

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření výšky hladiny v lahvích pomocí
termokamery**

Ondřej Velínský

2020

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

.....

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Velínský** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **473548**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření výšky hladiny v lahvích pomocí termokamery

Název bakalářské práce anglicky:

Measurement of Height Level in Bottles Using Infrared Camera

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte problematiku termografie a fyzikální základy bezdotykového měření teploty. Seznamte se s technickou normou ČSN 18434-1 a s metodami stanovení emisivity a odražené zdánlivé teploty a s problematikou útlumu IČ záření při průchodu různými materiály a s metodou pro stanovení tohoto útlumu. Zvolte si alespoň jeden typ láhve s dvěma různými tekutinami (a např. o různých teplotách) a pokuste se metodami počítačového vidění stanovit rozdíly v naplnění lahví při použití IČT kamery tepelným detektorem. Diskutujte využitelnost v praxi a to i při použití IČT kamery s chlazeným detektorem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lysenko, V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot, 2.díl edice Senzory neelektrických veličin, BEN - Technická literatura, 2005
- [2] Helebrant, F., Moni, V., Hudeczek, M., Urban, P.: Technická diagnostika a spolehlivost - V. Termografie, VŠB TU Ostrava 2008
- [3] Langenkamp, M.: Lock-in Thermography: Basics and Use for Eval. Electronic Devices and Materials, Springer, 2010
- [4] Minkina, W., Dudzik, S.: Infrared Thermography: Errors and Uncertainties, Wiley, 2009
- [5] Vollmer, M., Möllmann, K. P.: Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley, 2010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc., U12110.3

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Cílem této bakalářské práce je návrh a ověření vhodné metody pro určování výšky hladiny uvnitř lahve pomocí termokamery s tepelným senzorem. Tato metoda by mohla být využita pro přesné měření hladiny v různých typech lahví a obalů na stáčecích linkách v potravinářském a zpracovatelském průmyslu. Na úvod je shrnuta fyzikální teorie nezbytná pro porozumění termografii a ve stručnosti jsou popsány základy termografického měření. Náplní praktické části práce je vyzkoušení různých přístupů k danému problému a tvorba programu, který bude automaticky detekovat hladinu na záznamu z termokamery. Vytvořený program je potom otestován na vybraných lahvích. V závěru jsou popsána možná vylepšení a úpravy pro využití systému v praxi.

Abstract

The goal of this thesis is to design and validate a new method for fill level inspection using infrared camera with thermal detector. This method could be used for precise fill level measurement in various containers on filling plants in food and chemical industry. The introduction summarizes physical principles of thermography and briefly describes basics of thermographic measurement. In the practical section, different approaches to the problem are tested and a program is created that will automatically detect fill level on live thermal camera stream. This program is then tested with selected containers. Finally, possible improvements and modifications for practical use of such system are discussed.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
1 Úvod	6
2 Teoretická část	6
2.1 Fyzikální podstata termografie	6
2.2 Černé těleso	6
2.3 Infračervené záření	6
2.4 Emisivita, transmitance, odrazivost	8
2.5 Rovnice termografie	10
2.6 Stanovení parametrů měření	11
2.6.1 Odražená zdánlivá teplota	11
2.6.2 Emisivita	11
2.7 Prostupnost materiály	11
2.8 Spektroskopie	12
2.9 Princip fungování termokamery	12
2.9.1 Kvantové senzory	13
2.9.2 Tepelné senzory	13
2.10 Zobrazení dat	13
3 Navrhované principy měření	14
3.1 Rozdílná teplota kapaliny	14
3.2 Kapalina o teplotě okolí	15
3.2.1 Aktivní termografie	15
3.3 Vybrané lahve pro testování	16
4 Program	17
4.1 Předpoklady a cíl	17
4.2 Použitý software	17
4.3 Části programu	17
4.3.1 Získání obrázku	17
4.3.2 Načtení dat	18
4.3.3 Detekce hladiny	20
Gradient	20
Prahování	21
Další metody a možná vylepšení	22
4.3.4 Grafické rozhraní	23
5 Testování	24
5.1 Nižší teplota	25
5.2 Vyšší teplota	26
5.3 Ustálená teplota	28

6	Využití v praxi	30
6.1	Existující řešení	30
6.2	Návrh řešení	31
7	Závěr	32
	Seznam použité literatury a zdrojů	33
	Seznam použitého SW	36
	Seznam příloh	37

Seznam použitých značek a symbolů

$H_{0\lambda}$ spektrální intenzita záření černého tělesa [Wm^{-3}]

H_0 intenzita záření černého tělesa [Wm^{-2}]

H_e intenzita záření reálného tělesa [Wm^{-2}]

λ vlnová délka [m]

ε emisivita [-]

τ transmitance [-]

α absorbance [-]

ρ reflektance [-]

ϕ světelný tok záření [W]

NIR Near infrared

SWIR Short wavelength infrared

MWIR Middle wavelength infrared

LWIR Long wavelength infrared

IČ, IR infračervený

1 Úvod

Při automatickém stáčení kapalin do lahví ať už v potravinářském nebo zpracovatelském průmyslu je potřeba kontrolovat úroveň naplnění. Jednak může dojít k chybě, kdy lahev není dostatečně naplněna, ale také je výhodné průběžně kontrolovat kalibraci stáčecího stroje, aby dlouhodobě nedocházelo ke zbytečným ztrátám stáčením většího objemu než má v každém balení být. U průhledných lahví a neprůhledných kapalin lze snadno využít kontrolu běžnou kamerou ve viditelném spektru. Pro další jiné případy je situace složitější. Existují řešení, kdy se lahve prozařují rentgenovým zářením nebo gamma zářením [13], nebo se využívá jednodušší kontrola pomocí dvou bodových senzorů různého typu, které detekují pouze přeplnění nebo nedostatečné naplnění. Navrhovaný způsob měření termokamerou by mohl umožnit nový přístup k tomuto problému.

Nejprve ale popíšu princip termografie a základy termografického měření, nezbytné pro správnou práci s termokamerou.

