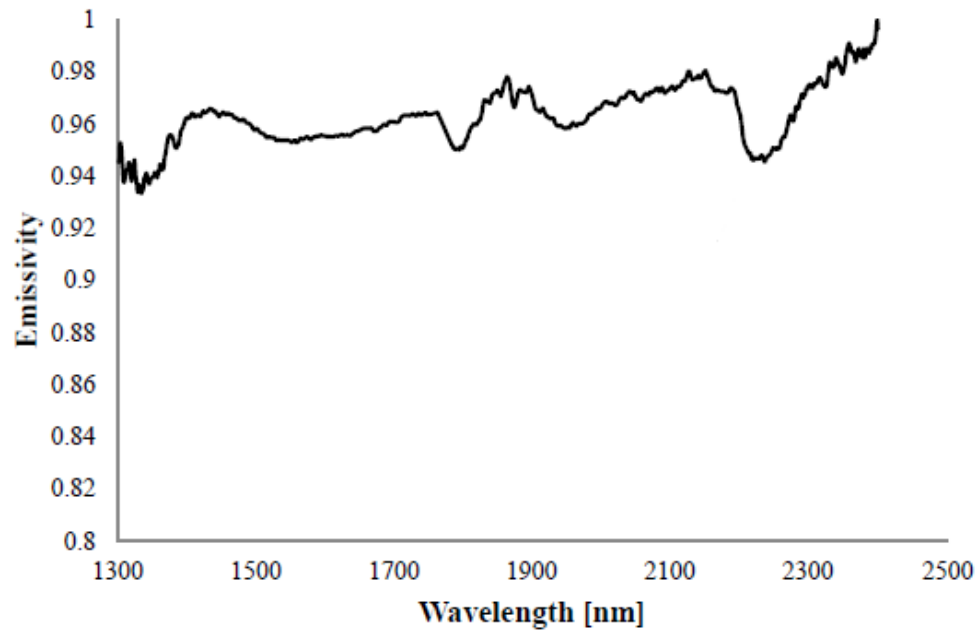
Tabulka 1 Výsledky klasifikace stavů neuronové sítě ShuffleNet v2 [13]

Typ	Vysoká pec číslo 6		Vysoká pec číslo 8	
	Normální stav	Překryv železa struskou	Normální stav	Vyšší koncentrace prachu
Přesnost klasifikace (%)	99,3	98,2	95,6	92,5

2.3 Emisivita roztaveného čediče

Minerální zateplovací vata je v podniku firmy Isover vyráběna ze směsi čediče a dalších příměsí, které podléhají utajení. Dle informací ze zdroje [15] se základ směsi skládá z čediče, doleritu a vysokopecní strusky.

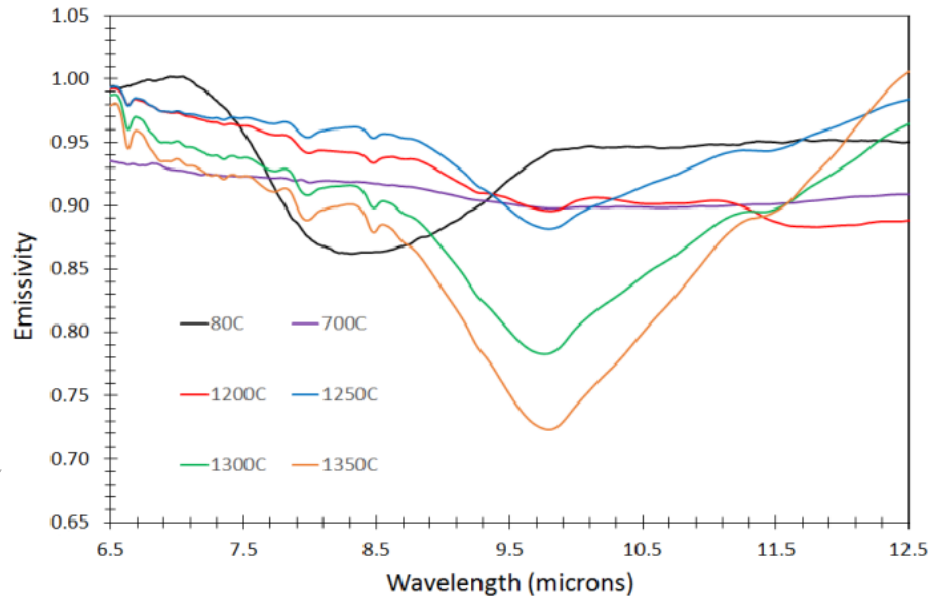
Emisivita je jeden z důležitých parametrů pro radiální termometrii a určuje, jak se na konkrétních vlnových délkách odlišuje tepelné vyzařování objektu od teoretického vyzařování absolutně černého tělesa, které veškerou svojí energii vyzáří viz kapitola 1.3. Dle zdrojů [11] a [14], které popisují experimentální měření emisivity čediče pomocí spektrometrů. Ve zdroji [14] dochází v závěru měření ke grafu zobrazeném na Obrázek 17.



Obrázek 17 Spektrální hodnoty emisivity čediče při teplotě 1042 °C. [14] upraveno

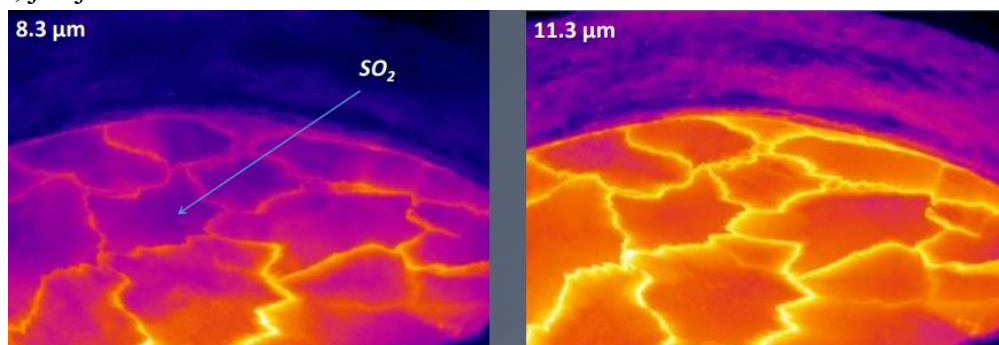
Na obrázku výše byla měřena emisivita čediče při teplotě 1042 °C, kdy byl čedič v kapalném stavu. Emisivita v této oblasti spektra od 1300 nm po 2500 nm, neklesá pod úroveň $\varepsilon = 0,92$ a s rostoucí vlnovou délkou se přibližuje k hranici $\varepsilon = 1$.

Ve zdroji [11] je popisováno měření emisivity čediče na vlnových délkách od 6,5 μm do 12,5 μm pro více teplot. Výsledky jsou znázorněné na Obrázek 18.



Obrázek 18 Spektrální hodnoty emisivity čediče při různých teplotách. [11] upraveno

Na Obrázek 18 jsou vidět grafy průběhu emisivity v závislosti na rostoucí vlnové délce. Při teplotě do 1200 °C je čedič v pevném skupenství, u teploty nad 1200 °C je již čedič ve skupenství kapalném. Mezi vlnovými délkami 8,5 μm až 10,5 μm je vidět s rostoucí teplotou pokles emisivity. Dle zdroje [11] je tento pokles způsoben emitací oxidu siřičitého SO_2 , který se zvyšující se teplotou čediče více emituje na těchto vlnových délkách, jak je znázorněno na Obrázek 19.



Obrázek 19 Porovnání měření teploty čediče na dvou různých vlnových délkách. [11]

3. PRŮZKUM TRHU V OBLASTI BEZKONTAKTNÍCH TEPLOTNÍCH SNÍMAČŮ

Dle zadání bakalářské práce bylo úkolem provést průzkum trhu v oblasti bezkontaktních snímačů teploty. V rámci realizace průzkumu trhu jsou porovnány výrobky od společností: Fluke-Raytek, Optris, DIAS, IFM, Land-Ametek, Omega, Advanced Energy, Sensor Therm, Proxitron, Keller, Workswell, FLIR. Cíleně jsem se zaměřil na následující tři typy zařízení pro bezkontaktní měření teploty: pyrometry, linescenery a termokamery. V Příloha A - jsou tabulky rozdělené dle typu přístrojů. A.1 Pyrometry, A.2 Linescannery a A.3 Termokamery. Při realizaci průzkumu trhu jsem se zaměřil vzhledem k zadání od firmy Isover na bezkontaktní snímače teploty umožňující fixní montáž, nikoliv na ruční přístroje.

3.1 Průzkum trhu v oblasti pyrometrů

V oblasti pyrometrů byly vyhledávány produkty následujících výrobců: Fluke-Raytek, Optris, DIAS, IFM, Land-Ametek, Omega, Advanced Energy, Sensor Therm, Proxitron, Keller. Pyrometry lze rozdělit na ruční a fixní. Jak bylo výše zmíněno v rámci průzkumu trhu jsem se zaměřil na fixní přístroje určené pro průmyslové měření teplot. V seznamu dostupných pyrometrů uvedených v příloze A.1 jsou pyrometry menší se šroubovicovou hlavou, například pyrometry firmy IFM, konkrétně, TW2001 nebo od firmy Omega, například OS-MINI22-SN751-MA-HT. Zároveň jsou zde uvedeny i robustnější pyrometry se zaměřovací a zaostřovací optikou, pro přesné zaměření měřicího místa s možností přenosu videa, například pyrometr Fluke-Raytek E3MH-F2-V-0-0 Endurance. Na Obrázek 20 jsou výše uvedené snímače zobrazeny.



Obrázek 20 Pyrometry z průzkumu, nalevo IFM TW2001, uprostřed Omega OS-MINI, napravo Fluke-Raytek-E3MH Endurance. [30],[35],[37]

Z hlediska komunikace s průmyslovým prostředím podporují všechny vybrané pyrometry zasílání hodnot pomocí proudové smyčky 4-20 mA. Výrobci také nabízí chladičí obaly pro uložení pyrometru, které jsou umístěné ve vyšších teplotách. Příklad ochranného obalu od firmy Fluke-Raytek je na Obrázek 21.



Obrázek 21 Ochranný a chladičí obal pro pyrometr firmy Fluke-Raytek. [18]

3.2 Průzkum trhu v oblasti linescannerů

V oblasti linescannerů byl opět veden průzkum s podmínkou, že jejich teplotní rozsah bude nad 1500 °C. Byly vybrány linescannery od společností Fluke-Raytek, DIAS a Land-Ametek. Snímače od společnosti Fluke-Raytek nabízí možnost komunikace přes proudovou smyčku a fyzickou vrstvu RS485 sběrnice Profibus. Snímače společnosti DIAS a Land-Ametek podporují komunikaci přes Ethernet. Jako ochranu před působením vysokých teplot i v této sekci výrobci nabízí ochranné, respektive chladičí obaly. Pro napájení snímačů je použita 24 V DC v případě snímače LSP HD firmy Land-Ametek je využito napájení přes Ethernet (PoE). Seznam porovnávaných linescannerů je uveden v příloze A.2. Linescanner firmy Land-Ametek je na Obrázek 22.



Obrázek 22 Linescanner společnosti Land-Ametek LSP HD 12. [50], [51] upraveno

3.3 Průzkum trhu v oblasti termokamer

Z oblasti termokamer byly porovnány produkty společností: DIAS, Optris, Workswell, FLIR a Land-Ametek. Všechny zmíněné termokamery jsou určeny pro průmyslové prostředí, s výjimkou kamery FLIR A615, která je vyrobena pro vědecké účely. Mezi vybranými kamerami je i produkt firmy DIAS, PYRONIC 768 N, který je konstruován pro spalovací komory s teplotní odolností hlavice dle datasheetu [60] až 1800 °C po dobu minimálně 2 až 10 let dle náročnosti prostředí.



Obrázek 23 Termokamera DIAS, PYRONIC určena pro spalovací komory. [61]

Na Obrázek 23 je termokamera série PYRONIC měřící teplotu ve spalovací komoře, která je umístěna na automatickém systému, který je schopen posunout termokameru do

bezpečného prostoru. Chlazení tohoto systému může být řešeno buď vzduchem nebo vodou.

Ze zjištěných parametrů detektorů používají vybrané kamery většinou detektory typu CMOS, v případě vědecké kamery FLIR je využit detektor s oxidem vanadičným. Rozlišení u vybraných kamer je většinou 640x480 pixel, 764x480 pixel, případně jim blízké hodnoty, až na kameru Land-Ametek NIR-Borescope-2 K, jejíž rozlišení činí 1968x1476 pixel. Seznam porovnávaných termokamer je uveden v příloze A.3.

4. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ SE SADOU INFRAČERVENÝCH SNÍMAČŮ

V rámci 3. bodu zadání práce bylo provedeno zkušební měření v laboratoři VUT, FEKT se sadou infračervených snímačů, kde bylo hlavním cílem otestovat přesnost snímačů na kalibračním černém zářiči Voltcraft IRS-350. A dalším krokem bylo otestovat vliv emisního součinitele a vliv zorného pole na měření teploty.

4.1 Sada snímačů

K měření byla použita následující sada snímačů:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| - Raytek 10 | výrobní číslo: 3C 31 50 |
| - Raytek 10 MTB | výrobní číslo: CB3 312862 |
| - Meterman IR 608 | výrobní číslo: 050806618 |
| - Kecheng KC-180B-1 | výrobní číslo: 6F22/6LR61 |
| - Raytek Raynger IP (sonda) | výrobní číslo: DKP 3461 |
| - Raytek MX Phototemp | výrobní číslo: 26024-0201-00001 |
| - Raytek MX Raynger | výrobní číslo: 235783-0101-0005 |
| - Fluke Thermal Imager Ti55FT | výrobní číslo: 2649139 |

Raytek 10 a Raytek 10 MTB jsou průmyslové snímače s ovládacím panelem uzavřeným v krytu, kde se nastavují parametry měření, například emisivita. Na Obrázek 24 je snímač Raytek 10 znázorněn.



Obrázek 24 Snímač Raytek 10 s náhledem na řídicí jednotku. [19]

Snímače Meterman IR 608 a Kecheng KC-180B-1 jsou snímače ruční s LCD obrazovkou. Snímač výrobce Meterman je jednodušší a běžně dostupný, bez možnosti úpravy parametrů s pevně nastavenou emisivitou $\varepsilon = 0,95$ a laserovým bodovým zaměřovačem. Snímač Kecheng je již profesionálnější snímač s možností úpravy parametrů a nastavením emisivity. Na Obrázek 25 jsou snímače znázorněny.



Obrázek 25 Snímač Meterman IR 608 (vlevo), snímač Kecheng KC-180B-1 (vpravo).
[20]

Metex M-3850D je digitální multimetr, který má i funkci měření teploty pomocí sondy od firmy Raytek Raynger IP. Multimetr je znázorněn na Obrázek 26.



Obrázek 26 Metex M-3850D se sondou Raytek Raynger IP.

Raytek MX Phototemp i Raytek MX Raynger jsou snímače vyšší cenové kategorie s větším množstvím nastavitelných parametrů, než snímač Kecheng KC-180B-1. Oba snímače jsou vybaveny laserovým zaměřovacím kruhem, který označuje plochu zorného pole snímače. Měřicí přístroje mají také možnost nastavení emisivity jak ručně, tak i podle měřeného materiálu, který si uživatel může zvolit. Raytek MX Phototemp disponuje možností vyfotografovat měřenou plochu. Snímače jsou zobrazeny na Obrázek 27.



Obrázek 27 Snímače Raytek MX Phototemp (vlevo) Raytek MX Raynger (vpravo). [22], [23]

Fluke Thermal Imager Ti55FT je termokamera s rozlišením 320 x 240 pixelů, LCD obrazovkou s funkcemi pro vyfotografování snímané plochy jak ve viditelném spektru, tak i v měřeném infračerveném spektru. Fotografie v infračerveném spektru jsou v práci použity. Pro měření byla termokamera připevněna ke stativu. Kamera je zobrazena na Obrázek 28.



Obrázek 28 Termokamera Fluke Thermal Imager Ti55FT. [25]

4.2 Ověření přesnosti snímačů na referenčním černém tělese

Podle zadání práce bylo nejdříve provedeno ověření přesnosti předložených snímačů. Měření bylo prováděno tak, že předloženým snímačům byla nastavena hodnota emisivity $\varepsilon = 0,95$. Emisivita referenčního černého tělesa Voltcraft IRS-350 [24] je také $\varepsilon = 0,95$. Na referenčním černém tělese Voltcraft byla nastavována teplota od 50 °C do 350 °C s krokem 50 °C. Měřené snímače jsou během měření umístěny vždy ve stejné vzdálenosti 20 cm od měřené plochy. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tabulka 2.