2 Teoretická část

2.1 Fyzikální podstata termografie

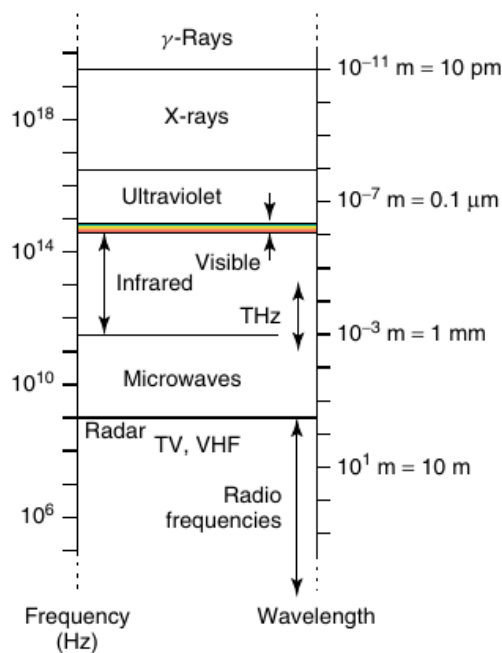
Všechna hmota si s okolím vyměňuje energii ve formě elektromagnetického záření. Množství této energie závisí na teplotě, ale i vlastnostech povrchu tělesa. Měřením této energie a ze znalosti vlastností povrchu tělesa jsme schopni určit jeho teplotu. [10]

2.2 Černé těleso

Předtím, než se začneme zabývat infračerveným zářením, je potřeba představit si tzv. černé těleso. Jak jsem zmínil výše, množství energie vyzařené tělesem závisí i na materiálových vlastnostech povrchu tělesa. Například lesklé povrchy vyzařují velmi málo oproti matným černým povrchům při stejné teplotě. Abychom mohli pracovat s intenzitou záření pouze v závislosti na teplotě, zavádíme model tělesa, které vyzařuje při dané teplotě maximální množství energie. Černé těleso má emisivitu $\varepsilon = 1$, což také znamená, že neodráží žádné na něj dopadající záření (více v odstavci 2.4).

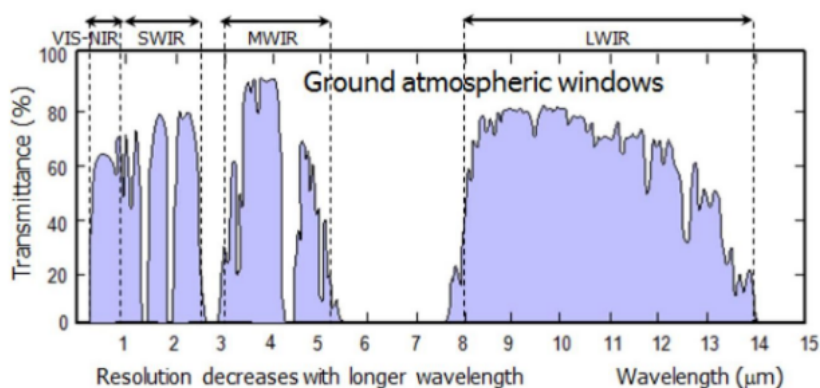
2.3 Infračervené záření

Infračerveným zářením označujeme část spektra elektromagnetického záření o vlnových délkách $\lambda = 750 \text{ nm}$ až 1 mm . [11] Tento interval není přesně definován, některé zdroje uvádí jiné mezní hodnoty. V kratších vlnových délkách navazuje na infračervené záření červenou barvou viditelná část elektromagnetického spektra, z čehož plyne i jeho název. Delší vlnové délky má mikrovlnné záření. Infračervené záření pro potřeby termografie dále dělíme podle



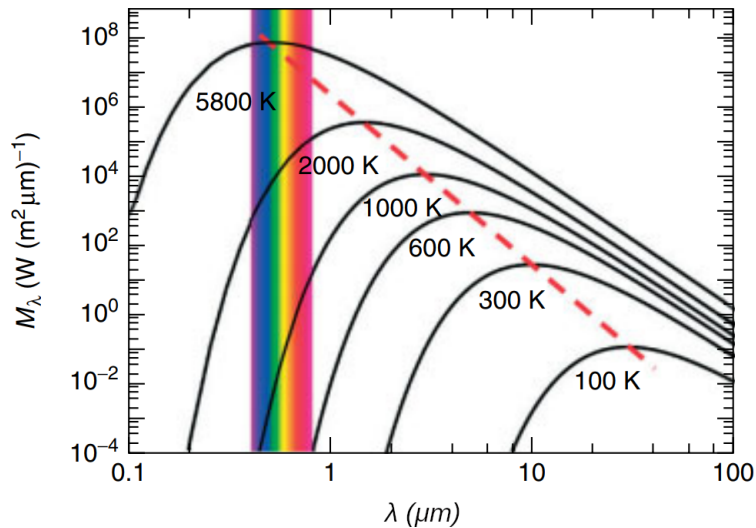
Obr. 1: Rozdělení EM spektra podle vlnových délek [10]

vlnové délky na dílčí intervaly. Pro termografii se používají spektra oddělená pásmy, které absorbuje atmosféra (Obr. 2), obvykle označovaná anglickými zkratkami NIR (Near infrared), přímo navazující na viditelnou část spektra, SWIR (Short wavelength infrared) přibližně (1 – 2,5) μm , MWIR (Middle wavelength infrared) přibližně (3–5) μm a LWIR (Long wavelength infrared) (8 – 14) μm . [10]



Obr. 2: Propustnost atmosférou na povrchu Země v závislosti na vlnové délce [1]

Spektrální intenzita, záření černého tělesa o určité teplotě nestoupá se zmenšující se vlnovou délkou do nekonečna, jak předpokládala klasická fyzika ještě na konci 19. století. Tento rozpor stál na počátku kvantové teorie a označuje se jako "ultrafialová katastrofa". Rozložení spektrální intenzity černého tělesa odvodil na přelomu 19. a 20. století Max Planck (rovnice 1).



Obr. 3: Vyzařovací spektrum černého tělesa o různých teplotách [10]

$$H_{0\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

kde $H_{0\lambda}(\lambda, T)$ je spektrální intenzita vyzařování [W/m^2], $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J/s je Planckova konstanta a $c \approx 299,79$ m/s je rychlost světla. Graf této funkce pro různé teploty je na Obr. 3.

Z grafu rozložení pro různé teploty na Obr. 3 je vidět, že spektrální intenzita vyzařování má určité maximum a s kratšími vlnovými délkami opět klesá. Polohu tohoto maxima pro různé teploty popisuje Wienův posunovací zákon.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2)$$

kde $b \approx 2.899 \times 10^{-3}$ mK je Wienova konstanta.

Dosadíme-li do Wienova zákona teplotu 293 K, která přibližně odpovídá teplotám okolí, ve kterém se běžně pohybujeme, zjistíme, že maximum spektrální intenzity záření je ve vlnové délce $\lambda_{max} = \frac{0.002899}{293} = 9,89 \mu\text{m}$, což je přibližně střed LWIR části IR spektra.

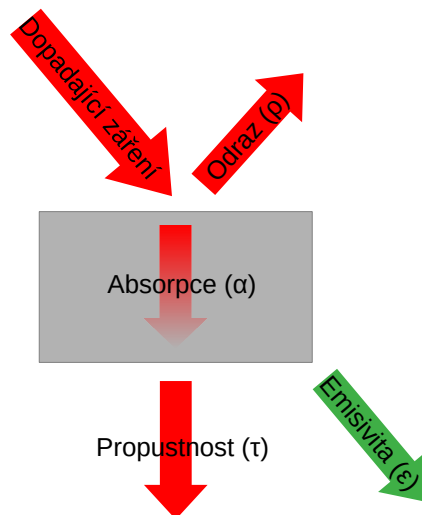
Celkovou energii vyzařování černého tělesa získáme integrací Planckova zákona po vlnové délce od 0 do ∞ . Výsledný vztah je Stefan–Boltzmannův zákon.

$$H_0(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

ve kterém $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta.

2.4 Emisivita, transmitance, odrazivost

Výše zmiňované vztahy platí pro černá tělesa. Reálná tělesa vždy vyzařují méně energie než model černého tělesa. Chceme-li tyto vztahy aplikovat na reálné objekty, musíme opět zohlednit vliv povrchu tělesa na množství vyzařené energie pomocí emisivity. Ta je dána jako



Obr. 4: Schéma rozkladu záření na rozhraní tělesa

poměr mezi intenzitou vyzařování daného tělesa (H_e) a intenzitou vyzařování černého tělesa (H_0) při téže teplotě. [6] Emisivita nabývá hodnot od 0 (ideální zrcadlo) do 1 (černé těleso). Emisivita není materiálová konstanta, ale závisí i na teplotě, vlnové délce nebo úhlu pod kterým objekt zkoumáme. Proto je potřeba emisivitu určit pro každé měření a nelze spoléhat na tabulkové hodnoty.

$$\varepsilon = \frac{H_e}{H_0} \quad (4)$$

Lze tedy říct, že emisivita popisuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Gustav Kirchhof odvodil, že tato schopnost souvisí se schopností teplo absorbovat a že hodnota emisivity odpovídá hodnotě absorbance. [6]

$$\varepsilon = \alpha. \quad (5)$$

Pokud není záření dopadající na reálné těleso absorbováno, může se buď odrazit, nebo jím projít. Toto chování popisují další dva koeficienty - odrazivost a propustnost (reflektance a transmittance). Situace je znázorněna na schématu na Obr. 4.

Norma ČSN ISO 18 434-1 definuje tyto koeficienty následovně. [11]

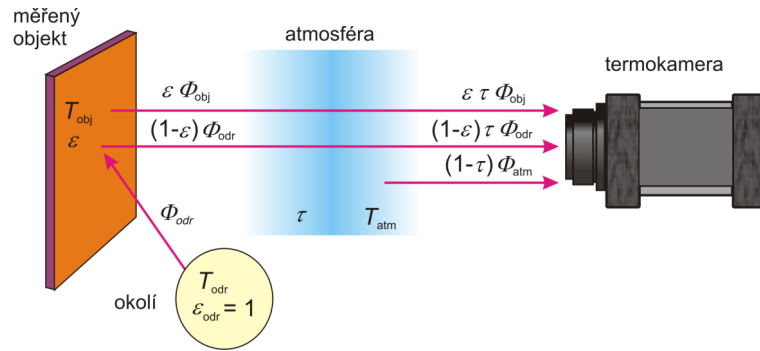
emisivita ε poměr energie vyzařované z povrchu objektu k vyzařované energii černého tělesa se stejnou teplotou, jakou má objekt, a v tom samém spektrálním intervalu,

propustnost τ nebo také transmittance je část infračervené energie v určitém spektrálním intervalu, která objektem prostupuje,

odrazivost ρ poměr zářivé energie odražené od povrchu objektu k celkové zářivé energii dopadající na tento povrch.

Mezi těmito koeficienty je vztah

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$



Obr. 5: Znárodnění situace při měření termokamerou [9]

který znamená, že energie dopadající na těleso se rozdělí na tři složky, jedna se od tělesa odrazí, druhou těleso pojme a třetí projde skrz něj.

2.5 Rovnice termografie

Z uvedeného vztahu můžeme odvodit základní rovnici termografie. Budeme uvažovat, že měříme teplotu tělesa, které je v dané části spektra neprůsvitné ($\tau = 0$), takže pro měřené těleso bude platit

$$\varepsilon + \rho = 1.$$

Znamená to, že záření vycházející z povrchu tělesa bude obsahovat i složku od něj odraženou. A čím bude emisivita povrchu menší, tím větší bude mít tato složka vliv na měření. Od tělesa se odrazí záření, které závisí jednak na teplotě okolí a zároveň na jeho emisivitě. K určení množství tohoto záření používáme takzvanou odraženou zdánlivou teplotu, která se určuje například podle metod zmíněných dále v kapitole 2.6.

Měření probíhá v atmosféře, se kterou musíme počítat. Uvažujeme její propustnost τ_{atm} , která závisí především na její relativní vlhkosti a vzdálenosti, kterou skrz ní musí záření projít. Atmosféra je také zdrojem záření a jelikož můžeme zanedbat její odrazivost, bude pro ni platit rovnice

$$\varepsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm}.$$

Z výše uvedeného lze sestavit rovnici termografie ve tvaru:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \tau_{atm} \Phi_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau_{atm} \Phi_{odr} + (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm}. \quad (6)$$

Φ značí zářivý tok [W]. [9]

2.6 Stanovení parametrů měření

Aby bylo možné přesně určit teplotu, je tedy nutné znát emisivitu povrchu tělesa a odraženou zdánlivou teplotu. Několik metod pro stanovení těchto parametrů popisuje technická norma ČSN ISO 18 434-1. [11]

2.6.1 Odražená zdánlivá teplota

Pro měření odražené teploty uvádí norma dvě metody. V prvním případě se využije "infračervený reflektor", odražeč, který dokonale odráží v IČ pásmu ve kterém se pohybujeme. Kamera se umístí do místa, odkud bude probíhat měření a nastaví se na ní emisivita $\varepsilon = 1$ a vzdálenost od objektu 0. Reflektor se poté umístí před objekt rovnoběžně s měřeným povrchem. Odražená zdánlivá teplota je hodnota, kterou v tu chvíli kamera zaznamenává.