Tabulka 2 Teploty naměřené snímači na kalibračním přístroji Voltcraft IRS-350

Teplota Voltcraft IRS-350 [°C]	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0	300,0	350,0
Raytek 10 [°C]	50,1	97,3	149,2	198,5	249,6	297,5	343,4
Absolutní chyba δ [%]	0,20	2,70	0,53	0,75	0,16	0,83	1,89
Raytek 10 MTB [°C]	-----	-----	-----	-----	247,6	295,1	346,2
Absolutní chyba δ [%]	-----	-----	-----	-----	0,96	1,63	1,09
Materman IR 608, Raytek Raynger IP [°C]	48,8	95,8	144,8	192,4	242,2	292,0	341,2
Absolutní chyba δ [%]	2,40	4,20	3,47	3,80	3,12	2,67	2,51
Kecheng KC-180B-1 [°C]	49,5	97,1	146,5	199,4	244,8	302,9	356,7
Absolutní chyba δ [%]	1,00	2,90	2,33	0,30	2,08	0,97	1,91
Metex M-3850D [°C]	46,0	87,0	123,0	175,0	223,0	268,0	268,0
Absolutní chyba δ [%]	8,00	13,00	18,00	12,50	10,80	10,67	23,43
Raytek MX Phototemp [°C]	50,4	100,6	150,2	199,7	250,2	300,3	350,0
Absolutní chyba δ [%]	0,80	0,60	0,13	0,15	0,08	0,10	0,00
Raytek MX Raynger [°C]	50,4	100,3	149,8	199,6	252,1	302,6	352,6
Absolutní chyba δ [%]	0,80	0,30	0,13	0,20	0,84	0,87	0,74
Fluke Thermal Imager [°C]	50,1	97,9	144,3	192,6	243,1	292,5	340,0
Absolutní chyba δ [%]	0,20	2,10	3,80	3,70	2,76	2,50	2,86

Z naměřených hodnot v Tabulka 2 lze vidět, že snímač Raytek 10 má rozmezí absolutní chyby od referenční hodnoty kalibračního přístroje 0,16 % až 1,89 %. Hodnota absolutní chyby 1,89 % byla naměřena při nejvyšší teplotě 350 °C, to může poukazovat na horní hranici měřicího rozsahu přístroje. Podobný rozsah odchylky má dle naměřených hodnot i snímač Raytek 10 MTB, se kterým byly naměřeny pouze 3 hodnoty z důvodu měřicího rozsahu. Snímač Meterman IR 608 má dle naměřených výsledků absolutní chybu mezi 2,40 % a 4,20 %. Metex M-3850D se sondou Raytek Raynger IP má ze všech snímačů největší rozsah absolutní chyby, a to od 8,00 % do 23,43 %. Z Tabulka 2 lze vidět, že pro referenční teplotu 300 °C a 350 °C snímač zobrazoval hodnotu 268 °C, to znamená, že snímač již dosáhl horní hranice měřicího rozsahu. Ruční snímače Raytek MX Phototemp a Raytek MX Raynger vycházejí z kalibračního měření jako nejpresnější. Ani jeden z nich nepřekračuje absolutní chybu 1 %. Termokamera Fluke Thermal Imager naměřila hodnoty s absolutní chybou v rozsahu 0,20 % až 3,80 %. Na Obrázek 29 je

zobrazen černý zářič firmy Voltcraft v infračerveném spektru na termokameře Fluke Thermal Imager a pro porovnání ve viditelném spektru. Je zde vidět oblast, kde zářič generuje teplo (červený kruh v infračerveném spektru).



Obrázek 29 Černý zářič v infračerveném spektru (vlevo) ve viditelném (vpravo).

4.3 Měření vlivu emisivity

Během kalibračního měření snímačů bylo provedeno další měření, a to na referenční teplotě 250 °C. Snímačem Raytek 10 a Raytek MX Phototemp bylo otestováno, jaký vliv má nastavená emisivita snímače na výslednou naměřenou hodnotu teploty. Při konstantní teplotě byla nastavována hodnota emisivity od 0,1 po 1 s krokem 0,1. Vzdálenost měřicích přístrojů od kalibračního přístroje byla opět 20 cm. Výsledky měření jsou zaznamenány v Tabulka 3.

Tabulka 3 Naměřené hodnoty při změnách hodnoty emisivity na přístrojích

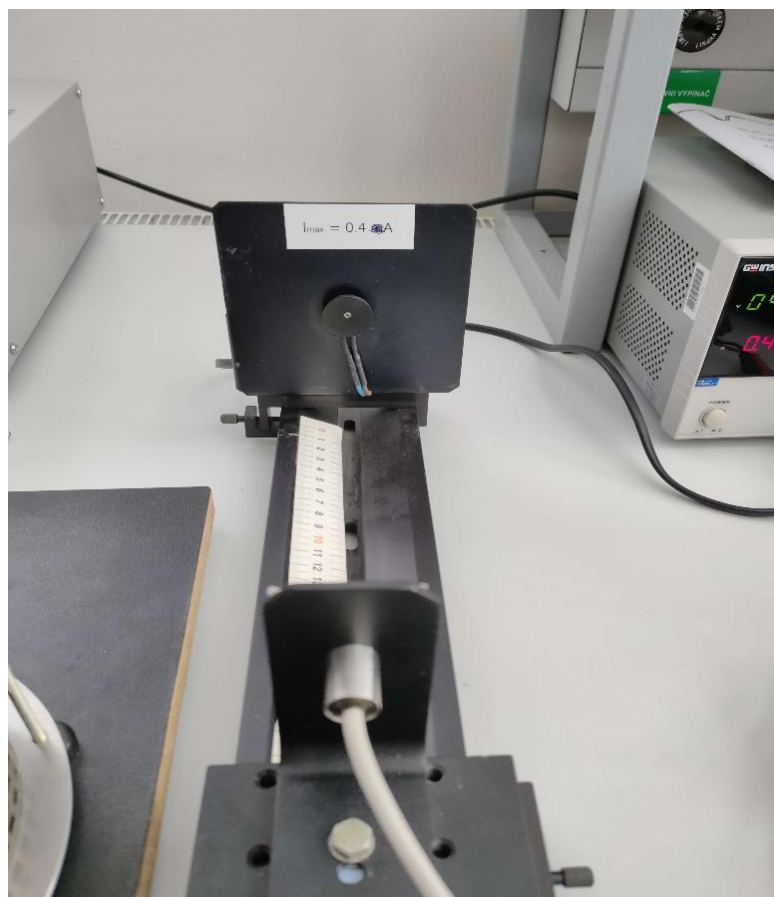
Referenční teplota kalibračního přístroje Voltcraft 250 °C, emisivita $\varepsilon = 0,95$					
Emisivita nastavená na měřicích přístrojích	$\varepsilon = 0,1$	$\varepsilon = 0,2$	$\varepsilon = 0,3$	$\varepsilon = 0,4$	$\varepsilon = 0,5$
Raytek 10 [°C]	Over limit	Over limit	514,8	427,0	369,0
Raytek MX Phototemp [°C]	Over limit	687,4	522,7	433,2	375,0
Emisivita nastavená na měřicích přístrojích	$\varepsilon = 0,6$	$\varepsilon = 0,7$	$\varepsilon = 0,8$	$\varepsilon = 0,9$	$\varepsilon = 1$
Raytek 10 [°C]	328,0	296,0	275,0	256,0	240,3
Raytek MX Phototemp [°C]	334,2	303,2	278,8	258,8	242,1

Z hodnot v Tabulka 3 lze konstatovat, že když je hodnota emisivity nastavená na přístroji nižší, než je emisivita povrchu, potom snímač naměří hodnotu teploty vyšší než jakou povrch ve skutečnosti vyzařuje. Naopak s výše nastavenou emisivitou snímačů, než jakou má povrch, se naměřená teplota snižuje, jak je vidět v Tabulka 3, kde při nastavené emisivitě 1 je naměřená teplota obou přístrojů nižší, než referenční teplota 250 °C. Při nastavené hodnotě emisivity $\varepsilon = 0,1$ byla naměřená hodnota teploty tak vysoká, že byla

mimo rozsah obou snímačů. Při hodnotě emisivity $\varepsilon = 0,2$ byla naměřená hodnota již jen mimo rozsah snímače Raytek 10.

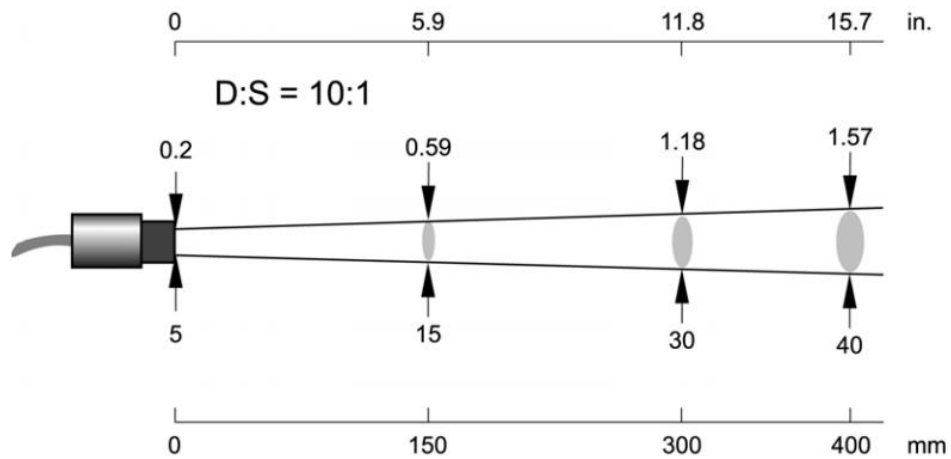
4.4 Měření vlivu zorného pole snímače

Z hlediska radiační termometrie má zorné pole snímače významný vliv na výslednou hodnotu. Plocha zorného pole je oblast, ze které je snímána teplota. V případě, že zorné pole snímače zabírá oblast, kde je jiná teplota, než kterou měříme, dojde ke zkreslení naměřené hodnoty. Cílem tohoto měření bylo dokázat, že vliv zorné pole snímače působí na změřené hodnoty. Pro měření byly opět použity snímače Raytek 10 a Raytek MX Phototemp. Z laboratorního vybavení byla použita dráha zakončená odrazovou deskou 120 x 120 mm a zahříváním terčíkem o průměru 25 mm. Na dráze se nachází pohyblivý držák, do kterého se umístil snímač Raytek 10. Dle metru, který je na dráze rovněž připevněn, se pohyblivým držákem se snímačem nastavila vzdálenost od terčíku a po ustálení naměřené hodnoty byla ze snímače odečtena hodnota teploty. Emisivita na měřicích přístrojích byla nastavena na hodnotu $\varepsilon = 0,95$. Laboratorní přípravek je znázorněn na Obrázek 30.



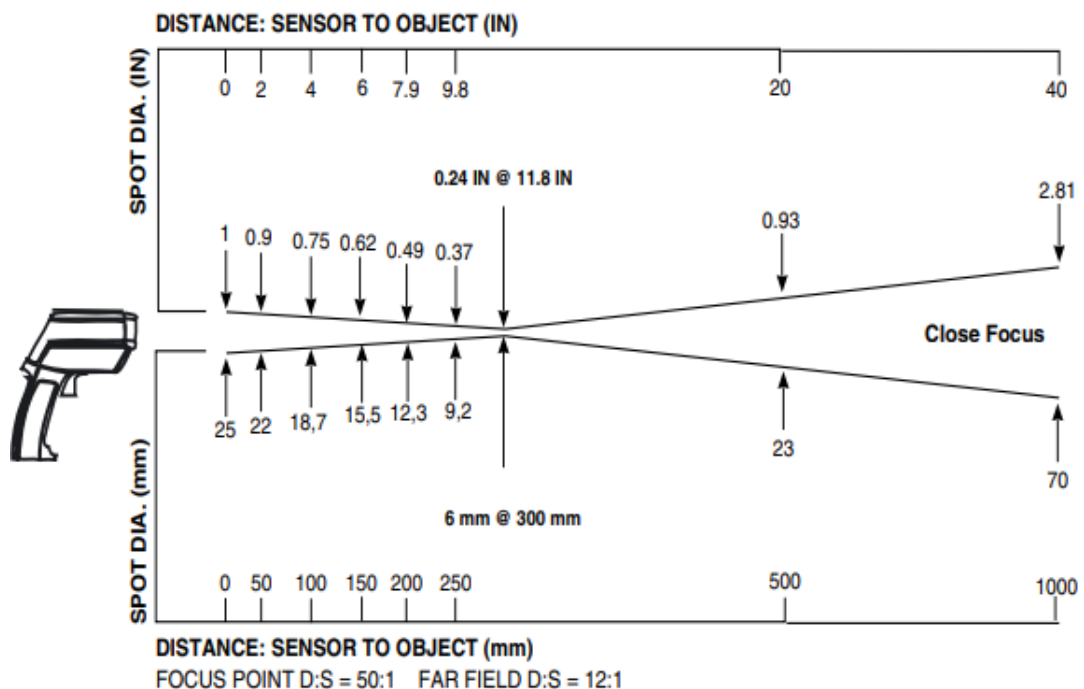
Obrázek 30 Přípravek s terčíkem a dráhou s připevněným snímačem Raytek 10.

Dle datasheetu získaného ze zdroje [19] k snímači Raytek 10 je poměr zorného pole snímače 10:1, to znamená, že například na ploše vzdálené 100 mm od snímače snímá kruhovou plochu o průměru 10 mm. Znázornění velikosti zorného pole v závislosti na vzdálenosti objektu je na Obrázek 31.



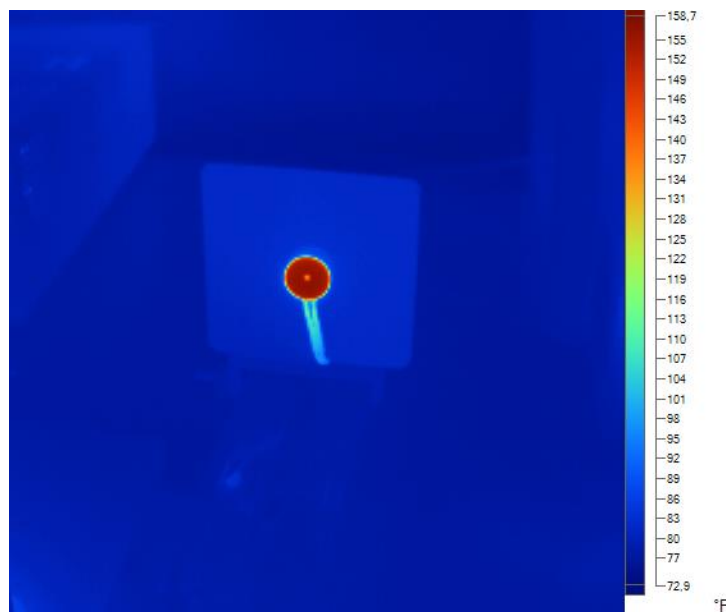
Obrázek 31 Velikost zorného pole snímače Raytek 10 při poměru 10:1. [19]

Snímač Raytek MX Phototemp je dle datasheetu ze zdroje [22] zaostřen na vzdálenost 300 mm v poměru 50:1. Celé zorné pole je vidět na Obrázek 32. Nejužší bod laloku je právě ve vzdálenosti 300 mm, kam je optika snímače zaostřena. Lalok se od zaostřeného bodu zvětšuje, jak směrem ke snímači, tak od snímače.



Obrázek 32 Velikost zorného pole snímače Raytek MX Phototemp. [22]

Měřený terčik je zahříván přes chladič tranzistoru, na který je přes teplotně vodivý tmel mechanicky upevněn. Z důvodu ochrany tranzistoru byl zvolen maximální protékající proud na 450 mA. Ustálená teplota terčíku byla určena pomocí termokamery na hodnotu 70 °C. Snímek terčíku z termokamery v infračerveném spektru je na Obrázek 33.

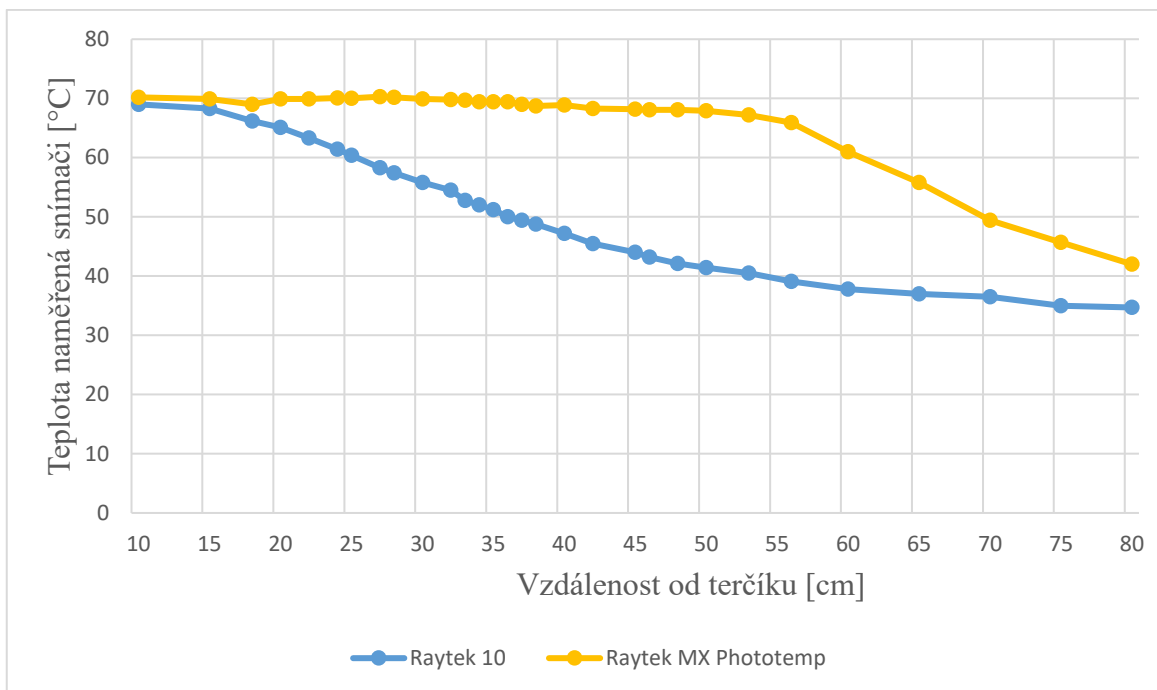


Obrázek 33 Terčik přípravku v infračerveném spektru.