Ve druhé metodě se odražená zdánlivá teplota určí umístěním kamery před měřené místo pod úhlem, ve kterém na něj dopadá záření z okolí. Odražená zdánlivá teplota je průměr teplot, které kamerou v tomto směru naměříme. Emisivita je při tomto měření opět nastavena na $\varepsilon = 1$ a vzdálenost od objektu 0. [11]

2.6.2 Emisivita

Pro měření emisivity uvádí norma dvě metody, obě vyžadují kontakt s měřeným objektem. První z nich popisuje měření emisivity tak, že se nejprve změří skutečná povrchová teplota kontaktním teploměrem. Poté se upravuje hodnota emisivity tak, aby teplota objektu na termogramu odpovídala změřené teplotě.

Druhá metoda využívá materiál o známé emisivitě. To bývá obvykle speciální barva nebo samolepka, která se nanese (nalepí) na měřený objekt. Místo o známé emisivitě použijeme ke změření povrchové teploty a podle ní pak nastavíme emisivitu, aby neošetřený povrch odpovídal této teplotě. Obě tyto metody se použijí až po správném určení odražené zdánlivé teploty. [11]

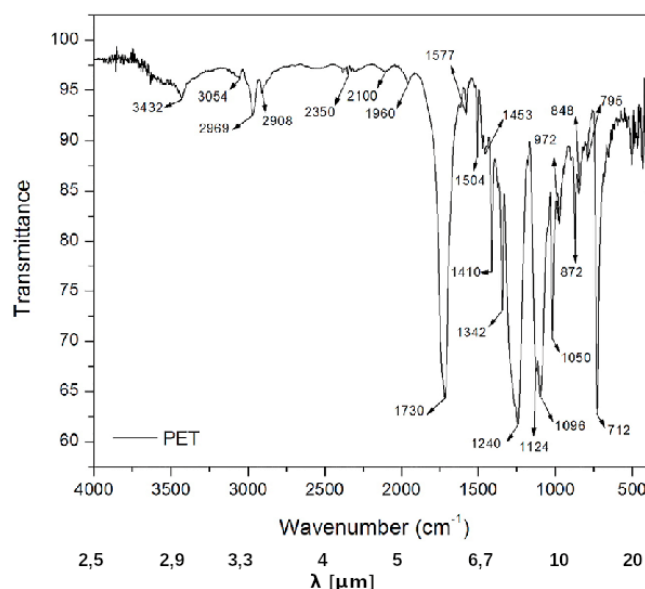
2.7 Prostupnost materiály

Když dopadá záření na objekt, může být absorbováno, odraženo nebo projde skrz. Na atomární úrovni dochází k tomu, že částice v objektu energii záření buď přijmou, nebo nepřijmou. Absorpce záření závisí na chemických vlastnostech látky a vede ke zvýšení vnitřní energie objektu, která se projeví například zvýšením teploty. Kvantová mechanika říká, že elektrony mohou nabývat pouze diskrétních hodnot energie daných energetickými hladinami. Z toho vyplývá, že ne každý elektron bude reagovat s zářením o určité vlnové délce. [7] To je důvod, proč ve viditelném spektru průhledné materiály nemusí propouštět IČ záření a naopak, proč se ve viditelném spektru neprůhledné germanium používá na výrobu čoček pro termokamery. Pokud není záření objektem absorbováno, může projít skrz něj. Množství záření, které pro-

jde materiálem můžeme experimentálně stanovit. Detektorem záření v daném spektru nejprve změříme intenzitu záření samotného zdroje záření, poté změříme intenzitu záření při vložení zkoumaného vzorku mezi zdroj a detektor.

2.8 Spektroskopie

Interakce mezi infračerveným (obecně elektromagnetickým) zářením a materiálem tedy závisí na jeho chemickém složení, což je základem pro metodu analytické chemie zvanou infračervená spektroskopie. Princip této metody spočívá v tom, že se zkoumaný vzorek látky umístí mezi zdroj IČ záření a detektor, který měří spektrální hustotu energie, která skrz něj prošla. Určité vlnové délky způsobí rozkmitání daných chemických vazeb a pohlcení energie záření. Podle toho, které vlnové délky vzorek absorbuje, je možné určit, které atomové skupiny se v molekulách vzorku vyskytují. Výsledek se může zobrazit jako graf závislosti propustnosti na vlnovém čísle jak je ukázáno na Obr. 6. Ve spektroskopii se běžně pracuje s vlnovým číslem, což je převrácená hodnota vlnové délky. Pro infračervenou spektroskopii se používá oblast mezi vlnovými délkami $(2, 5 - 25) \mu m$ (vlnové číslo $(4000 - 400) cm^{-1}$). Je typické, že pravá strana grafu od $1500 cm^{-1}$ je v případě organických látek podstatně složitější než levá. Říká se jí oblast otisku prstu (*fingerprint region*) a je charakteristická pro každou sloučeninu. [8] Při použití termografie v LWIR pásmu se pohybujeme ve vlnových délkách $(8 - 14) \mu m$, které právě náleží této oblasti.



Obr. 6: Výsledek IČ spektroskopie vzorku PET [15]

2.9 Princip fungování termokamery

První termokamery měly pouze jeden detektor a dvourozměrný obraz vytvářely natáčením odrazivých ploch. Současné kamery mají matici detektorů ležících v ohnisku za čočkou,

z nichž každý vytváří jeden bod na výsledném termogramu. Tato technologie se označuje jako FPA (focal plane array). V termokamerách se používají dva typy detektorů - tepelné a kvantové.

2.9.1 Kvantové senzory

Pro infračernévé záření o malých vlnových délkách se obvykle používají kvantové senzory, které tvoří matice fotocitlivých polovodičových PN přechodů. Ke své funkci využívají fotoelektrický jev, kdy elektrony v krystalu polovodiče reagují s fotony záření tak, že od nich přijmou energii a excitují do vodivostního pásma. Tím vytvářejí elektrický potenciál. [6]. Nejběžnější takové senzory používají InGaAs detektor, který funguje ve vlnových délkách přibližně mezi $1,0 \mu m$ a $1,7 \mu m$, nebo InSb detektor funkční v MWIR pásmu od $3 \mu m$ do $5 \mu m$. [1].

2.9.2 Tepelné senzory

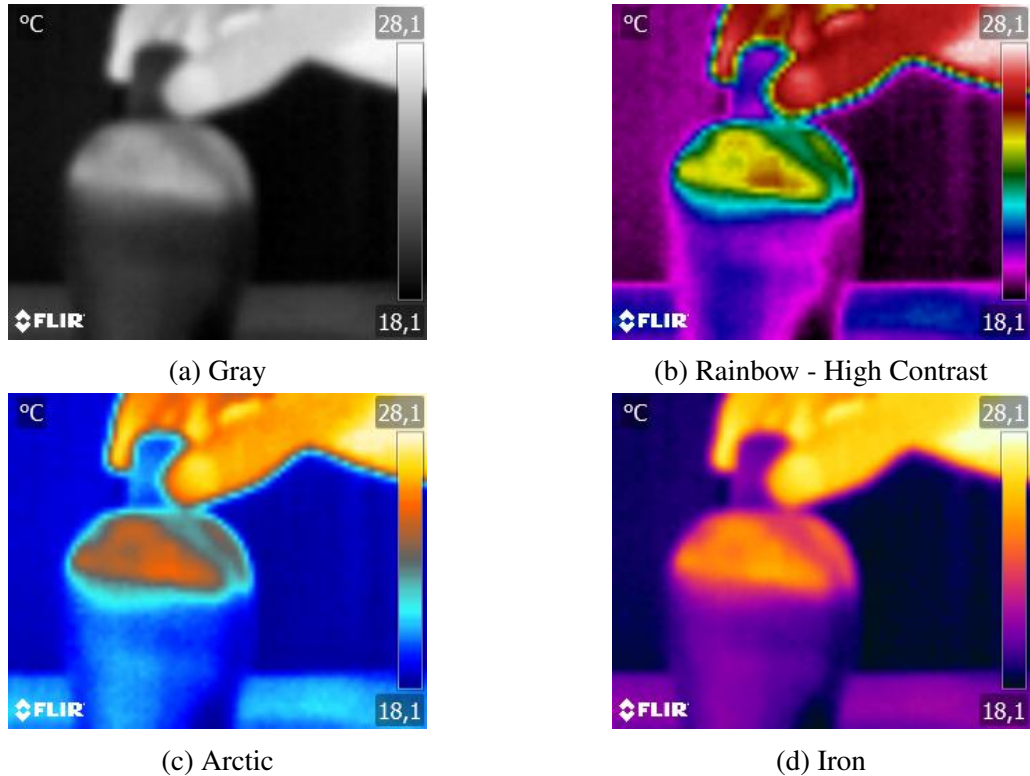
Mnohem běžněji se ale setkáme s termokamerami pracujícími v oblasti LWIR, které obvykle používají mikrobolometrické detektory. Mikrobolometr je součástka, která mění odpor v závislosti na své teplotě, která se mění s dopadajícím IČ záření. V termokamerách se používají v maticích o různých rozměrech, které určují výsledné rozlišení kamery. Bolometry jsou umístěny na integrovaném obvodu, který měří jejich odpor a vytváří signál, který se dále zpracovává. Mikrobolometr se skládá z několika tenkých vrstev. Dopadající paprsek záření je absorbován vrstvou například Si_3N_4 . [2] Ta se v důsledku toho ohřeje a současně ohřeje snímací termistorovou vrstvu, která změní svůj odpor a je připojena elektrodami k obvodu. Bolometr je v ideálním případě tepelně izolován od tepla přicházejícího z jiných zdrojů než z paprsku procházejícího skrze čočku. Proto je vyvýšen nad desku, na které je snímací obvod, a tak je vzduchovou vrstvou izolován. Zároveň je pod ním odrazivá vrstva, která z jedné strany brání záření ze zbytku zařízení a zároveň odráží tu část paprsku, která nebyla absorbována a prošla skrz senzor, zpět na něj. Celý senzor se udržuje při stálé teplotě například pomocí Peltierova článku. [9] Čočky se vyrábějí především z germania.

2.10 Zobrazení dat

Data získaná ze senzoru jsou převedena do barevného spektra podle zvolené palety. Běžně se používá například paleta podle teploty oceli - od nejchladnější černé přes modrou, červenou, žlutou až po bílou nejteplejší. Důležité je si uvědomit, že velký kontrast barev na termogramu nemusí nutně znamenat velký rozdíl v naměřených teplotách. Nejlepší představu o naměřených hodnotách může dát černobílé spektrum, které převádí zdánlivou teplotu na úroveň jasu daného pixelu.

Různí výrobci používají vlastní datovou strukturu souboru termogramu, kterou lze otevřít pouze pomocí jejich vlastního softwaru. Termogramy jsou obvykle ukládány jako obrázek

například .jpg, který lze zobrazit v běžném prohlížeči obrázků, avšak obsahuje i původní naměřené teploty, nastavení emisivity a dalších parametrů, se kterými lze pracovat pouze v dodávaném programu.

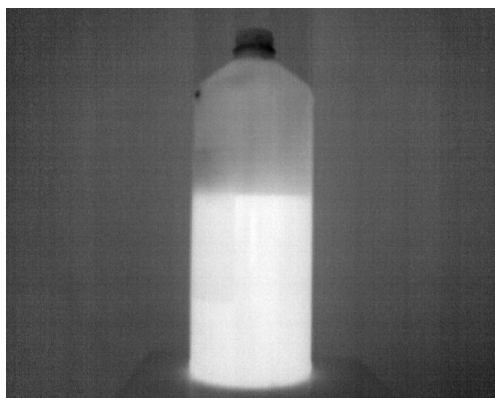


Obr. 7: Ukázka základních barevných palet v programu FLIR Tools

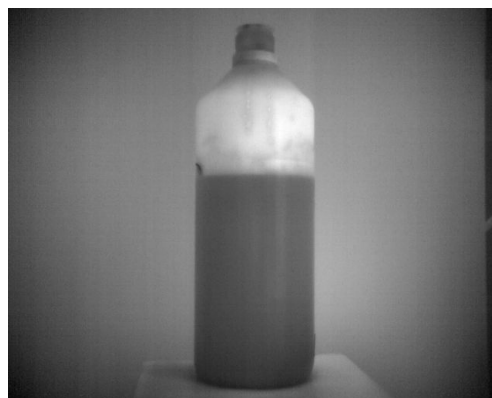
3 Navrhované principy měření

3.1 Rozdílná teplota kapaliny

Pro určování úrovně hladiny uvnitř nádoby termokamerou je třeba uvažovat dvě různé situace. Ta jednodušší nastane v případě, že kapalina uvnitř obalu má teplotu rozdílnou od okolí. Ať už bude kapalina teplejší nebo chladnější, bude na povrchu smáčené části jiná teplota než v nesmáčené části, což bude vidět na termogramu. Záleží ale na vlastnostech konkrétní lahve, jak bude vypadat přechod mezi těmito dvěma oblastmi. V ideálním případě by stěna lahve měla být co nejtenčí, aby její vnější povrchová teplota co nejvíce odpovídala teplotě obsahu. Zároveň by materiál lahve měl být málo tepelně vodivý tak, aby byl teplotní rozdíl na povrchu co nejprudší. Budeme-li uvažovat použití na stáček lince, rozdíl mezi teplotou kapaliny a teplotou okolí může vzniknout přirozeně technologií výroby. Stačí, když je teplotní rozdíl relativně malý, 5 °C se ukázalo být zcela dostatečných v případě testovaných lahví, viz Obr. 8.