Po dosažení konstantní teploty terčíku (70 °C) bylo provedeno měření, které probíhalo tak, že snímač Raytek 10 byl nastaven na vzdálenost 10 cm od terčíku a po jeho ustálení byla odečtena naměřená hodnota teploty. Následně byla teplota opětovně ze stejné vzdálenosti změřena snímačem Raytek MX Phototemp. Po každém měření byla následně zvýšena vzdálenost snímače od terčíku. A měřicí proces se opakoval. Měřicí vzdálenost byla zvolena na základě změny naměřené teploty na snímači. Zaznamenané hodnoty jsou v Tabulka 4.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty měření vlivu zorného pole snímače

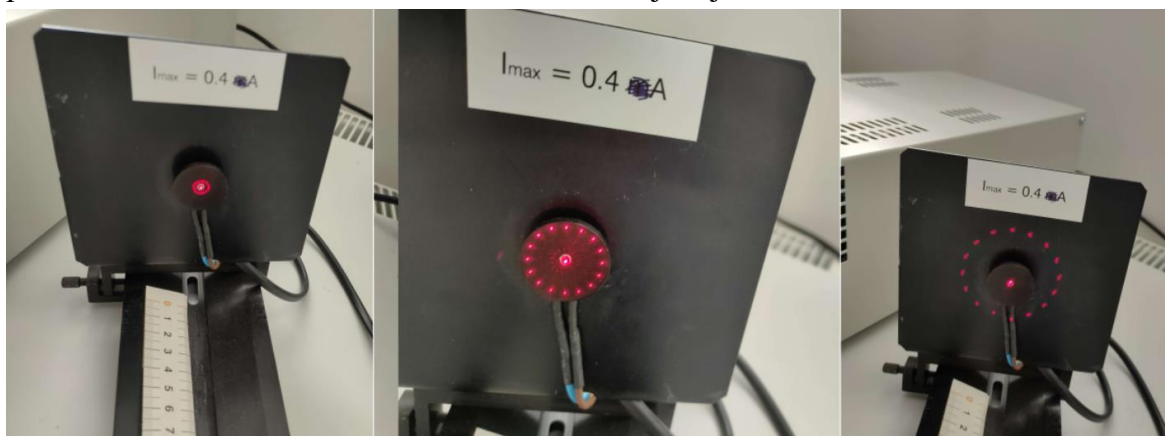
Teplota terčíku 70 °C										
Vzdálenost snímačů od terčíku [cm]	10	15	18	20	22	24	25	27	28	30
Raytek 10 [°C]	69	68,3	66,2	65,1	63,3	61,4	60,4	58,3	57,4	55,8
Raytek MX Phototemp [°C]	70,2	69,9	69	69,9	69,9	70,1	70	70,3	70,2	69,9
Vzdálenost snímačů od terčíku [cm]	32	33	34	35	36	37	38	40	42	45
Raytek 10 [°C]	54,5	52,8	52	51,2	50	49,4	48,8	47,2	45,5	44
Raytek MX Phototemp [°C]	69,8	69,7	69,4	69,4	69,4	69	68,7	68,9	68,3	68,2
Vzdálenost snímačů od terčíku [cm]	46	48	50	53	56	60	65	70	75	80
Raytek 10 [°C]	43,2	42,1	41,4	40,5	39,1	37,8	37	36,5	35	34,7
Raytek MX Phototemp [°C]	68,1	68,1	67,9	67,2	65,9	61	55,8	49,4	45,7	42



Obrázek 34 Průběh naměřených hodnot v závislosti na vzdálenosti od terčičku.

Z Tabulka 4 a Obrázek 34 je patrné, že snímač Raytek MX Phototemp má užší zorné pole, než snímač Raytek 10. Se zvyšující se vzdáleností od terčičku se naměřená hodnota snímače Raytek 10 snižovala z důvodu zvětšující se snímané plochy, která zasahovala i mimo nahřátý terčiček. Klesající trend je patrný již od počátku křivky snímače.

Na křivce naměřených hodnot snímače Raytek MX Phototemp je vidět, že zlom přichází až po překročení vzdálenosti 55 cm od terčičku. To je způsobeno užším zorným polem a zaostřením na vzdálenost 300 mm, jak je znázorněno na Obrázek 32.



Obrázek 35 Zorné pole snímače Raytek MX ve vzdálenosti 30 cm (vlevo), ve vzdálenosti 10 cm (uprostřed) a ve vzdálenosti 80 cm (vpravo)

Na Obrázek 35 je zobrazeno zorné pole snímače Raytek MX Phototemp. Snímač obsahuje laserové zaměřovací zařízení, které simuluje snímanou oblast v závislosti na vzdálenosti. Na vzdálenost 10 cm je zaměřovací kruh stále v oblasti terčičku. Ve

vzdálenosti 30 cm je zaměřovací kruh dokonce ještě menší. Na vzdálenost 80 cm již zaměřovací kruh přesahuje terčik a snímá i oblast za ním, to způsobuje zkreslení naměřené hodnoty a její snížení, jelikož oblast za terčíkem má nižší teplotu než terčik, jak lze vidět na snímku z termokamery na Obrázek 33.

4.5 Měření vlivu rozdílné emisivity materiálů

Poslední měření, bylo zaměřeno na vliv emisivity materiálů na měřicí přístroje. Pro měření byl využit laboratorní přípravek viz. Obrázek 36 s plotýnkami vyhřívanými topnými spirálami.



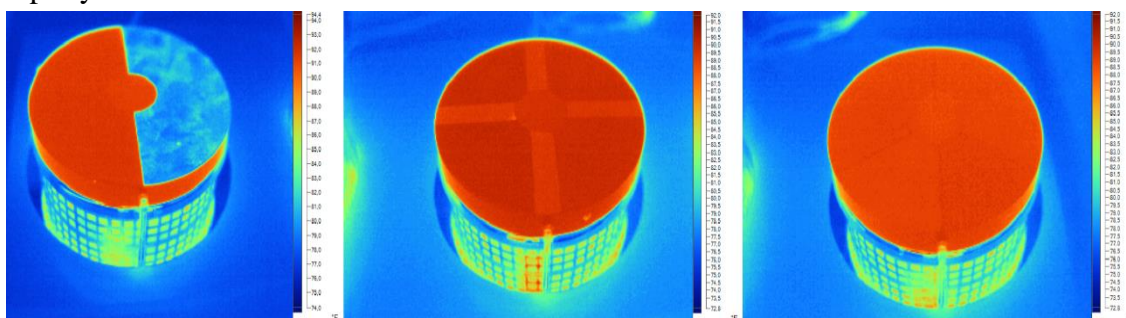
Obrázek 36 Přípravek s plotýnkami využitý pro měření vlivu emisivního součinitele.

Z Obrázek 36 má plotýnka nalevo rozdílný druh materiálů, kde stříbrná strana je nástřík oxidovaného hliníku, plotýnka uprostřed má hrubý povrch černou barvou, hladký povrch světlou barvou, ovšem ze stejného materiálu a plotýnka napravo má rozdílné barvy povrchu, ale také stejný materiál. Výsledkem měření je ověření vlivu závislosti různých povrchů testovaných materiálů na výslednou měřenou teplotu. Jako referenční hodnota teploty je brána prostřední nálepka s definovanou emisivitou 0,95. Ne každý materiál má emisivitu stejnou. Pro měření byl použit opět snímač Raytek MX Phototemp a Fluke Thermal Imager.

Na plotýnky bylo přivedeno napájení a následně se začaly ohřívat. Po ustálení jejich teploty začalo měření. Natavená emisivita na snímači byla $\epsilon = 0,95$. Nejdříve byla změřena teplota plotýnky s různou barvou povrchu (na Obrázek 36 napravo), kde byla zjištěna na všech barvách stejná teplota, a to 63,2 °C. Poté byla měřena teplota plotýnky s rozdílnou hrubostí materiálu, kde byla opět jak na hrubém, tak i na jemném povrchu zjištěna teplota 63,2 °C. Nakonec byla měřena teplota plotýnky s rozdílnými druhy materiálu (na Obrázek 36 plotýnka nalevo), kde na černém materiálu byla teplota opět přibližně 63 °C. Teplota oxidovaného hliníku byla snímačem určena na 36 °C. Pocitová teplota byla ovšem stejná jako na druhé polovině této plotýnky. Tímto bylo dokázáno, že rozdílná emisivita materiálů má zkreslující vliv na měření teploty, a je vždy důležité

nastavit na snímači správnou hodnotu emisivity. Při dorovnání teploty snímačem byla zjištěna emisivita oxidovaného hliníku přibližně na $\varepsilon = 0,27$

Po změření teploty byly jednotlivé plotýnky snímkovány termokamerou. Snímky jsou na Obrázek 37. V levé části obrázku je zobrazena plotýnka s rozdílnými druhy materiálů, kde lze vidět, jak termokamera vlivem jiné emisivity oxidovaného hliníku nesprávně určila teplotu této poloviny plotýnky. Na ostatních plotýnkách je vidět správné určení teploty.



Obrázek 37 Plotýnky v infračerveném spektru.

Emisivitu oxidovaného hliníku je možné dopočítat pomocí Sakuma-Hattoriho (4.1) rovnice [21]. Pro výpočet potřebujeme tyto parametry:

- Naměřenou teplotu snímačem = $36\text{ °C} = 309,15\text{ K}$
- Teplotu okolního prostředí, během měření v laboratoři = $23\text{ °C} = 296,15\text{ K}$
- Teplotu, kterou objekt reálně vyzařuje, teplota změřená na referenční nálepce uprostřed plotýnky = $63\text{ °C} = 336,15\text{ K}$
- Emisivitu nastavenou na snímači $\varepsilon = 0,95$

Nejdříve je potřeba přepočítat teploty pomocí Sakuma-Hattoriho rovnice teplotu na radiometrický signál, pro výpočet je potřeba dosadit teplotu ve stupních Kelvina:

$$S(T) = \frac{C}{\frac{c_2}{e^{AT+B}} - 1} \quad (4.1)$$

kde C je konstanta ($C = 1$), c_2 je konstanta ($c_2 = 14387,752\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$), A je konstanta ($A = 9,364\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$), B je konstanta ($B = 178,4\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$), T je teplota v Kelvinech (převod ze $^{\circ}\text{C}$ na K je $\text{K} = 273,15 + \text{Teplota ve } ^{\circ}\text{C}$), S(T) je výsledný radiometrický signál. [21]

Dosazení do rovnice (5.1) a přepočítání teplot na radiometrický signál:

$$S(T_{meas}) = \frac{1}{\frac{14387,752}{e^{9,364 \cdot 309,15 + 178,4}} - 1} \doteq 0,009351$$

$$S(T_S) = \frac{1}{\frac{14387,752}{e^{9,364 \cdot 336,15 + 178,4}} - 1} \doteq 0,013401$$

$$S(T_W) = \frac{1}{\frac{14387,752}{e^{9,364 \cdot 296,15 + 178,4}} - 1} \doteq 0,007696$$

Přepočítané teploty můžeme dosadit do vzorce o rovnosti měření teploty (4.2) [21], který je potřeba předtím upravit pro výpočet neznámé emisivity oxidovaného hliníku:

$$\varepsilon_{instr} \cdot S(T_{meas}) + (1 - \varepsilon_{instr}) \cdot S(T_d) = \varepsilon_S \cdot S(T_S) + (1 - \varepsilon_S) \cdot S(T_W) \quad (4.2)$$

kde ε_{instr} je emisivita nastavená na snímači, $S(T_{meas})$ je přepočítaná teplota změřená snímačem, $S(T_d)$ je přepočítaná teplota snímače, ε_S je emisivita měřeného objektu, $S(T_S)$ je přepočítaná teplota, kterou objekt reálně vyzařuje, $S(T_W)$ je přepočítaná teplota okolí.

Dle zdroje [21] je možné považovat teplotu snímače za stejnou jako teplotu okolí. Upravený vzorec (4.2) vypadá takto:

$$\varepsilon_{instr} \cdot S(T_{meas}) + (1 - \varepsilon_{instr}) \cdot S(T_W) = \varepsilon_S \cdot S(T_S) + (1 - \varepsilon_S) \cdot S(T_W)$$

Upravený vzorec (5.2) s vyjádřením emisivity měřeného objektu:

$$\varepsilon_S = \frac{\varepsilon_{instr} \cdot (S(T_{meas}) - S(T_W))}{S(T_S) - S(T_W)}$$

S dosazením a výpočtem hodnoty emisivity:

$$\varepsilon_S = \frac{0,95 \cdot (0,009351 - 0,007696)}{0,013401 - 0,007696} \doteq 0,275592$$

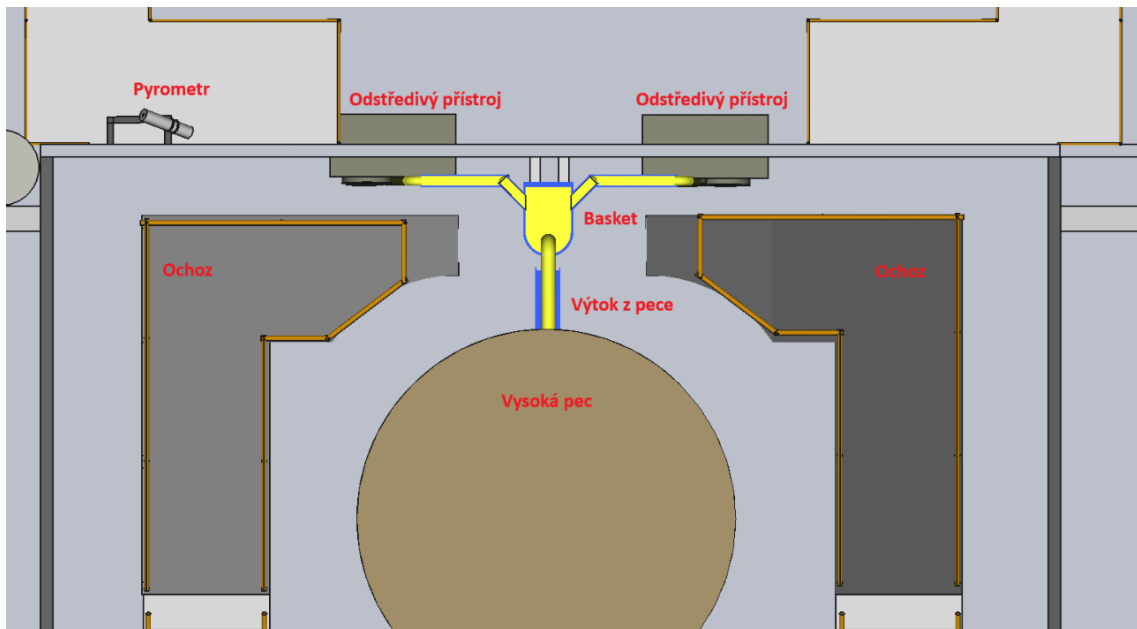
Výsledná vypočtená hodnota emisivity oxidovaného hliníku je $\varepsilon = 0,275592$. Experimentálně zjištěná emisivita snímačem byla $\varepsilon = 27$.

5. POPIS PRACOVISŤE VYSOKÉ PECE A SOUČASNÉ ŘEŠENÍ BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty VÝTOKU LÁVY

Vysoká pec je obecně prostředím s vysokými provozními teplotami a prašností. V továrně firmy Isover Saint-Gobain v Častolovicích (dále jen Isover) se používá kupolní vysoká pec pro tavení čediče a příměsí, z kterých se následně pomocí odstředivých kotoučů získává z minerální vata, která je dále zpracovávána. Jako topivo pro pec je využit koks, který je přehříván kyslíkem. Koks je do pece dovážen pomocí skipových dopravníků.

5.1 Popis pracoviště

Okolí výtoku vysoké pece je stísněný prostor, ze dvou stran přístupný pomocí ochozu se zábradlím. Jak je vidět na Obrázek 38. Z výtoku pece teče proud lávy do basketu. Basket je zařízení, které je možné pomocí elektromotorů naklánět tak, aby byla láva rovnoměrně distribuovaná mezi dva odstředivé přístroje s válci. Do odstředivých přístrojů vtéká roztavený čedič na rotující válce, které pomocí odstředivé síly oddělí vlákna z roztaveného čediče. Vlákna poté postupují dále výrobním procesem. Pec, výtok, basket i žlábký jsou chlazené vodou. Pro lepší přehled o pracovišti a jeho lepší vizualizaci byl vytvořen 3D model v aplikaci FreeCAD.



Obrázek 38 Půdorys pracoviště vysoké pece.