Obr. 8: Termogram HDPE lahve s obsahem teplejším než teplota okolí



Obr. 9: Termogram HDPE lahve s obsahem o teplotě okolí povrchově ohřáté fénem

3.2 Kapalina o teplotě okolí

V případě, že teplota kapaliny bude ustálená na teplotu okolí, bude vnější povrchová teplota obalu všude stejná a bude potřeba použít další zdroj energie, který umožní detekci hladiny. První nápad, který se ale příliš neosvědčil byl pokus prozářit lahev zdrojem IR záření. Kapalina uvnitř lahve by absorbovala záření, zatímco samotná lahev by záření propouštěla. Pokusem jsem ale zjistil, že většina běžně používaných obalů dostatek záření nepropouští. Tento přístup částečně fungoval při použití lahve z HDPE. V situaci, kdy teplota obsahu odpovídá teplotě okolí, se mnohem více osvědčilo ohřát povrch lahve horkým vzduchem, v mém případě fénem. Krátkým (cca 2 sekundy) pofoukáním se povrch nesmáčené části lahve okamžitě ohřál, ve smáčené ale zůstal na prakticky stejné teplotě díky ochlazování kapalinou. Termogram je na Obr. 9.

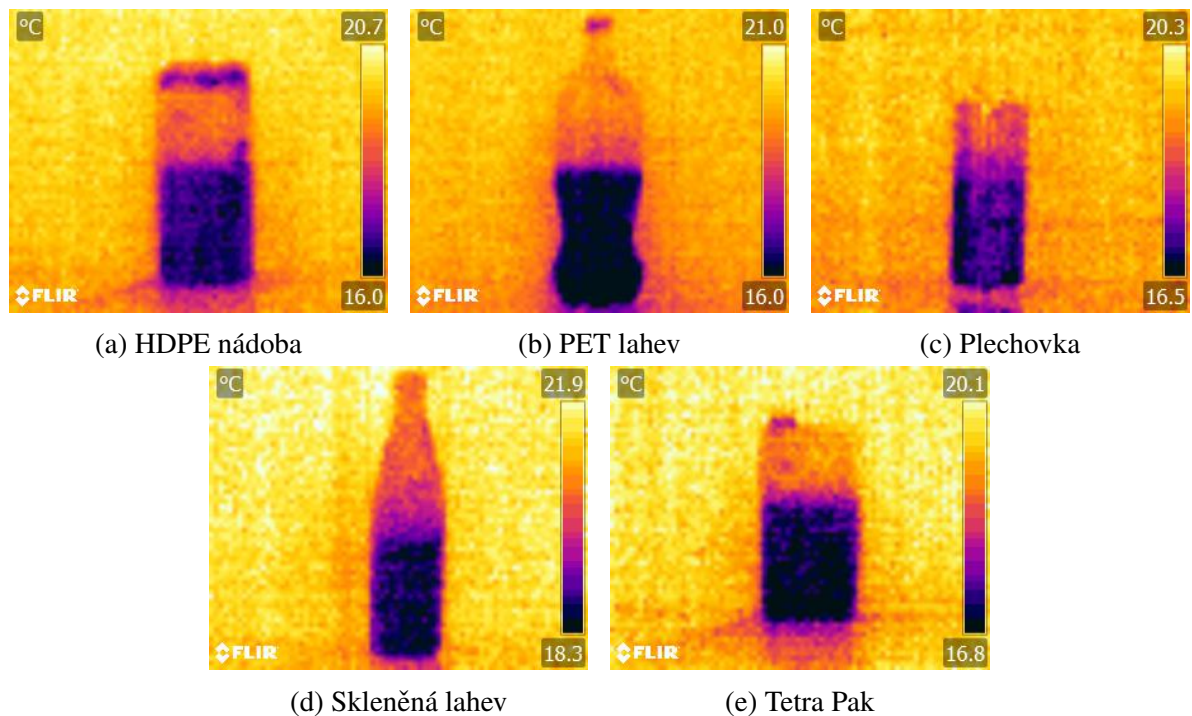
3.2.1 Aktivní termografie

Tento postup by se dal označit za metodu tzv. aktivní termografie. Jejím principem je obecně aktivní vybuzení vzorku a následné pozorování jeho chování. Uvedu několik v praxi využívaných postupů, se kterými by bylo možné dále experimentovat. Nejčastěji se aktivní termografie používá pro nedestruktivní testování tenkých vrstev, například vad skladby uhlíkových kompozitů. Jako zdroj energie se používají halogenové lampy, výbojky, v případě vodivých materiálů i zdroj proudu. Metody se liší zejména použitým budícím signálem. [12]

Lock-in Lock-in termografie používá periodický zdroj energie, zatímco se pořizuje záznam povrchu staticky umístěnou termokamerou. Záznam se pak zpracuje a vyhodnocuje se amplituda a fázový posun naměřeného signálu oproti budícímu. Z nich je možné sledovat dynamické chování vzorku, které může vést k odhalení vnitřních vad.

Flash Podobným způsobem funguje i pulzní termografie (*flash thermography*), kdy se namísto periodického budícího signálu použije jeden silný záblesk a vysokorychlostní termokamera. Metoda je rychlejší, ale použitelná jen pro tenčí vrstvy.

Transient Třetí používaná metoda, kterou zmíním, je metoda tepelné vlny *transient thermography*, která je v principu stejná jako pulzní, ale používá se výrazně větší délka pulzu. Měření je potom delší, avšak stále kratší než v případě lock-in termografie.