5.2 Podmínky na pracovišti

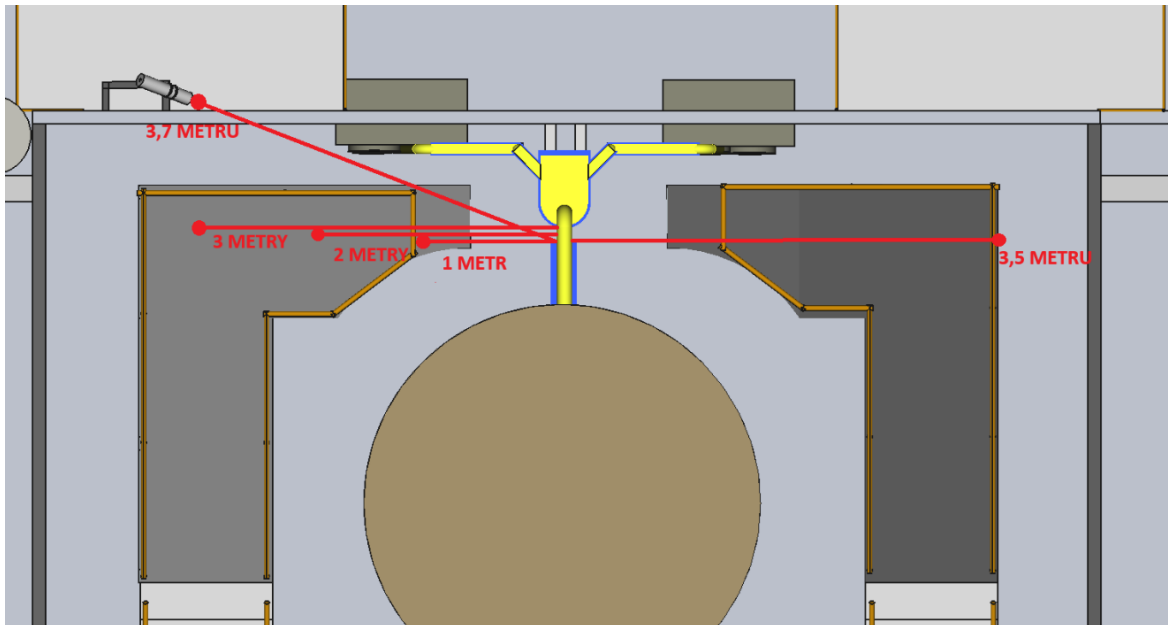
Prostředí v okolí pece během jejího standardního provozu se vyznačuje nadstandardně vysokými teplotami, velkou prašností, nadměrným hlukem a možnou vyšší koncentrací CO ve vzduchu. Před vstupem do pracoviště pece je nutné si nasadit chrániče sluchu, ochranný plášť z nehořlavého materiálu, přilbu se sklopným štítem a připnout si měřič kvality ovzduší.

Z důvodu zjištění okolní teploty na pracovišti směrem od výtoku dál bylo provedeno měření pomocí ručního teploměru THERM 2285-2 a laserového dálkoměru Leic DISTO DXT, kterým byla měřena vzdálenost místa od výtoku. Měření probíhalo ve vzdálenostech 1 metr, 2 metry, 3 metry, 3,5 metru od výtoku a u současného pyrometru.

Tabulka 5 Naměřené teploty v okolí vysoké pece.

Vzdálenost [cm]	Teplota [°C]
0	1488,0
100	74,6
200	61,0
300	58,0
350	47,0
370	37,0

Na Obrázek 39 jsou zakresleny pozice, na kterých byla teplota během standardního provozu měřena. Teplota lávy během měření byla změřena pomocí stávajícího pyrometru, který zjistil hodnotu 1488 °C. Při měření teploty kontaktním termočlánkem byla zjištěna teplota 1485 °C.



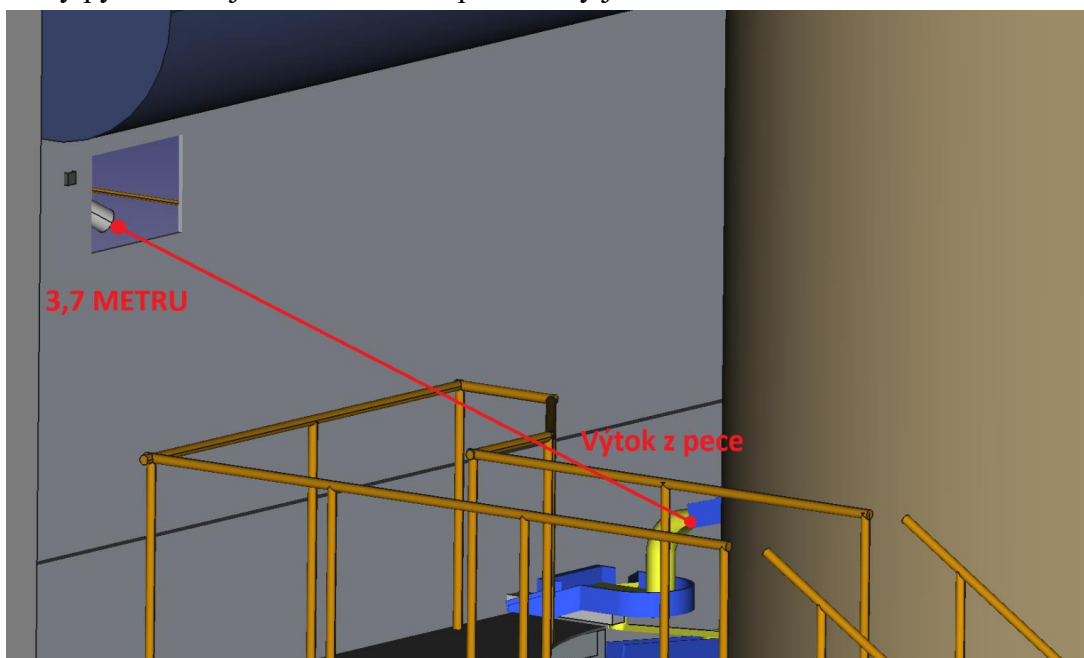
Obrázek 39 Půdorys pracoviště se znázorněnými body, kde byla měřena teplota.

Jako další aspekt podmínek na pracovišti je nutno zmínit z odstředivek občas vylétávající „granule“. „Granule“ jsou nerozvlákněné částice lávy, které z odstředivých kotoučů vylétávají do okolí. Na pracovišti je také vyšší prašnost z důvodu skipové dráhy, která vede k vysoké peci. Na dopravnících této dráhy je přepravován materiál a palivo do pece. Při převozu se z materiálu uvolňuje prach, který poté padá do pracoviště.

Důležité je také zmínit fakt, že jako směs do pece se používají dva druhy vsázky. Každá vsázka může mít rozdílnou emisivitu, toto je důležité pro výběr vhodného měřicího přístroje.

5.3 Současný systém měřící teplotu výtoku lávy

Teplota lávy při jejím výtoku je měřena bezkontaktně pomocí pyrometru. Vzdálenost pyrometru od výtoku lávy je 370 cm. Vzdálenost byla měřena pomocí laserového dálkoměru Leica DISTO DXT. Teplota u pyrometru při pracovním procesu pece byla naměřena 37,1 °C. Teplota byla naměřena pomocí teploměru THERM 2285-2. Pohled na současný pyrometr a jeho zaměření na proud lávy je zobrazen na Obrázek 42.



Obrázek 40 3D model pracoviště, zaměření současného pyrometru na výtok z pece.

Pyrometr je připojen k sběrnici dat, do které jsou zasílány informace aktuální naměřené teploty vytékající lávy. Pro práci s daty a řízení pece se využívá ve firmě Isover rozhraní od firmy ABB. Dle informací od konzultanta z firmy Isover a zaměstnanců obsluhující pec se provádí ještě kontrolní kontaktní měření lávy pomocí termočlánků, které provádí obsluha pece. V závislosti na požadované kvalitě vyráběné zateplovací vaty

provádí obsluha pece kontaktní měření jednou za tři hodiny, případně pro vyšší kvalitu vyráběné vaty i jednou za hodinu.

Dle informací obsluhy pece je rozdíl naměřených teplot v průměru 10 °C. Z naměřených dat v příloze Příloha B - a kapitole 5.4 plyne, že rozdíl je ještě vyšší. Tento rozdíl je způsoben tím, že stávající pyrometr je zaměřen na jedno určité místo, kterým láva vytéká. Směr výtoku lávy ovšem není stálý, směr se někdy mění, což má za následek, že snímaná oblast pyrometru zasahuje i mírně do plochy, kde neproudí láva. To způsobuje nepřesnost měření. Změna směru výtoku je dle informací od konzultanta z firmy Isover často způsobena vznikem „rampouchu“ na konci výtokového žlabu. Fotka „rampouchu“ je znázorněn na Obrázek 41.



Obrázek 41 Fotka „rampouchu“ vytvořeného na výtokovém žlabu pece.

Dle konzultanta „rampouch“ vzniká vlivem chlazení lávy. Koryto výtoku lávy má v sobě zabudované vodní chlazení z důvodu ochrany koryta před přehřátím. Chlazení ovšem kromě koryta výtoku ochlazuje i protékající lávu. Tento vliv urychluje chlazení lávy tekoucí na dně výtoku a podporuje vznik „rampouchu“, který poté odklání směr výtoku lávy. Odklon proudu lávy způsobí, že hodnota změřená pyrometrem není správná, protože v zorném poli pyrometru není pouze láva, ale i pozadí, které má nižší teplotu.

Zkreslení hodnot připomíná měření vlivu zorného pole popsaného v kapitole 4.4, akorát s tím rozdílem, že v tomto případě se nemění vzdálenost snímače od měřeného objektu, ale měřený objekt mění svoji pozici.



Obrázek 42 Pohled na výtok ze stávajícího pyrometru

Tabulka 6 Parametry stávajícího pyrometru

Parametry stávajícího pyrometru (Z datasheetu firmy ISOVER a [17])	
Firma	IRCON
Typ	5R-3015
Rozsah	1000–3000 °C
Spektrální rozsah	1,0 – 1,1 μm
Analogový výstup	4–20 mA
Digitální výstup	RS-485
Přesnost	±0,5 % z měřené teploty + 2 °C
Ochranný obal	Vzduchem chlazený pro operování v teplotní rozsahu 0–105 °C
Optické rozlišení	D/150 (Optika RA)
Průměr snímané kruhové plochy na vzdálenost 370 cm.	2,4–6 cm

Pro výpočet průměru kruhové plochy byl využit vzorec: [17]

$$d = \frac{D}{F} \quad (5.1)$$

Kde D je vzdálenost měřeného objektu a F je optické rozlišení pyrometru.

$$d = \frac{370}{150} = 2,4\bar{6} \text{ cm}$$

Výsledek po dosazení hodnoty naměřené vzdálenosti umístění pyrometru od výtoku (370 cm) a optického rozlišení pyrometru z Tabulka 6.

5.4 Data z měření teploty čedičové lávy

Pro účely práce a z důvodu jejího zadání byly dodány firmou Isover naměřená data, která dokazují chybu měření. Data jsou umístěna v Příloha B -. Jedná se o data z měření za období od 1. 3. 2024 do 1. 5. 2024. Tabulka je rozdělena do sloupců datum a čas měření, teplota změřena kontaktním termočlánkem, teplota změřena pyrometrem a rozdíl teplot. Rozdíl teplot byl počítán jako teplota kontaktního termočlánku minus teplota pyrometru, tedy rozdíl, kde je mínus znamená vyšší naměřenou teplotu pyrometrem a rozdíl, který je kladný, znamená vyšší teplotu naměřenou termočlánkem.

Z důvodu občasného odklonu směru lávy a chybného měření teploty nastává chyba, kdy je teplota změřená kontaktním termočlánkem podle dodaných dat vyšší i o 62 °C oproti teplotě naměřené pyrometrem. V Tabulka 7 je 5 nejvyšších kladných rozdílů teplot mezi kontaktním termočlánkem a pyrometrem.

Tabulka 7 5 nejvyšších kladných rozdílů teplot z dodaných dat (Příloha B -)

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
02.03.2024 12:16	1517	1483	34
15.03.2024 9:55	1494	1432	62
27.03.2024 21:25	1480	1438	42
03.04.2024 13:08	1488	1429	59
27.04.2024 7:54	1511	1476	35

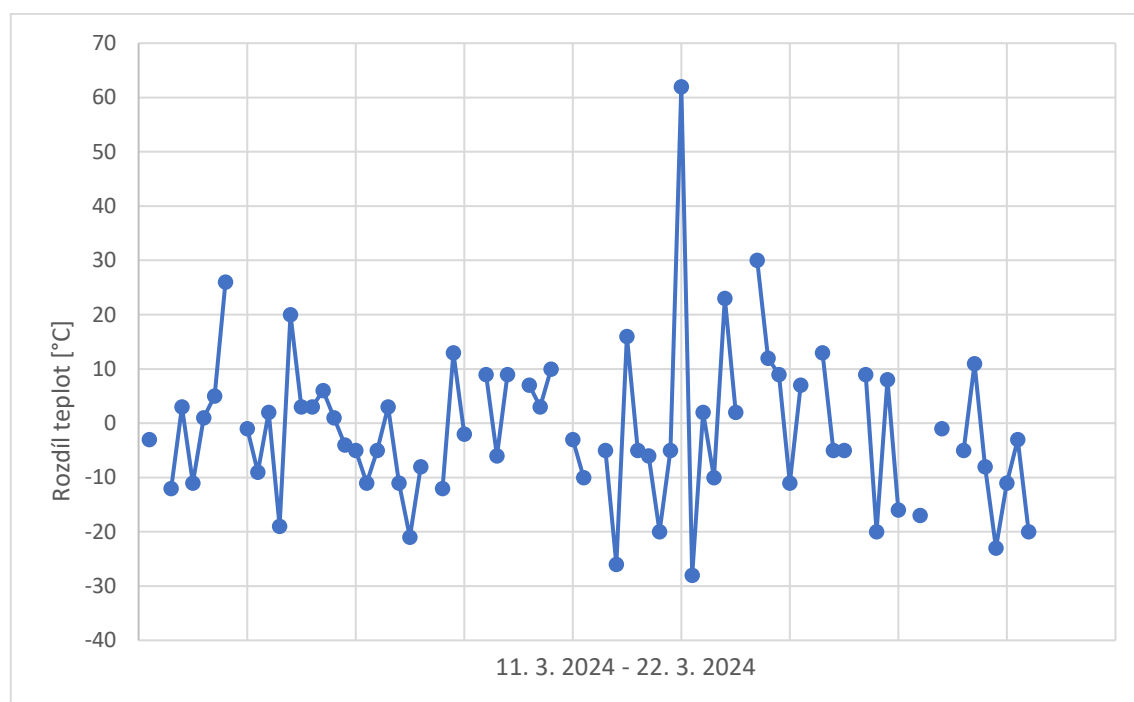
Rozdíly teplot nemusely být způsobeny pouze odklonem část proudů lávy z místa snímání pyrometru, ale také i chybou měřicích přístrojů, chybným odečtem hodnot ze strany obsluhy, nebo nevhodně nastavenou emisivitou. Vliv dalších chyb měření dokazuje i to, že teplotní rozdíl je i záporný, a to až o -31 °C dle Tabulka 8. Tudíž v tento případ je hodnota teploty naměřená pyrometrem vyšší než hodnota naměřená termočlánkem. V tento případ není tok lávy odkloněn od místa měření, naopak musí

protékat přes toto místo. Když se vezme v úvahu teplota změřená pyrometrem jako referenční může se dopočítat absolutní chyba.

Tabulka 8 5 nevyšších záporných rozdílů teplot z dodaných dat (Příloha B -)

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
07.03.2024 14:43	1437	1468	-31
13.03.2024 20:30	1472	1498	-26
15.03.2024 14:59	1475	1503	-28
01.04.2024 7:20	1442	1473	-31
20.04.2024 3:50	1474	1502	-28

Na Obrázek 43 je znázorněn vývoj rozdílu naměřených teplot v období od 11. 3. 2024. do 22. 3. 2024 z dat v Příloha B -. Místa, kde je graf přerušen, označují změnu závážky, nebo změnu koksu.



Obrázek 43 Graf vývoje rozdílu naměřených teplot kontaktně a pyrometrem za období od 11. 3. 2024 - 22. 3. 2024.

5.5 Definování požadavků na změnu měřícího systému

Na změnu systému jsou kladeny tyto požadavky:

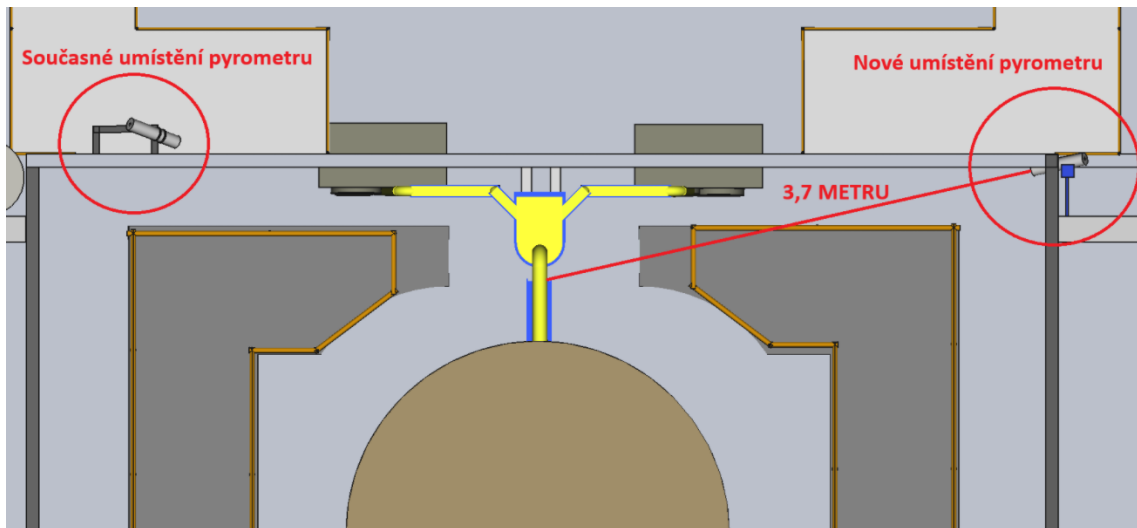
- Komunikace s průmyslovým rozhraním pomocí proudové smyčky 4-20 mA, nebo Profibusovou sběrnici s fyzickou vrstvou RS485.
- Výdrž snímače v hutních podmínkách i v extrémních případech, jako je roztápění pece.
- Zajištění snímání teploty lávy i při změně směru proudu z výtoku.
- V případě potřeby, navrhnutí nového místa umístění snímače na pracovišti.

6. NÁVRH NOVÉHO SYSTÉMU MĚŘENÍ TEPLOTY LÁVY

Dle požadavků firmy Isover a definice jejich podmínek jsou navrženy nové systémy měření teploty, které mají nahradit stávající systém se statickým pyrometrem. Návrhy popsané v této kapitole vychází z průzkumu trhu, který je v této práci popsán.

6.1 Pyrometr na lineárním posuvu

Prvním z návrhů by bylo zanechat stávající pyrometr IRCON 5R-3015 používaný k měření a přesunout ho na nové místo, které je znázorněno na 3D modelu, Obrázek 44. Z důvodu ochrany před extrémním případem jako je roztápní pece, kdy z výtoku pece vycházejí plameny, které se zastavují až o stěnu, která je naproti výtoku.



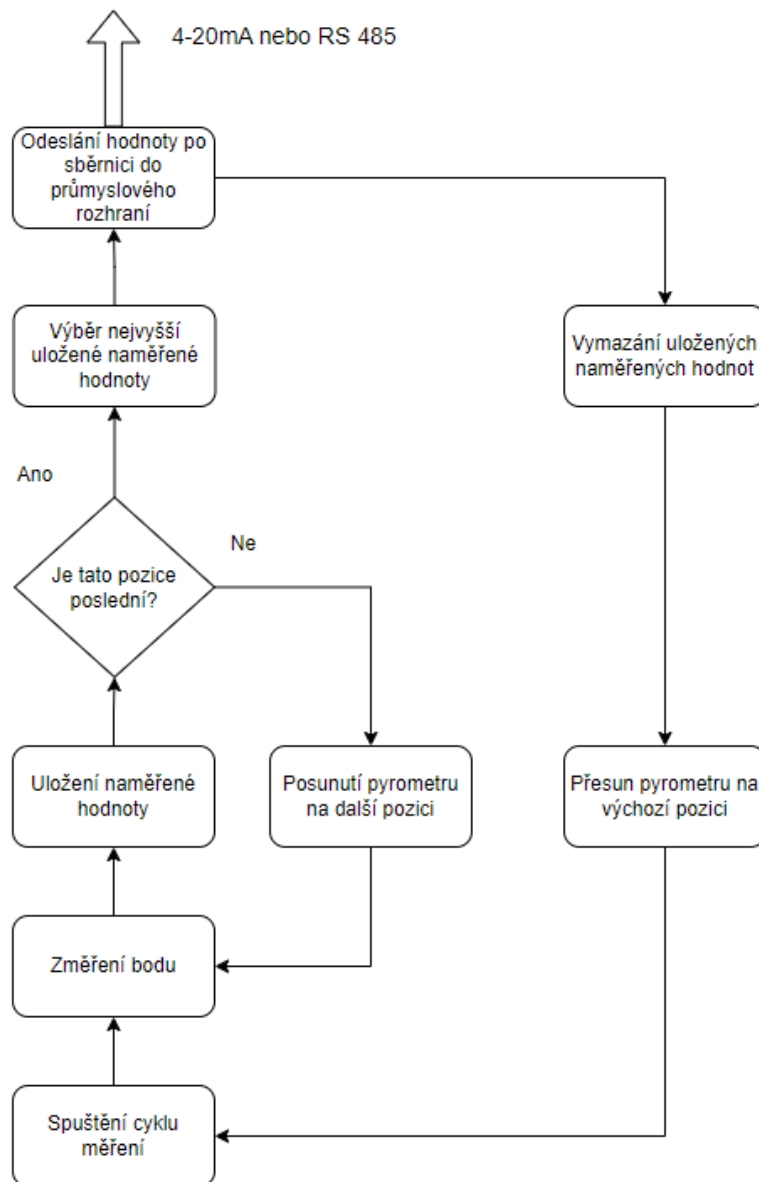
Obrázek 44 Návrh nové pozice pyrometru

Pro zamezení přenosu vibrací z vysoké pece by byl vytvořen držák z kovových profilů, který by byl ukotven k nosné stěně budovy haly. Pro zamezení chyby měření, která je způsobena změnou směru výtoku, na výtokovém žlabu je potřeba zajistit, že bude snímaná plocha pokrývat celý výtok. Možným řešením je lineární posuv, na kterém by byl umístěn pyrometr. Pro přesun je nutné připravit na nové místo napájecí kabel a sběrnici dat RS485, popřípadě analogovou proudovou smyčku 4-20 mA a přívod vzduchu pro chladicí obal. Toto nové místo zároveň umožňuje přístup pracovníků údržby k měřicímu systému z ochozu. Také je důležité vybrat vhodné koleje lineárního vedení s posuvníkem pro prostředí, ve kterém bude pracovat. Níže budou představeny varianty, které by mohly být pro prostředí u vysoké pece použity.

Pyrometr by se pohyboval na posuvu a snímal by více bodů na výtoku z pece. Pomocí této úpravy by systém fungoval podobně jako linescanner. Jako správná hodnota teploty by byla po provedeném měřicím cyklu zvolena ta nejvyšší naměřená, jelikož teplota lávy

je v tomto prostředí nejvyšší a nižší teploty by znamenaly, že byla snímána teplota z objektů mimo lávu. Pro aplikaci u vysoké pece by bylo třeba vybrat vhodnou délku posuvu a velikost kroku posunutí, aby bylo zajištěno, že i když se výtok lávy odkloní, bude stále alespoň v jednom bodě snímání pyrometru. Pohyb lineárního posuvu je možné nastavit jak horizontálně, tak vertikálně. Záleží na způsobu nastavení kolejnice.

Pro tuto variantu by bylo nutné vytvořit řídicí jednotku, která by ovládala pohyb měřicího systému a provést úpravu, která by zajistila, že po provedení jednoho cyklu se odešle pouze nejvyšší naměřená hodnota do průmyslového rozhraní. Na Obrázek 45 je návrh blokového diagramu měřicího systému.



Obrázek 45 Návrh blokového diagramu měřicího systému

Důležitý parametr v tomto řešení bude vzdálenost, o kterou se bude posouvat lineární posuv na kolejnici pro snímání nové pozice. Tento parametr bude záviset na optickém rozlišení a následném průměru snímané plochy. Pro případ stávajícího pyrometru IRCON je průměr plochy $2,4 \cdot 10^{-6}$ cm. Pyrometr Pyrospot DG 56NV firmy DIAS má optické rozlišení D/200, z toho vyplývá dle vzorce (5.1), že na vzdálenost 370 cm bude průměr snímané plochy 1,85 cm. Vzdálenost od výtoku na novém místě byla naměřena stejná jako vzdálenost na stávajícím místě. Pro co nejpřesnější měření by bylo potřeba, aby se měřené plochy co nejvíce překrývaly, to by ovšem prodlužovalo dobu jednoho cyklu měření. Čím menší bude překryv měřené plochy, tím se snižuje přesnost, ale naopak zrychlí cyklus. V tomto případě by bylo nutné provést zkušební měření a dle výsledků nastavit ideální poměr rychlosti cyklu a přesnosti měření.

6.1.1 Šroubovicové lineární vedení

Šroubovicové lineární vedení se skládá z pojezdu, který je na vodicích kolejničích a pohybová síla je přenášena pomocí šroubovice, kterou otáčí krokový motor. Tento druh mechanismu se používá v CNC strojích nebo například v 3D tiskárnách.

Pro pohyb pojezdu na vodicích kolejničích a minimalizaci tření se používají kuličková nebo válečková ložiska. Pojezd se začne pohybovat tím, když motor začne otáčet šroubovicí, na které je pojezd. Pojezd má v sobě závit, který se při pohybu začne posouvat dle směru otáčení a tím se pohybuje i po dráze.



Obrázek 46 Lineární posuv se šroubovicí společnosti ESES. [28]

Ke zjištění pozice, na které se pojezd nachází, se může použít například magnet na hřídeli krokového motoru. Natočení magnetu snímá hallova sonda, která dokáže, podle aktuálního proudění magnetického pole magnetu, určit pozici natočení hřídele. Případně

je možné použít místo krokového motoru servopohon se snímačem otáček, např. odpovídající resolver.

Tento mechanismus by v případě instalace v blízkosti vysoké pece musel být pravidelně udržován z důvodu vysokých teplot a zvýšené prašnosti, převážně pohybový mechanismus by bylo potřeba udržovat z důvodu vzniku možné koroze a zadření šroubovice.

6.1.2 Řemenové lineární vedení

Řemenové vedení se odlišuje od šroubovicového tím, že pro přenášení pohybové síly mezi motorem a pojezdem je použit místo šroubovice řemen. Pojezd je umístěn na řemenu a směr pohybu je korigován vodící kolejnici. Opět je tento mechanismus využíván v CNC strojích nebo 3D tiskárnách, ale i dalších aplikacích v průmyslu a robotice. Výhoda oproti šroubovici spočívá v nižších požadavcích na údržbu a vyšší schopnosti absorbovat vibrace z vysoké pece. Ovšem nevýhoda spočívá ve větší náchylnosti řemenů k opotřebení vlivem prostředí, kdy by byl posuv umístěn. V případě umístění u vysoké pece, a především při jejím roztápní by byly okolní podmínky pro řemen méně vhodné než pro šroubovici.

6.1.3 Výběr pyrometru

Jak bylo výše zmíněno, je možné použít stávající pyrometr, v případě volby nového pyrometru by bylo možné zvolit pyrometr Fluke-Raytek E3MH-F2-V-0-0 Endurance z důvodu lepšího optického rozlišení, které je 300:1 oproti 150:1, které by zajistilo menší průměr snímané plochy a lepší přesnosti, která činí $\pm 0,3 \%$ z naměřené hodnoty + 1 °C oproti $\pm 0,5 \%$ z měřené teploty + 2 °C.

6.2 Pyrometr na otočném podstavci

Tento návrh spočívá v připevnění pyrometru na hřídel krokového motoru nebo servopohonu, ke kterému by bylo možné přidat převodovku, pro větší citlivost natočení pyrometru. V rámci tohoto návrhu by se pyrometr otáčel v jedné ose a byl by schopný snímat celou plochu výtoku. Pro přenos pohybové energie není zde potřeba žádného

řemene ani šroubovice. Síla by byla přenášena z hřídele motoru na pyrometr, který by se následně otáčel.



Obrázek 47 Motorizovaná jednotka firmy Land-Ametek Spot Actuator. [52] upraveno

Na Obrázek 47 je produkt firmy Land-Ametek, podle stránek výrobce [52] a datasheetu [53] se jedná o výrobek s jednou pohyblivou osou, na kterém je umístěn pyrometr. Systém je schopen mimo jiné funkce autoscan, to znamená provést snímání zadaného rozsahu a následně se zaměřit na nejvyšší teplotu (hotspot). V rámci konfigurace výrobku je možnost varianty, kdy PLC pomocí 24 V signálu spustí měřicí cyklus a následně odečítá hodnoty na proudové smyčce 4-20 mA. Varianta připojení k Actuatoru pomocí sběrnice Modbus TCP anebo Webservru. Tato varianta nabízí nastavení parametrů a spuštění cyklu Actuatoru dálkově. Ovšem z důvodu podmínek stanovených firmou Isover by bylo nutné v tomto případě použít přechodník mezi průmyslovými sběrnici Modbus a Profibus. Pracovní teplota Actuatoru je 5-60 °C s chladicí podložkou se je hodnota 5-100°C. Actuator lze doplnit také o chladicí jednotku pro pyrometr. Z důvodu kompatibility s tímto zařízením a chlazením pyrometru by v této variantě návrhu bylo potřeba využít pyrometry nabízené firmou Ametek. Například SPOT+ M100 zmíněný v příloze A.1. Pro tento by bylo vhodnější umístění na nově navrhované místo (viz. Obrázek 44) z důvodu pevnějšího ukotvení k nosné stěně.

Z datasheetu pyrometru je známá hodnota zorného pole, která je 200:1. S použitím vzorce (5.1) by byla známá velikost průměru snímané plochy, který by činila 1,85 cm.

6.3 Linescanner

Linescannery jsou konstruovány pro použití kolmo vůči měřeným pohybujícím se objektům, například při měření teploty skleněných tabulí. Umístění nad výtok by bylo pro linescannery nebezpečné z důvodu roztápní pece, kdy je tato oblast vystavena plamenům vystupujících z otvoru výtoku. Umístění by tedy opět muselo být buď na stávajícím místě pyrometru, které je ovšem náchylné na vibrace z pece, nebo na možné nové místo, kde by byl pevněji ukotven k nosné stěně výrobní haly (viz. Obrázek 44). V příloze A.2 zmíněný linescanner MP3001MH firmy Fluke-Raytek má zorné pole 90°. Pro aplikaci ve vzdálenosti 370 cm od výtoku by byl pruh teplot zaznamenaný linescannerem velmi úzký. Tento problém by bylo možné snížit vzorkovací frekvencí linií za vteřinu, u tohoto modelu 300 Hz, a tím zvýšit počet vzorků na jedné linii. Dle datasheetu linescanneru MP3001MH je zorné pole jednoho bodu 200:1, tím by opět průměr plochy jednoho vzorku byl 1,85 cm.

6.4 Termokamera

Pro návrh s termokamerou by mohlo být využito místo jako pro výše zmíněný pyrometr, nebo i stávajícího místa, kde je umístěn pyrometr (viz. Obrázek 44). Jako návrh termokamery byl zvolen produkt firmy OPTRIS, a to konkrétně PI 05M, z důvodu, že tento výrobek je určen speciálně do hutnického prostředí. Tato termokamera má výhodu vyššího spektrálního snímání, a to od 500 nm do 540 nm vlnové délky. Výhodou je, že dochází ke snížení chyby měření pro objekty s neznámou anebo měnící se emisivitou.



Obrázek 48 OPTRIS PI 05M. [29]

Kamera má rozlišení 764 x 480 pixel s rozsahem teplot od 900 °C do 2450 °C a detektorem typu CMOS. Podporuje sběr dat pomocí analogové proudové smyčky a funkci Hotspot, která automaticky detekuje nejvyšší naměřenou teplotu a zasílá jí do

průmyslového rozhraní. K této termokameře je důležité dokoupit chladicí obal, který je v hutnickém prostředí nutností a který firma OPTRIS nabízí. Dále by pro ochranu kamery a snímače by bylo potřeba využít ochranného sklíčka a průmyslového rozhraní.



Obrázek 49 Doplnkové vybavení pro termokameru Optris PI 05M. [29]

Na Obrázek 49 je doplňkové vybavení potřebné pro termokameru k umístění u vysoké pece, nalevo je průmyslové rozhraní s analogovými a digitálními vstupy a výstupy, uprostřed ochranný optický filtr a napravo chladicí obal. Optika OF25 [62], se kterou je termokamera Optris PI 05M dodávána, by měla nanaměřenou vzdálenost 370 cm parametry, které jsou uvedeny v Tabulka 9 a které byly zjištěny pomocí optické kalkulačky uvedené ve zdroji [63].

Tabulka 9 Optické parametry kamery na vzdálenost 370 cm.

Parametry optiky OF 25 na vzdálenost 370 cm. FOV optiky = 27 ° x 17 °	
Zorné pole, výška [m]	1,07
Zorné pole, šířka [m]	1,70
Zorné pole, diagonála [m]	2,00
Velikost plochy pixelu [mm]	2,20 x 2,20

6.5 Zhodnocení návrhů

Pro řešení problému s měřením teploty lávy byly představeny výše uvedené návrhy 6.1, 6.2 a 6.4. Linescanner 6.3 byl po konzultaci s technologií firmy Isover, dle kterých nejde technologicky umístit linescanner k pracovišti vysoké pece.

6.5.1 Návrh pyrometru na lineárním posuvu

Tento návrh by měl pomocí postupného měření jednotlivých bodů v linii eliminovat chybu měření, která by byla způsobena odklonem směru proudu lávy. Z lineárních posuvů by bylo výhodnější zvolit šroubovicový z důvodu náročnějších podmínek a vysokých teplot. Řídící jednotka by ovládala lineární posuv a odesílala nejvyšší naměřenou hodnotu. V porovnání se stávajícím systémem by tento měl výhodu eliminace chyby měření na základě změny proudu lávy, v případě volby navrženého pyrometru z průzkumu trhu od firmy Fluke-Raytek E3MH-F2-V-0-0 Endurance by byla snížena

i hodnota chyby měřicího přístroje. Nevýhody by mohly vyplynout z hlediska složitějšího mechanismu, o který by mohla být složitější údržba a delší doba snímání teploty, která by se mohla upravovat počtem snímaných vzorků.