Obr. 10: Výběr vhodných obalů

3.3 Vybrané lahve pro testování

Provedl jsem jednoduchý experiment, kdy bylo mým cílem vybrat jeden nebo více vhodných obalů, kterými se budu nadále zabývat. Sehnal jsem několik běžně používaných lahví a obalů z různých materiálů, které jsem naplnil vodou o teplotě přibližně 17 °C. K dispozici jsem měl dózu z HDPE, PET lahev, hliníkovou nápojovou plechovku, skleněnou lahev a Tetra Pak. Teplota laboratoře byla 21 °C. Pracoviště jsem odstínil od vnějších zdrojů tepelného záření. Použil jsem kameru FLIR AX5 s rozlišením 80x64 pixelů a oficiální software na zpracování termogramů od výrobce.

Z několika vyzkoušených lahví jsem si k dalšímu testování zvolil lahev z polyethylenu s vysokou hustotou (HDPE) a obalový karton Tetra Pak. Na termogramech Obr. 10a a 10e je totiž hladina v nich zřetelně vidět. Oba tyto obaly jsou navíc neprůhledné, využití termografie by pro ně tedy mělo smysl. PET lahev jsem vyřadil, jelikož bývá běžně průhledná, navíc má pro testovací účely nevhodný tvar. Jak je ale na Obr. 10b vidět, hladina je u ní také dobře rozeznatelná. Na skle a hliníku, Obr. 10d a 10c, je teplotní přechod pozvolný a tím pádem nevhodný. Dalším krokem bylo vytvořit program, který metodami počítačového vidění hladinu ve vybraných lahvích automaticky detekuje.

4 Program

4.1 Předpoklady a cíl

Cílem praktické části práce bylo vytvořit program, který bude možné použít k demonstraci využitelnosti termografického měření hladiny v lahvích, nikoli řešení pro reálnou situaci. Konkrétní podmínky jsem si nastavil sám ve snaze o co nejobecnější řešení problému, zadané bylo pouze použití termokamery Wiris Pro od společnosti Workswell s.r.o.. Uvažovaná situace bude následující. Kamera bude umístěna staticky a zaostřená na lahev, která bude celá v zorném poli. Na snímku bude jediná lahev a pozadí bude mít konstantní a rovnoměrnou teplotu. Pracoviště bude odstíněno od okolního záření tak, aby nevznikaly nežádoucí odrazy. Cílem je detekovat hladinu v nádobě a určit procento naplnění.

4.2 Použitý software

V programu využívám dvě sady nástrojů od výrobce kamery a to Wiris Data SDK pro přístup k termografickým datům ze souboru a Ethernet Stream SDK, který zajišťuje ovládání kamery a přístup k videu přes síť. [18] [17] Knihovna Wiris Data SDK je napsána v jazyce C++ a je k dispozici ve zkompileovaném stavu. Proto jsem program napsal také v tomto jazyce. K vytvoření grafického rozhraní jsem použil Qt, což je multiplatformní framework pro tvorbu programů s grafickým prostředím nejen pro desktop v jazyce C++. [19] Je k dispozici jak s komerční placenou licenci, tak opensource. Program jsem napsal pro Linux, pro použití na Windows by bylo potřeba upravit soubor projektu s odkazy na použité knihovny.

4.3 Části programu

Celkově mají zdrojové kódy k vytvořenému programu okolo patnácti set řádků, uvedu tedy jen podstatné části, který mají zásadní vliv na funkci.

4.3.1 Získání obrázku

Na vstupu programu je obrázek obsahující termografická data. Pro přístup k živému přenosu z kamery se používá rtsp server, který běží přímo v kameře. Tento přenos ale neobsahuje termografická data přímo v podobě naměřených teplot, pouze video převedené do viditelného spektra podle zvolené palety. Tento problém jsem vyřešil tak, že jsem zvolil černobílou paletu, která teploty převede do odstínu šedé. Protože citlivost kamery je $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v osmibitovém barevném rozsahu je 256 odstínů šedé, měl bych být schopen získat tímto způsobem teplotní rozsah $0,05 \cdot 256 = 12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez ztráty přesnosti. Pro připojení ke streamu jsem použil knihovnu OpenCV, s jejíž pomocí je to velice snadné. Objekt VideoCapture udržuje přístup k toku dat a jeho metoda read() vrací aktuální snímek jako objekt `cv::Mat`, což je matice pixelů, se kterou lze dále pracovat.

Kód 1: Připojení ke streamu z kamery

```
11 void streamhandler::run()
12 {
13     cv::VideoCapture cap("rtspsrc location=rtsp://" + address.toStdString()
14         + ":8554/thermal latency=0 caps = \"application/x-rtp, media=(string)
15         video, clock-rate=(int)90000, encoding-name=(string)H264, payload=(
16         int)96\" ! rtph264depay ! decodebin ! videoconvert ! appsink", cv::
17         CAP_GSTREAMER);
18
19     if(!cap.isOpened())
20     {
21         std::cout << "could not open";
22         return;
23     }else{
24         std::cout << "connected!";
25         cv::Mat frame;
26         while(_stream)
27         {
28             cap.read(frame);
29             if (frame.empty())
30             {
31                 break;
32             }
33             streamFrame = QImage((uchar*) frame.data, frame.cols, frame.rows
34                 , frame.step, QImage::Format_RGB888);
35             emit imageChanged();
36         }
37         _stream = false;
38         cap.grab();
39         cap.release();
40     }
41 }
```

Druhou možností je v programu otevřít přímo soubor termogramu s využitím knihovny Wiris Data SDK. Tuto funkci jsem použil především k ladění programu a testování, avšak pro reálnou aplikaci by mohlo být výhodnější pořídit jeden snímek každé lahve, která před kamerou projede, a ten analyzovat. Polohu lahve by mohl naznamenat například kapacitní snímač polohy, který by při sepnutí vyslal signál pro pořízení snímku. Tento systém jsem ale neimplementoval, jelikož jsem nevymyslel snadný způsob, jak při vzdáleném přístupu přes ftp server získat z kamery poslední pořízený snímek.

4.3.2 Načtení dat

Ať už je vstupem termogram nebo černobílý obrázek, můžeme ho zobecnit jako matici hodnot $\bar{A} = (a_{x,y})$ o rozměrech $h \times w$. Absolutní hodnoty členů nejsou důležité. Dalším

krokem je získat vektor $\bar{T} = (T_i)$, který bude obsahovat pouze informaci o průběhu teploty na steně lahve. Nastaveno tedy musí být, kde na snímku se lahev nachází. Předpokladem je, že osa lahve je na snímku přesně ve svislém směru. K určení polohy lahve v rámci snímku používám vertikální polohu dna a hrdla lahve spolu s horizontální polohou její osy. V tomto obecném případě označím indexem k řádek matice, ve kterém se nachází hrdlo lahve, lépe řečeno horní hranice měření. Index l značí sloupec vstupní matice, ve kterém leží osa lahve. Parametrem n je označena výška lahve, lépe řečeno počet řádků mezi hrdlem a dnem. Vektor \bar{T} o $n + 1$ prvcích by tedy bylo možné získat zkopírováním příslušných členů matice v řádku l mezi horní a dolní hranicí. Abychom ale získali lepší vstupní data, je výhodnější z každého řádku matice použít aritmetický průměr $2m + 1$ prvků symetricky kolem osy lahve tak, jak je v následujícím předpisu. Tím se omezí vliv odlesků, případně bodových nerovností, například kapek v nesmáčené části.