6.5.2 Návrh pyrometru na otočném podstavci

V případě tohoto návrhu by byla pomocí otočného podstavce Spot Actuator firmy Land-Ametek eliminována chyba měření způsobena změnou směru toku lávy. Díky podstavci s funkcí vyhledávání nejteplejšího bodu na zvoleném měřicím úseku by se nemusel vyvíjet nový systém, tímto je tento systém výhodnější než lineární posuv. Výhodou tohoto systému oproti stávajícímu by byla eliminace chyby způsobena změnou směru toku lávy. Pro kompatibilitu se systémem Spot Actuator je potřeba použít pyrometr firmy Land-Ametek SPOT+ M100 s uvedenou přesností měření $\pm 0,25$ % z naměřené hodnoty nebo 2 °C, dle toho, která hodnota je vyšší. Tímto by byla zvýšena přesnost měření oproti stávajícímu pyrometru IRCON (viz. Tabulka 6). Případnou nevýhodou tohoto systému může být jeho větší sofistikovanost oproti stávajícímu systému a pravděpodobná vyšší náchylnost k poruchovosti vlivem náročných hutních podmínek.

6.5.3 Návrh termokamery

Snímání teploty termokamerou Optris PI 05M by opět zajistilo měření teploty lávy i v případě změně směru jejího toku. Návrh by splňoval podmínku zasílání aktuální teploty na proudové smyčce. Kamera by byla dovybavena chladicí jednotkou a ochranným okénkem umístěným na optice. Z hlediska srovnání se současným systémem udává výrobce termokamery vyšší chybu měření, a to +/- 1 % z měřené hodnoty, současný pyrometr má hodnotu nižší (viz. Tabulka 6). Ovšem dle podmínek v kapitole 5.5 splňuje podmínky. Oproti předchozím návrhům a současnému řešení tento systém neobsahuje žádné pohybové komponenty.

7. ZÁVĚR

V této bakalářské práci bylo úkolem navrhnout nový systém měření teploty roztaveného čediče vytékajícího z vysoké pece pro výrobní podnik firmy Isover v Častolovicích. Nejdříve byla proveden literární průzkum.

V kapitole 1, kde byly sepsány poznatky o výzkumu a vývoji v oblasti bezkontaktního měření teploty objektu. Bylo zde zaměřeno na teoretické základy o elektromagnetickém záření, objevení infračerveného spektra, koncept absolutně černého tělesa a na bezkontaktní měřicí přístroje teploty. Konkrétně na pyrometry, linescannery a termokamery.

V kapitole 2 byly na základě vědeckých článků popsány metody bezkontaktního měření teploty roztavené železné rudy, ve kterých byly použity termokamery a aplikované metody zpracování obrazu a umělé neuronové sítě pro rozlišení stavů, kdy se vyskytuje na proudu struska nebo když je zorné pole zastíněno prachem. V druhé části kapitoly je na základě vědeckých článků popsáno experimentální měření emisivity roztaveného čediče v laboratorních podmínkách.

V kapitole 3 byl proveden výběr měřicích přístrojů na trhu v oblasti bezkontaktních snímačů teploty. Bylo vybráno 30 snímačů, jejichž parametry jsou zaznamenány v tabulkách v příloze A.

V kapitole 4 je zaznamenán průběh a výsledky měření provedené v laboratořích VUT, FEKT s předloženou sadou snímačů. Součástí měření bylo ověření přesnosti předložených snímačů na referenčním černém tělese, byl potvrzen vliv emisního součinitele na měřenou hodnotu a vliv zorného pole.

V kapitole 5 bylo na základě provedených měření popsáno pracoviště vysoké pece. Bylo provedeno měření teploty na pracovišti v různých vzdálenostech od místa výtoku lávy při standardním provozu. Dále byl vytvořen zjednodušený 3D model pracoviště v aplikaci FreeCAD pro lepší vizualizaci. Byly definovány požadavky firmy Isover na nový systém a popsán problém chybného měření současného systému, který byl doložen daty z měření zobrazených v tabulkách v příloze B.

V kapitole 6 jsou předloženy 3 návrhy nových měřicích systémů a popsány jejich výhody a možné nevýhody oproti stávajícímu systému měření pyrometrem.

Po předložení nových návrhů měřicího systému technologům firmy Isover byla zvolena varianta s použitím termokamery jako nejvhodnější pro tuto aplikaci.

LITERATURA

- [1] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Senzory neelektrických veličin. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-180-2.
- [2] Zpravodaj pro měření a regulaci č.1., *Bezdotykové měření teploty*, vyd. 2., OMEGA Technologies, 2000, s. 83.
- [3] NOVÁK, Ivo. *Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetickeho-pole-na-lidsky-organismus>. [cit. 2024-05-19].
- [4] KADLEC, Karel. Online. VČCHT Praha. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf. [cit. 2024-05-09].
- [5] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Soubor: Solar spectrum cs.svg*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_cs.svg. [cit. 2024-03-26].
- [6] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *Sunlight*. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>. [cit. 2024-05-19].
- [7] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *Black body*. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_body. [cit. 2024-03-27].
- [8] KRÁLOVÁ, Magda. *Záření černého tělesa*. Online. Eduportál Techmania. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/zareni-cerneho-telesa>. [cit. 2024-03-29].
- [9] LINE SCANNER. *Linescanner MP150 Infrared Temperature Measurement for Quality Control and Process Automation Raytek Confidential 10/2010, Rev. B*. Online. Ppt download. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/11941356/>. [cit. 2024-05-01].
- [10] SVOBODA, Štěpán. *Termokamery a vysokorychlostní kamery pro zvýšení kvality a snížení nákladů ve výrobě*. Online. INFOCUBE s.r.o. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/termokamery-a-vysokorychlostni-kamery-pro-zvyseni-kvality-a-snizeni-nakladu-ve-vyrobe/>. [cit. 2024-05-01].
- [11] LEE, R. J.; RAMSEY, M. S. What is the emissivity of active basaltic lava flows. (“What Is the Emissivity of Active Basaltic Lava Flows? - NASA/ADS”) In: *Proceedings of the AGU fall meeting, San Francisco, CA, USA*. (“Atmosphere | Free Full-Text | Does Light Pollution Affect Nighttime ...”) 2016. p. 12-16.
- [12] PAN D, JIANG Z, CHEN Z, GUI W, XIE Y, YANG C. *Temperature Measurement Method for Blast Furnace Molten Iron Based on Infrared Thermography and Temperature Reduction Model*. Online. PubMed Central (PMC). Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6263440/>. [cit. 2024-05-02].

- [13] GONG P, PAN D, JIANG Z, YANG CH, GUI W. *Online Measurement Method of Molten Iron Temperature After Blast Furnace Skimmer Based on Infrared Vision*. Online. ScienceDirect. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896323011114>. [cit. 2024-05-03].
- [14] LOMBARDO V, PICK L, SPINETTI C, TADEUCCI J, ZAKSEK K. *Temperature and Emissivity Separation 'Draping' Algorithm Applied to Hyperspectral Infrared Data*. Online. ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342459244_Temperature_and_Emissivity_Separation_'Draping'_Algorithm_Applied_to_Hyperspectral_Infrared_Data. [cit. 2024-05-05].
- [15] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Minerální vata*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Miner%C3%A1ln%C3%AD_vata. [cit. 2024-05-13].
- [16] Fluke. *Fluke Ti480 PRO Infrared Camera*. Online. Fluke. Dostupné z: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/ti480-pro>. [cit. 2024-05-01].
- [17] Ircon. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://pro-4-pro.com/media/product/24149/attachment_de-1398249476.pdf. [cit. 2024-05-13].
- [18] Fluke. *Endurance® High Temperature Infrared Pyrometers*. Online. Fluke Process Instruments. Dostupné z: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/products/infrared-temperature-solutions/spot-pyrometers/endurance>. [cit. 2024-04-04].
- [19] Raytek. *Raytek Non-Contact IR Temperature Sensor, 10: 1 Optics High Ambient Temperature of 450°F*. Online. Cole-Parmer. Dostupné z: <https://www.coleparmer.in/i/raytek-non-contact-ir-temperature-sensor-10-1-optics-high-ambient-temperature-of-450-f/3966720>. [cit. 2024-04-02].
- [20] Kecheng, KC-180B-1. *Kecheng*. Online. Kecheng. Dostupné z: http://www.kc-motor.com/wap/en/show_pro.asp?id=215&tid=77&pid=0. [cit. 2024-04-02].
- [21] Fluke. *Emissivity compensation for Fluke Calibration 4180 Series Precision Infrared Calibrators*. Online. Dostupné z: https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/4276605A_EN_w.pdf. [cit. 2024-05-19].
- [22] Raytek. *Raytek MX6 PhotoTemp Infrared Thermometer*. Online. Instrumart. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/products/734/raytek-mx6-phototemp-infrared-thermometer>. [cit. 2024-04-02].
- [23] Raytek. *Mt4 Raytek Mini Temp Portable Infrared Thermometer*. Online. Indiamart.com. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/mt4-raytek-mini-temp-portable-infrared-thermometer-9045179733.html>. [cit. 2024-04-02].
- [24] Voltcraft. *Kalibrátor IR teploměru IRS 350 Návod k obsluze*. Online. Dostupné z: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/cs/000101366ML01/manual-101366-voltcraft-irs-350-blackbody-ir-calibrator.pdf>. [cit. 2024-05-19].

- [25] Fluke. *Fluke Ti55FT*. Online. Instrumart. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/products/28997/fluke-ti50ft-ti55ft-thermal-imagers>. [cit. 2024-04-02].
- [26] Raytek. *Miniature Infrared Sensor*. Online. Raytek. Dostupné z: https://www.instrumart.com/assets/raytek-mi_manual.pdf. [cit. 2024-04-03].
- [27] Raytek. *MX6 Manual*. Online. Raytek. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/assets/MX6Manual.pdf>. [cit. 2024-04-03].
- [28] CZECHPROJECT SPOL. S R.O. *CNC lineární pohon s krokovým motorem T8x8 - 100 mm*. Online. Dratek.cz. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/74095-cnc-linearni-pohon-100-mm-s-krokovym-motorem.html>. [cit. 2024-04-12].
- [29] Optris. *PI 05M*. Online. Optris. Dostupné z: <https://www.optris.com/en/product/infrared-cameras/pi-series/pi-05m/>. [cit. 2024-04-12].
- [30] Fluke. *Endurance Datasheet*. Online. Fluke. Dostupné z: <https://www.raytek-direct.ca/pdfs/cache/www.raytek-direct.ca/e1rl-f2-l-0-0/datasheet/e1rl-f2-l-0-0-datasheet.pdf>. [cit. 2024-05-12].
- [31] Optris. *CSvision R1M Datasheet*. Online. Optris. Dostupné z: <https://www.optris.com/en/download/csvision-r1m-datasheet/?wpdmdl=160969&refresh=6640b19640d6e1715515798>. [cit. 2024-05-12].
- [32] DIAS. *PYROSPOT DS 40N und DG 40N Pyrometr for industrial application Datasheet*. Online. DIAS. Dostupné z: https://pyrometr.cz/wp-content/uploads/2016/09/pyrospot_ds40_dg40_eng.pdf. [cit. 2024-05-12].
- [33] DIAS. *PYROSPOT DG 56N/DG 56NV Pyrometr for industrial application Datasheet*. Online. DIAS. Dostupné z: https://pyrometr.cz/wp-content/uploads/2016/09/pyrospot_dg56n_dg56nv_eng-1.pdf. [cit. 2024-05-12].
- [34] IFM. *Infrared temperature sensor TW2002*. Online. Dostupné z: <https://www.ifm.com/de/en/product/TW2002>. [cit. 2024-05-12].
- [35] IFM. *Infrared temperature sensor TW2001*. Online. Dostupné z: <https://www.ifm.com/us/en/product/TW2001>. [cit. 2024-05-12].
- [36] Omega. "Miniature Fixed Infrared Temperature Sensor with Optional Touch Screen Display." ("Miniature Fixed Infrared Temperature Sensor with Optional Touch Screen ...") Online. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/noncontact-temperature-measurement/fixed-infrared-temperature-sensors/p/OS-MINI-Series>. [cit. 2024-05-13].
- [37] Omega. *Miniature Fixed Infrared Temperature Sensor with Optional Touch Screen Display*. Online. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/noncontact-temperature-measurement/fixed-infrared-temperature-sensors/p/OS-MINI-Series>. [cit. 2024-05-13].
- [38] Omega. *Miniature Fixed Infrared Temperature Sensor Datasheet*. Online. Dostupné z: https://assets.omega.com/spec/OS-MINI_Spec.pdf. [cit. 2024-05-13].

- [39] Omega. *Adjustable Output IR Sensor High Temperatures and Display*. Online. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/noncontact-temperature-measurement/fixed-infrared-temperature-sensors/p/OSAO-Series>. [cit. 2024-05-13].
- [40] Advanced Energy. *Impac IGAR 6 Series Pyrometers*. Online. Dostupné z: <https://www.advancedenergy.com/en-us/products/sense-and-measurement/thermal-sensing/pyrometers-for-metallic,-ceramic-and-graphite-surfaces/impac-igar-6-series/>. [cit. 2024-05-13].
- [41] Advanced Energy. *Pyrometer Overview*. Online. Dostupné z: <https://www.advancedenergy.com/getmedia/337cf3b5-5065-44c8-8712-094a377863c9/ENG-Pyrometer-Overview-261-022823.pdf>. [cit. 2024-05-13].
- [42] Sensor Therm. *Sensor Datasheet Metis M309/316/318/323*. Online. Dostupné z: https://www.sensortherm.de/userfiles/file/datenblaetter/en/Sensortherm-Datasheet_Metis_M309_M316_M318_M323.pdf. [cit. 2024-05-13].
- [43] Proxitron. *Pyrometers OKS T GA S Datasheet*. Online. Dostupné z: https://proxitron.com/downloads/user_upload/p85e_pyrometers_OKS_T_GA_S_E.pdf. [cit. 2024-05-14].
- [44] Proxitron. *Industrial Pyrometer OKS T GA S*. Online. Proxitron GmbH. Dostupné z: <https://proxitron.com/pyrometers/industrial-pyrometer-oks-t-ga-s/>. [cit. 2024-05-14].
- [45] Keller. *Pyrometer CellaTemp PX 20*. Online. Dostupné z: https://www.keller.de/en/pyrometer-cellatemp-px-20.en/?page=1&limit=12&show=&typ=647&linsendurchmesser=18&messabstand=400&raster_width=400&raster_width_steps=16&raster_width_format=mm&raster_height=100&raster_height_steps=5&recalc=true&fokusdurchmesser=2.2857142857143. [cit. 2024-05-14].
- [46] Land-Ametek. *Ametek-Land Spot plus family catalogue*. Online. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixedsptnoncontactthermometers/spot-plus/ametek_land_spot_plus_family_catalogue_rev9_en.pdf?la=en&revision=d61b1c50-313c-49aa-a55e-7dab4cfdae4d. [cit. 2024-05-12].
- [47] Land-Ametek. *Ametek-Land Spot mounting accessories catalogue*. Online. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixedsptnoncontactthermometers/spot/ametek_land_spot_mountings_accessories_brochure_rev_7_en_v2.pdf?la=en&revision=e30deb73-c8a3-477d-93c7-cf866a74d514. [cit. 2024-05-12].
- [48] Fluke. *MP Linescanner Series Datasheet*. Online. Dostupné z: https://colterlec.com.au/wp-content/uploads/2023/02/MP-Linescanner_Datasheet_Colterlec.pdf. [cit. 2024-05-12].

- [49] DIAS. *Pyroline HS 512N/2000 Hz Datasheet*. Online. Dostupné z: https://www.dias-infrared.de/pdf/pyroline512n_2000Hz_eng_mail.pdf. [cit. 2024-05-12].
- [50] Land-Ametek. *Ametek-Land LSP-HD linescanner brochure*. Online. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixdthermalimagerslinescanners/lsphd/ametek_land_lsp-hd_linescanners_brochure_rev_5_en.pdf?la=en&revision=b77fe8a4-4258-4a12-9cd7-97a6db0e619b. [cit. 2024-05-12].
- [51] Land-Ametek. *Ametek-Land LSP-HD mounting accessories catalogue*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixdthermalimagerslinescanners/lsphd/ametek_land_lsp-hd_mountings_and_accessories_guide_rev_3_en.pdf?la=en&revision=c92158e3-3489-4479-9d28-7fc91c78553b. [cit. 2024-05-12].
- [52] Land-Ametek. *SPOT Actuator*. Online. Dostupné z: <https://www.ametek-land.com/products/non-contact-infrared-thermometers-pyrometers/spot-actuator>. [cit. 2024-05-14].
- [53] Land-Ametek. *SPOT Actuator brochure*. Online. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixdspotnoncontactthermometers/spotactuator/ametek_land_spot_actuator_brochure_rev35_en.pdf?la=en&revision=03bf5574-a9d2-47f3-9817-d5702a63e38d. [cit. 2024-05-14].
- [54] DIAS. *PYROVIEW 768N Datasheet*. Online. Dostupné z: https://www.dias-infrared.de/pdf/pyroview768n_eng_mail.pdf. [cit. 2024-05-12].
- [55] Optris. *PI 05M Datasheet*. Online. Dostupné z: <https://www.optris.com/en/download/pi-05m-datasheet/?wpdmdl=160698&refresh=6640b4b31a5bb1715516595>. [cit. 2024-05-12].
- [56] WORKSWELL. *Workswell WIC Industrial IP67 Thermal Camera Sensor*. Online. Dostupné z: <https://my.workswell.eu/download/file/103/en>. [cit. 2024-05-12].
- [57] FLIR. *Technical Data FLIR A615 25°*. Online. Dostupné z: https://www.w-technika.cz/out/media/datovy-list-A65_1.pdf. [cit. 2024-05-12].
- [58] Land-Ametek. *NIR-BORESCOPE-640 Thermal Imaging Solutions*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixdthermalimagerslinescanners/nirb640/ametek_land_nir_b_640_brochure_rev_4_en.pdf?la=en&revision=94c47ce6-75d1-49b3-a994-ec88ac4f1337. [cit. 2024-05-13].
- [59] Land-Ametek. *NIR-BORESCOPE-656 & NIR-BORESCOPE-2K Thermal Imaging Solutions*. Online. Dostupné z: https://www.ametek-land.com/-/media/ameteklandinstruments/documentation/products/fixdthermalimagerslinescanners/nirb656/ametek_land_nir_b_656_brochure_rev_4_en.pdf?la=en&revision=94c47ce6-75d1-49b3-a994-ec88ac4f1337. [cit. 2024-05-13].

- [canners/nirb2k/ametech_land_nir-b_656_2k_brochure_rev_11_en.pdf?la=en&revision=02694ea7-d12f-4494-8975-137973b9e6c2](#). [cit. 2024-05-13].
- [60] DIAS. *PYROINC High-resolution NIR furnance cameras for temperature measurment from 600 °C to 1800 °C*. Online. Dostupné z: https://www.dias-infrared.de/pdf/dias_infrared_pyroinc-n_endoscope_infrared_camera_eng_mail.pdf. [cit. 2024-05-13].
- [61] DIAS. *PYROINC – Temperature monitoring in combustion chambers with infrared cameras*. Online. Infrared camera for combustion chambers. Dostupné z: <https://dias-infrared.com/products/infrared-system-solutions/pyroinc-temperature-monitoring-in-combustion-chambers>. [cit. 2024-05-14].
- [62] Optris. *Infrared cameras brochure*. Online. Dostupné z: <https://www.optris.com/en/download/infrared-cameras-overview/?wpdmdl=160684&refresh=664978e40ef691716091108>. [cit. 2024-05-19].
- [63] Optris. *Optris Calculator App*. Online. Dostupné z: <https://www.optris.com/en/optris-calculator/>. [cit. 2024-05-19].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FOV	Field of View (Zorné pole)
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
CNC	Computer Numerical Control

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
ε	emisivita	(-)
λ	vlnová délka	(m)
E	energie záření	(W/m ²)
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	(W/m ² K ⁴)
T	teplota	(°C)
b	Wienova konstanta	(μ m)
h	Planckova konstanta	(-)
v	rychlost	(m/s)
d	průměr kruhové plochy	(m)
D	vzdálenost	(m)
F	optické rozlišení	(-)
$S(T)$	radiometrický signál	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - PRŮZKUM TRHU	73
PŘÍLOHA B - DATA MĚŘENÍ TEPLoty	85
PŘÍLOHA C - SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	95

Příloha A - Průzkum trhu

A.1 Pyrometry

Název firmy	Fluke – Raytek [30]	Fluke – Raytek [30]	Fluke – Raytek [30]
Název snímače	E1RL-F2-L-0-0 Endurance	E1ML-F0-L-0-0 Endurance	E3MH-F2-V-0-0 Endurance
Optické rozlišení	300:1	300:1	300:1
Teplotní rozsah	550–1800 °C	400-1740 °C	150-1800 °C
Přesnost	± (2 °C + 0.5 % z naměřené hodnoty)	Nad 450 °C je přesnost: ± (0.3 % z naměřené hodnoty + 1 °C)	Nad 100 °C je přesnost: ± (0.3 % z naměřené hodnoty + 1 °C)
Výstup/ Komunikace	Ethernet, Profinet, 0/4-20 mA smyčka, 16-bit rozhraní, RS485.	Ethernet, Profinet, 0/4-20 mA smyčka, 16-bit rozhraní, RS485.	Ethernet, Profinet, 0/4-20 mA smyčka, 16-bit rozhraní, RS485.
Výdrž v prostředí	-20 až 85 °C bez chlazení, 0 až 120 °C chlazení vzduchem 0 až 175 °C chlazení vodou 0 až 315 °C s ochranným obalem	0 až 65 °C bez chlazení, 0 až 120 °C chlazení vzduchem 0 až 175 °C chlazení vodou 0 až 315 °C s ochranným obalem	0 až 65 °C bez chlazení, 0 až 120 °C chlazení vzduchem 0 až 175 °C chlazení vodou 0 až 315 °C s ochranným obalem
Spektrální odezva	1.0 μm	1.0 μm	2.4 μm
Napájení	20–48 V DC (500 mA) Možnost napájení přes Ethernet (PoE)	20–48 V DC (500 mA) Možnost napájení přes Ethernet (PoE)	20–48 V DC (500 mA) Možnost napájení přes Ethernet (PoE)

Název firmy	DIAS [33]	DIAS [32]	Optris [31]
Název snímače	Pyrospot DG 56NV	Pyrospot DS 40 N	CSvision R1MH
Optické rozlišení	200:1	Až 100:1	150:1
Teplotní rozsah	250–2500 °C	800–2500 °C	550–3000 °C
Přesnost	± 0,5 % z naměřené hodnoty + 1 °C	± 0,5 % z naměřené hodnoty + 1 °C	0,5 % z naměřené hodnoty + 2 °C
Výstup/ Komunikace	4-20 mA smyčka RS 485	4-20 mA smyčka	4-20 mA smyčka RS 485
Výdrž v prostředí	0 až 70 °C Možnost dokoupení chlazení.	0 až 70 °C Možnost dokoupení chlazení.	0 až 65 °C
Spektrální rozsah	1.5-1.8 μm	0.8-1.1 μm	0,8 – 1.1 μm
Napájení	24 V DC	24 V DC, 0.6 A	8–30 V DC nebo USB

Název firmy	Ametek [46], [47]	IFM [35]	IFM [34]
Název snímače	SPOT+ M100	IR Sensor TW2001 TW-150KLB30-KFDKG/US	IR Sensor TW2002 TW-150KLB30-KFDKG/US
Optické rozlišení	200:1	Až 125:1 Blízké zaměření	Až 166:1
Teplotní rozsah	500-1800 °C / 500-2500 °C	250-1600 °C	500-2500 °C
Přesnost	± 0,25 % z naměřené hodnoty nebo 2 °C	± 0,5 % z naměřené hodnoty	± 0,3 % z naměřené hodnoty
Výstup/ Komunikace	2x 4-20 mA Ethernet	4-20 mA smyčka I/O linka (Ethernet)	4-20 mA smyčka I/O linka (Ethernet)
Výdrž v prostředí	5-60 °C S vodním chlazením do 200 °C	0 až 65 °C Možnost dokoupení chlazení.	0 až 65 °C Možnost dokoupení chlazení.
Spektrální rozsah	1,0 μm nebo 1.2 μm	1.0–1.7 μm	0.78-1.06 μm
Napájení	PoE (Power over Ethernet) Nebo 19–30 V DC	Operační napájení 18-32 V DC	Operační napájení 18-32 V DC

Název firmy	Omega [37], [38]	Omega[36], [38]	Ametek [46], [47]
Název snímače	OS-MINI22-SN751-MA-HT	OS-MINI22-SN801-D-MA-HT	SPOT+ R100
Optické rozlišení	75:1	Až 20:1 Blízké zaměření	200:1
Teplotní rozsah	450 °C–2000 °C	450 °C–2000 °C	550-1800 °C / 700-3500 °C
Přesnost	± 1 % z naměřené hodnoty nebo 2 °C	± 1 % z naměřené hodnoty nebo 2 °C	± 0,5 % z naměřené hodnoty nebo 5 °C
Výstup/ Komunikace	4-20 mA	4-20 mA	2x 4-20 mA Ethernet
Výdrž v prostředí	0-70 °C Nenalezena možnost chlazení	0-70 °C Nenalezena možnost chlazení	5-60 °C S vodním chlazením do 200 °C
Spektrální rozsah	Spektrální odezva: 2,0 μm 2.6 μm	Spektrální odezva: 2,0 μm 2.6 μm	1,0 μm nebo 1.2 μm
Napájení	24 V DC	24 V DC	PoE (Power over Ethernet) Nebo 19–30 V DC

Název firmy	Advanced Energy [40], [41]	Advanced Energy [40], [41]	Omega [39]
Název snímače	Series 6 ISR 6 – Ti Advanced	Series 6 IGA 6 Advanced	OS-AO250-801-600
Optické rozlišení	Až 190:1 Blízké zaměření	Až 350:1 Blízké zaměření	80:1
Teplotní rozsah	700 °C-1800 °C	250 °C-1800 °C 250 °C-2500 °C	350 °C–1800 °C
Přesnost	Do 1500 °C ± 0,3 % z naměřené hodnoty + 2 °C. Nad 1500 °C ± 0,6 %	Do 1500 °C ± 0,3 % z naměřené hodnoty + 2 °C. Nad 1500 °C ± 0,6 %	± 0,3 % z naměřené hodnoty + 1 °C
Výstup/ Komunikace	0/4 mA-20 mA RS 232/RS 485, Video signál	0/4 mA-20 mA RS 232/RS 485	0/4 mA-20 mA, RS 232/RS 485, USB
Výdrž v prostředí	0-65 °C Možnost dokoupit chladicí obal.	0-65 °C Možnost dokoupit chladicí obal.	0-70 °C Nenalezena možnost chlazení
Spektrální rozsah	Poměrový 2 pásma 0.9 μm – 1,05 μm	1,45 μm – 1,8 μm	Spektrální odezva 1,6 μm
Napájení	24 V DC	24 V DC	24 V DC

Název firmy	Proxitron [43], [44]	Sensor Therm [42]	Sensor Therm [42]
Název snímače	OKS 4 T GA S25.14 S9	METIS M316	METIS M309
Optické rozlišení	Až 200:1 Blízké zaměření	100:1	100:1
Teplotní rozsah	-40 °C-2500 °C	400 °C-2500 °C	750 °C-2500 °C
Přesnost	± 0,5 % z naměřené hodnoty	± 0,25 % z naměřené hodnoty + 1 °C	± 0,25 % z naměřené hodnoty + 1 °C
Výstup/ Komunikace	4 mA-20 mA, USB	0/4 mA-20 mA RS 232/RS 485	0/4 mA-20 mA RS 232/RS 485
Výdrž v prostředí	0-70 °C S chladičím obalem do 200 °C	0-80 °C Možnost dokoupit chladič obal.	0-80 °C Možnost dokoupit chladič obal.
Spektrální rozsah	0,8 μm – 1,1 μm	1,45 μm – 1,8 μm	0,7 μm – 1,1 μm
Napájení	24 V DC	24 V DC	24 V DC

Název firmy	Keller [45]	Proxitron [43], [44]
Název snímače	Cella Temp PX 20	OKS 4 T GA S18.14 S9
Optické rozlišení	275:1	Až 200:1 Blízké zaměření
Teplotní rozsah	210 °C-2000 °C	350 °C-1800 °C
Přesnost	± 0,3 % z naměřené hodnoty	± 0,5 % z naměřené hodnoty
Výstup/ Komunikace	4 mA-20 mA	4 mA-20 mA, USB
Výdrž v prostředí	0-65 °C Možnost dokoupit chladič obal.	0-70 °C S chladičím obalem do 200 °C
Spektrální rozsah	1,1 μm – 1,7 μm	1,5 μm – 1,8 μm
Napájení	24 V DC	24 V DC

A.2 Linescannery

Název firmy	Fluke-Raytek [48]	DIAS [49]	Fluke-Raytek [48]
Název snímače	MP150IMH	Pyroline HS 512 N/2000 Hz	MP300IMH
Max. frekvence snímání [Hz]	150	2000	300
Teplotní rozsah	700-1800 °C	650–1500 °C nebo 1400–3000 °C	700 °C–1800 °C
Přesnost	± 0,5 % Tmeas Nebo 3 °C Podle toho, která hodnota nepřesnosti je větší	650 až 1500 °C Chyba menší než 1 °C pro rozsah 1400 až 3000 °C chyba přibližně 2 °C	± 0,5 % Tmeas Nebo 3 °C Podle toho, která hodnota nepřesnosti je větší
Výstup/Komunikace	4-20 mA proudová smyčka nebo RS485 full duplex	Fast Ethernet (real-time, 2000 Hz)	4-20 mA proudová smyčka nebo RS485 full duplex
Výdrž v prostředí	0-50 °C bez vodního chlazení, s chlazením až do 180 °C	-10–50 °C bez vodního chlazení -25–150 °C s chlazením	0-50 °C bez vodního chlazení, s chlazením až do 180 °C
Spektrální odezva	1 μm	Spektrální rozsah 0.8–1.1 μm	1 μm
Napájení	24 V DC ± 25 %, 1 A	12V – 36 V DC	24 V DC ± 25 %, 1 A

Název firmy	Ametek [50], [51]
Název snímače	LSP HD 12
Max. frekvence snímání [Hz]	150
Teplotní rozsah	800-1700 °C
Přesnost	± 0,5 °C
Výstup/Komunikace	Industrial Ethernet
Výdrž v prostředí	0-60 °C bez vodního chlazení, s chlazením až do 150 °C
Spektrální odezva	1 μm
Napájení	PoE (Power over Ethernet)

A.3 Termokamery

Název firmy	OPTRIS [55]	DIAS [54]
Název snímače	PI 05M	Pyroview 768 N protection
Snímkovací frekvence [Hz]	32	50, 25, 12,5
Teplotní rozsah	900 až 2450 °C	600 až 1500 °C nebo 1400 až 3000 °C
Přesnost	Do 2000 °C +/- 1 % z měřené hodnoty.	+/- 1 % z měřené hodnoty
Výstup	Gigabit-Ethernet, USB S PIF i digitální a analogový výstupy	Gigabit-Ethernet
Výdrž v prostředí	5 až 50 °C, možnost dokoupit chlazení	-10 až 50 °C bez chlazení, s chlazením -25 až 150 °C
Spektrální rozsah	500 nm – 540 nm	0,8 μm-1,1 μm
Rozlišení	764 x 480 pixel (CMOS) FOV = 27 ° x 17 °	768x576 pixel (CMOS) FOV=39° x 30°/ 58° x 45°/ 22°x16°/ 74° x 59°

Název firmy	Land-Ametek [58]	FLIR [57]	Workswell [56]
Název snímače	NIR-Borescope-640	A615	WIC IP 67 Thermal camera
Snímkovací frekvence [Hz]	7,5	50	60
Teplotní rozsah	600 °C-2000 °C	- 40 °C-2000 °C	- 40 °C-1500 °C
Přesnost	+/-1 % z naměřené hodnoty	+/- 2 % z naměřené hodnoty nebo +/- 2 °C	+/- 2 % z naměřené hodnoty nebo +/- 2 °C
Výstup	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Výdrž v prostředí	V datasheetu není uvedena. Jedná se o termokameru speciálně pro hutě.	-15 °C-50 °C K termokamery dle zdroje není dostupný ochranný obal	Standardně - 15 °C-50 °C S chlazením/zahříváním: - 50 °C až 200 °C
Spektrální rozsah	Spektrální odezva 1 μm	7,5 μm-13,5 μm	7,5 μm-13,5 μm
Rozlišení	640 x 480 pixel FOV: 90 ° x 67,5 ° nebo 44 ° x 33 °	640 x 480 pixel (Oxid Vanadičný) FOV: nastavitelné zaostření	640 x 512 pixel, FOV: nastavitelné zaostření

Název firmy	DIAS [60], [61]	Land-Ametek [59]
Název snímače	PYROINC 768 N	NIR-Borescope-2 K
Snímkovací frekvence [Hz]	50, 25, 12,5	15
Teplotní rozsah	800 °C–1800 °C	1000 °C-1800 °C
Přesnost	+/-2 % z naměřené hodnoty	+/-1 % z naměřené hodnoty
Výstup	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Výdrž v prostředí	Odolnost do teploty 1800 °C s výdrží minimálně 2 roky.	V datasheetu není uvedena. Jedná se o termokameru speciálně pro hutě.
Spektrální rozsah	0,8 μm – 1,1 μm	Spektrální odezva 1 μm
Rozlišení	768 x 576 pixel, 2 D-Si-CMOS 44 ° x 34 °, 74 ° x 59 °, 90 ° x 72 °; Nastavitelné zaostření	1968 x 1476 pixel FOV: 95 ° x 71 °

Příloha B - Data měření teploty

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
01.03.2024 12:57	změna koksu		
01.03.2024 13:40	1485	1488	-3
01.03.2024 15:48	změna zavážky		
01.03.2024 19:30	1488	1459	29
01.03.2024 19:30	Násobená vsázka		
01.03.2024 21:10	změna koksu		
02.03.2024 4:10	1499	1524	-25
02.03.2024 6:14	1507	1508	-1
02.03.2024 6:18	změna koksu		
02.03.2024 12:16	1517	1483	34
02.03.2024 14:12	změna zavážky		
03.03.2024 21:10	1465	1473	-8
03.03.2024 2:30	1471	1479	-8
03.03.2024 8:30	1472	1467	5
03.03.2024 10:50	změna koksu		
03.03.2024 14:25	1482	1492	-10
03.03.2024 19:20	1475	1470	5
04.03.2024 0:35	změna koksu		
04.03.2024 1:22	1475	1469	6
04.03.2024 8:50	1472	1461	11
04.03.2024 10:35	změna zavážky		
04.03.2024 15:58	1482	1479	3
04.03.2024 20:03	1486	1489	-3
05.03.2024 0:43	1493	1505	-12
05.03.2024 8:09	změna koksu		
05.03.2024 9:40	1488	1501	-13
05.03.2024 13:52	změna zavážky		
06.03.2024 21:00	1472	1475	-3
07.03.2024 2:48	1482	1474	8
07.03.2024 9:53	1476	1489	-13
07.03.2024 14:43	1437	1468	-31
07.03.2024 20:05	1468	1475	-7
08.03.2024 3:49	1463	1470	-7
08.03.2024 9:20	1465	1481	-16
08.03.2024 12:20	změna koksu		
08.03.2024 14:10	1455	1476	-21
08.03.2024 19:33	1463	1465	-2

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
09.03.2024 2:08	1467	1469	-2
09.03.2024 7:28	1482	1472	10
09.03.2024 14:30	1470	1458	12
09.03.2024 19:05	1451	1465	-14
10.03.2024 4:05	1471	1476	-5
10.03.2024 8:04	1470	1457	13
10.03.2024 8:05	změna koksu		
10.03.2024 10:44	změna koksu		
10.03.2024 13:23	1473	1469	4
10.03.2024 19:03	změna koksu		
10.03.2024 19:55	1476	1481	-5
10.03.2024 23:10	1469	1458	11
11.03.2024 2:05	1469	1472	-3
11.03.2024 2:15	změna koksu		
11.03.2024 4:08	1477	1489	-12
11.03.2024 8:03	1489	1486	3
11.03.2024 9:00	1482	1493	-11
11.03.2024 9:55	1491	1490	1
11.03.2024 10:50	1495	1490	5
11.03.2024 11:45	1508	1482	26
11.03.2024 12:10	změna koksu		
11.03.2024 13:11	1501	1502	-1
11.03.2024 14:20	1482	1491	-9
11.03.2024 15:35	1484	1482	2
11.03.2024 16:38	1488	1507	-19
11.03.2024 18:03	1512	1492	20
11.03.2024 19:00	1508	1505	3
11.03.2024 19:55	1480	1477	3
11.03.2024 21:00	1481	1475	6
11.03.2024 22:00	1484	1483	1
11.03.2024 23:03	1497	1501	-4
11.03.2024 23:59	1496	1501	-5
12.03.2024 1:05	1489	1500	-11
12.03.2024 1:54	1501	1506	-5
12.03.2024 3:00	1501	1498	3
12.03.2024 3:59	1489	1500	-11
12.03.2024 4:56	1480	1501	-21
12.03.2024 6:22	1492	1500	-8
12.03.2024 6:52	změna koksu		
12.03.2024 7:15	1478	1490	-12

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
12.03.2024 8:23	1510	1497	13
12.03.2024 9:21	1500	1502	-2
12.03.2024 9:27	změna koksu		
12.03.2024 10:27	1495	1486	9
12.03.2024 11:35	1494	1500	-6
12.03.2024 12:34	1494	1485	9
12.03.2024 12:37	změna koksu		
12.03.2024 14:18	1489	1482	7
12.03.2024 15:16	1501	1498	3
12.03.2024 16:19	1490	1480	10
12.03.2024 19:00	změna koksu		
12.03.2024 19:49	1460	1463	-3
13.03.2024 1:38	1480	1490	-10
13.03.2024 6:58	změna koksu		
13.03.2024 7:09	1476	1481	-5
13.03.2024 20:30	1472	1498	-26
14.03.2024 3:06	1482	1466	16
14.03.2024 8:20	1473	1478	-5
14.03.2024 15:17	1469	1475	-6
14.03.2024 20:38	1472	1492	-20
15.03.2024 2:52	1482	1487	-5
15.03.2024 9:55	1494	1432	62
15.03.2024 14:59	1475	1503	-28
15.03.2024 19:57	1469	1467	2
16.03.2024 6:50	1484	1494	-10
16.03.2024 13:33	1484	1461	23
16.03.2024 20:26	1481	1479	2
17.03.2024 4:39	změna zavažky		
17.03.2024 7:34	1484	1454	30
17.03.2024 13:18	1468	1456	12
17.03.2024 20:25	1484	1475	9
18.03.2024 3:00	1496	1507	-11
18.03.2024 7:10	1492	1485	7
18.03.2024 8:02	změna zavažky		
18.03.2024 13:47	1509	1496	13
18.03.2024 22:50	1471	1476	-5
19.03.2024 2:30	1469	1474	-5
19.03.2024 8:36	změna koksu		
19.03.2024 8:52	1501	1492	9
19.03.2024 14:45	1472	1492	-20

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
20.03.2024 19:30	1471	1463	8
20.03.2024 4:25	1491	1507	-16
20.03.2024 4:20	změna zavážky		
20.03.2024 10:21	1472	1489	-17
20.03.2024 13:00	změna koksu		
20.03.2024 15:18	1482	1483	-1
20.03.2024 15:30	změna zavážky		
20.03.2024 22:25	1478	1483	-5
21.03.2024 4:00	1462	1451	11
21.03.2024 9:38	1477	1485	-8
21.03.2024 22:47	1472	1495	-23
22.03.2024 3:00	1482	1493	-11
22.03.2024 9:17	1478	1481	-3
22.03.2024 21:45	1472	1492	-20
23.03.2024 3:12	1482	1476	6
23.03.2024 9:02	1471	1473	-2
23.03.2024 21:45	změna zavážky		
23.03.2024 22:08	1500	1504	-4
24.03.2024 3:02	1489	1483	6
24.03.2024 4:00	1500	1496	4
24.03.2024 8:20	1512	1509	3
24.03.2024 9:23	1478	1483	-5
24.03.2024 12:30	1492	1506	-14
24.03.2024 13:30	1490	1500	-10
24.03.2024 14:34	1483	1486	-3
24.03.2024 15:45	1492	1475	17
24.03.2024 17:42	1488	1492	-4
24.03.2024 18:58	1497	1510	-13
24.03.2024 19:58	1500	1503	-3
24.03.2024 20:53	1491	1495	-4
24.03.2024 21:52	1489	1494	-5
25.03.2024 0:13	1490	1501	-11
25.03.2024 0:17	změna zavážky		
25.03.2024 1:12	1496	1512	-16
25.03.2024 2:14	1491	1507	-16
25.03.2024 3:15	1482	1482	0
25.03.2024 4:20	1486	1491	-5
25.03.2024 6:07	1497	1509	-12
25.03.2024 6:41	změna zavážky + koksu		
25.03.2024 7:21	1486	1505	-19

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
25.03.2024 8:36	změna zavážky		
25.03.2024 8:50	1509	1505	4
25.03.2024 9:50	1514	1511	3
25.03.2024 11:20	1496	1497	-1
25.03.2024 12:32	1510	1504	6
25.03.2024 13:36	1499	1497	2
25.03.2024 14:31	1501	1490	11
25.03.2024 15:32	1495	1485	10
25.03.2024 16:25	1490	1490	0
25.03.2024 19:45	změna koksu		
25.03.2024 20:25	1485	1497	-12
26.03.2024 1:51	1476	1486	-10
26.03.2024 6:50	1486	1489	-3
26.03.2024 13:01	1479	1481	-2
26.03.2024 13:57	změna zavážky		
27.03.2024 21:25	1480	1438	42
28.03.2024 2:13	1479	1488	-9
28.03.2024 8:08	změna koksu		
28.03.2024 8:55	1472	1467	5
28.03.2024 15:00	1482	1477	5
28.03.2024 19:36	1455	1445	10
28.03.2024 23:49	změna koksu		
29.03.2024 1:30	1464	1470	-6
29.03.2024 9:19	změna koksu		
29.03.2024 9:48	1465	1467	-2
29.03.2024 15:00	1463	1461	2
29.03.2024 21:00	1472	1488	-16
30.03.2024 3:00	1482	1469	13
30.03.2024 8:36	1475	1477	-2
30.03.2024 10:49	změna koksu		
30.03.2024 21:00	1475	1453	22
31.03.2024 1:00	1482	1477	5
31.03.2024 11:05	1460	1465	-5
31.03.2024 14:30	1487	1499	-12
31.03.2024 16:20	změna zavážky		
31.03.2024 20:04	1479	1481	-2
01.04.2024 7:20	1442	1473	-31
01.04.2024 15:00	1443	1440	3
01.04.2024 16:15	změna koksu		
01.04.2024 18:44	změna koksu		

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
01.04.2024 21:32	1459	1455	4
01.04.2024 22:45	změna koksu		
02.04.2024 1:09	1478	1480	-2
02.04.2024 7:27	1467	1477	-10
02.04.2024 13:30	1487	1463	24
02.04.2024 19:15	1475	1483	-8
02.04.2024 21:10	změna koksu		
03.04.2024 2:30	1480	1477	3
03.04.2024 4:35	změna zavažky		
03.04.2024 7:07	změna koksu		
03.04.2024 8:54	1488	1473	15
03.04.2024 9:38	změna zavažky		
03.04.2024 10:23	změna zavažky		
03.04.2024 13:08	1488	1429	59
03.04.2024 16:21	změna koksu		
03.04.2024 20:40	1487	1473	14
04.04.2024 2:30	1473	1470	3
04.04.2024 9:27	1472	1487	-15
04.04.2024 13:13	změna zavažky		
04.04.2024 13:36	změna zavažky		
04.04.2024 15:00	1482	1488	-6
04.04.2024 19:16	1503	1487	16
04.04.2024 22:44	změna zavažky		
04.04.2024 23:44	změna zavažky		
05.04.2024 1:47	1500	1473	27
05.04.2024 2:01	změna zavažky		
05.04.2024 2:43	změna zavažky		
05.04.2024 8:15	1472	1483	-11
05.04.2024 15:25	1480	1483	-3
05.04.2024 15:48	změna koksu		
05.04.2024 20:06	1480	1460	20
06.04.2024 1:57	1498	1474	24
06.04.2024 9:28	1484	1482	2
06.04.2024 13:22	změna koksu		
06.04.2024 15:32	změna koksu		
06.04.2024 21:00	1472	1488	-16
07.04.2024 2:50	1482	1473	9
07.04.2024 10:24	1479	1482	-3
07.04.2024 20:10	1475	1482	-7
08.04.2024 2:20	1474	1480	-6

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
08.04.2024 11:15	změna koksu		
08.04.2024 14:00	změna koksu		
08.04.2024 16:00	1473	1467	6
08.04.2024 19:25	1468	1445	23
09.04.2024 7:40	1473	1467	6
09.04.2024 9:00	změna koksu		
09.04.2024 15:00	1473	1467	6
09.04.2024 21:23	1469	1470	-1
10.04.2024 7:38	1464	1457	7
10.04.2024 14:14	1477	1486	-9
10.04.2024 17:00	změna koksu		
10.04.2024 20:30	1472	1468	4
11.04.2024 3:00	1474	1464	10
11.04.2024 7:21	1479	1473	6
11.04.2024 14:22	1453	1459	-6
11.04.2024 20:50	1465	1456	9
12.04.2024 3:00	1472	1463	9
12.04.2024 9:15	1472	1480	-8
12.04.2024 15:00	1482	1492	-10
12.04.2024 19:32	1476	1469	7
13.04.2024 1:20	1479	1474	5
13.04.2024 1:37	změna koksu		
13.04.2024 2:12	změna zavažky		
13.04.2024 3:06	změna zavažky		
13.04.2024 9:01	1482	1454	28
13.04.2024 15:03	1499	1496	3
13.04.2024 20:10	1470	1454	16
14.04.2024 1:34	1482	1491	-9
14.04.2024 8:17	1473	1476	-3
14.04.2024 21:15	1472	1457	15
15.04.2024 3:30	1485	1495	-10
15.04.2024 7:06	1483	1482	1
15.04.2024 14:03	změna zavažky		
16.04.2024 18:12	Najetí pece		
16.04.2024 22:45	změna zavažky		
17.04.2024 2:50	1460	1467	-7
17.04.2024 5:40	změna koksu		
17.04.2024 7:35	změna koksu		
17.04.2024 9:40	změna zavažky		
17.04.2024 10:15	změna zavažky		

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
17.04.2024 11:00	1478	1467	11
17.04.2024 11:00	1484	1491	-7
17.04.2024 12:50	změna koksu		
17.04.2024 19:30	změna koksu		
17.04.2024 22:45	1463	1472	-9
17.04.2024 22:45	změna koksu		
18.04.2024 3:00	1469	1471	-2
18.04.2024 7:09	1479	1489	-10
18.04.2024 10:00	změna koksu		
18.04.2024 19:10	1483	1489	-6
18.04.2024 21:30	změna koksu		
19.04.2024 3:40	1472	1478	-6
19.04.2024 5:53	změna koksu		
19.04.2024 7:16	1482	1477	5
19.04.2024 13:08	1488	1492	-4
19.04.2024 13:11	změna koksu		
20.04.2024 20:15	1463	1443	20
20.04.2024 3:50	1474	1502	-28
20.04.2024 4:30	změna zavázky		
20.04.2024 7:40	1442	1452	-10
20.04.2024 13:30	1471	1449	22
20.04.2024 19:49	1470	1468	2
21.04.2024 0:59	1466	1468	-2
21.04.2024 8:00	1462	1475	-13
21.04.2024 13:45	1476	1470	6
21.04.2024 19:04	1468	1469	-1
22.04.2024 0:57	1460	1450	10
22.04.2024 10:00	1469	1475	-6
22.04.2024 16:00	1483	1491	-8
22.04.2024 21:00	1472	1489	-17
23.04.2024 3:00	1488	1485	3
23.04.2024 10:10	1444	1428	16
23.04.2024 16:11	změna koksu		
23.04.2024 22:32	1472	1469	3
24.04.2024 3:00	1476	1480	-4
24.04.2024 8:38	1477	1485	-8
24.04.2024 14:35	1486	1496	-10
25.04.2024 0:06	1479	1477	2
25.04.2024 7:20	1486	1496	-10
25.04.2024 15:00	1485	1489	-4

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
25.04.2024 20:25	1479	1477	2
26.04.2024 0:55	změna zavážky + koksu		
26.04.2024 10:16	1468	1471	-3
26.04.2024 13:27	1513	1516	-3
26.04.2024 14:30	1499	1513	-14
26.04.2024 15:30	1475	1486	-11
26.04.2024 16:25	1488	1504	-16
26.04.2024 19:35	1493	1494	-1
26.04.2024 20:30	1496	1495	1
26.04.2024 21:45	1485	1472	13
26.04.2024 22:40	1499	1496	3
27.04.2024 1:15	1505	1506	-1
27.04.2024 2:30	1509	1512	-3
27.04.2024 3:40	1514	1509	5
27.04.2024 4:45	1501	1513	-12
27.04.2024 5:43	1486	1496	-10
27.04.2024 6:53	1485	1500	-15
27.04.2024 6:55	změna koksu		
27.04.2024 7:54	1511	1476	35
27.04.2024 8:51	1511	1498	13
27.04.2024 9:52	1513	1497	16
27.04.2024 10:50	1519	1510	9
27.04.2024 11:45	1525	1527	-2
27.04.2024 12:40	1502	1516	-14
27.04.2024 14:05	1523	1518	5
27.04.2024 14:56	změna koksu		
27.04.2024 15:00	1532	1533	-1
27.04.2024 16:03	1486	1505	-19
27.04.2024 18:10	1509	1511	-2
27.04.2024 19:00	1519	1529	-10
27.04.2024 21:00	1490	1488	2
27.04.2024 22:45	1499	1480	19
27.04.2024 22:35	změna zavážky		
28.04.2024 3:20	1475	1477	-2
28.04.2024 9:57	1472	1460	12
28.04.2024 15:44	1482	1470	12
28.04.2024 20:04	1497	1493	4
29.04.2024 2:17	1498	1487	11
29.04.2024 8:55	1472	1483	-11
29.04.2024 15:02	1482	1485	-3

Datum	Kontaktní měření [°C]	Pyrometr [°C]	Rozdíl teplot [°C]
29.04.2024 19:32	1486	1490	-4
30.04.2024 0:58	1498	1496	2
30.04.2024 4:24	změna zavažky		
30.04.2024 7:40	změna zavažky + koksu		
30.04.2024 8:45	1487	1489	-2
30.04.2024 20:10	1472	1493	-21
30.04.2024 22:26	změna zavažky		
01.05.2024 3:42	1482	1472	10
01.05.2024 12:22	1479	1483	-4
01.05.2024 20:37	změna zavažky		
01.05.2024 21:28	změna zavažky		
01.05.2024 21:50	změna zavažky		

Příloha C - Seznam elektronických příloh

- Bakalářská_práce_xmlejn05_230135.pdf
- 3D_model_pracoviště.zip