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & & & & \cdots & a_{1,w} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & & & & \cdots & a_{2,w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & & & \vdots \\ & & & a_{k,(l-m)} & \cdots & a_{k,l} & \cdots & a_{k,(l+m)} \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & & & a_{(k+n),(l-m)} & \cdots & a_{(k+n),l} & \cdots & a_{(k+n-1),(l+m)} \\ \vdots & \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ a_{h,1} & a_{h,2} & \cdots & & & & \cdots & a_{h,w} \end{pmatrix}$$

$$T_i = \frac{1}{2m + 1} \sum_{y=(l-m)}^{(l+m)} a_{k+i,y}$$

pro $i \in \langle 0; n \rangle$ a $y \in \langle k; k + n \rangle$.

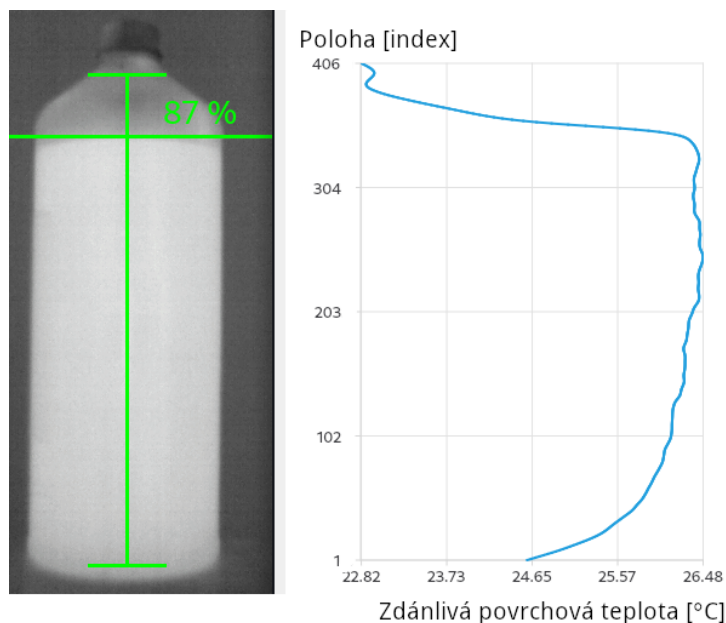
K další redukci šumu a vyhlazení dat se na vektor \bar{T} aplikuje několikrát jednoduchý plovoucí průměr, s předpisem

$$T_i = \frac{T_{i-1} + T_i + T_{i+1}}{3}.$$

Kód 2: Plovoucí průměr

```

312 void detector::movingAverage() {
313     for(int n=0; n < _smoothen; n++)
314     {
315         for(int i = 1; i < (arr.size()-1); i++)
316         {
317             arr.replace(i, (arr.at(i-1)+arr.at(i+1)+arr.at(i))/3);
318         }
319     }
320 }
```



Obr. 11: Možný průběh teploty, na kterém pak probíhá detekce.

Výsledkem předchozích operací je řada hodnot, která by měla obsahovat náhlý skok v hodnotách v místě přechodu mezi studenou a teplou částí lahve. Dalším krokem je nalezení tohoto přechodu.

4.3.3 Detekce hladiny

K tomu jsem vytvořil dvě odlišné metody s cílem vyzkoušet, v jakých podmínkách funguje která lépe. Řadu hodnot, která je vstupem následujících metod, je možné zobrazit v grafu, který se otevře v novém okně, což je velice užitečné a zpravidla to vede k odhalení příčiny chyby detekce. Typický graf vypadá tak, jak je ukázáno na Obr. 11.

Gradient První metoda funguje tak, že hledá místo s největším teplotním spádem. Záleží pak na rozdílu teplot, teplotní vodivosti a tloušťce lahve, jak prudký bude tento přechod. K výpočtu teplotního spádu jsem použil centrální diferenci podle předpisu:

$$D(T_i) = |T_{i+1} - T_{i-1}|$$

pro $i \in \langle 1; n - 1 \rangle$. $D(T_i)$ je teplotní spád v daném bodě a T_i je prvek vektoru teploty. V krajních bodech je $D(T_0) = D(T_n) = 0$.

Tím vznikne nová řada hodnot, ve které se určí maximum. Jeho index se přepočítá, aby odpovídal souřadnicím v obrázku.

Kód 3: Určení hladiny metodou největšího spádu

```
113 | void detector::methodGradient ()
114 | {
```

```

115 | loadArray();
116 | movingAverage();
117 | float grad[length];
118 | int indexOfMax=0;
119 | int max=0;
120 | grad[0]=0;
121 | grad[length-1] = 0;
122 | for(int i = 1;i<(length-1);i++)
123 | {
124 |     grad[i]=std::abs(arr.at(i+1)-arr.at(i-1));
125 |     if(grad[i]>max){
126 |         indexOfMax=i;
127 |         max=grad[i];
128 |     }
129 | }
130 | _level = _top+indexOfMax;
131 | }

```

Prahování Druhá implementovaná metoda funguje na principu prahování (*thresholding*). Princip prahování je takový, že se stanoví určitá hodnota, v tomto případě teploty, a pomocí ní se data rozdělí na dvě části - vyšší a nižší. V tomto případě se nastaví určitá hodnota (threshold) a algoritmus postupuje od hrdla lahve dolů, dokud nepřekročí nastavenou teplotu. Jako prahová hodnota se ukázala být funkční střední hodnota mezi minimem a maximem ve vektoru \bar{T} . Posuvníkem v hlavním okně je možné tuto prahovou hodnotu posouvat v mezích maxima a minima. Postup algoritmu od hrdla dolů je výhodný, protože u dna lahve dochází k náhlému přechodu mezi podložkou a lahví, který by v opačném případě mohl být při nevhodném nastavení nesprávně označen za hladinu.

Kód 4: Určení hladiny metodou prahování

```

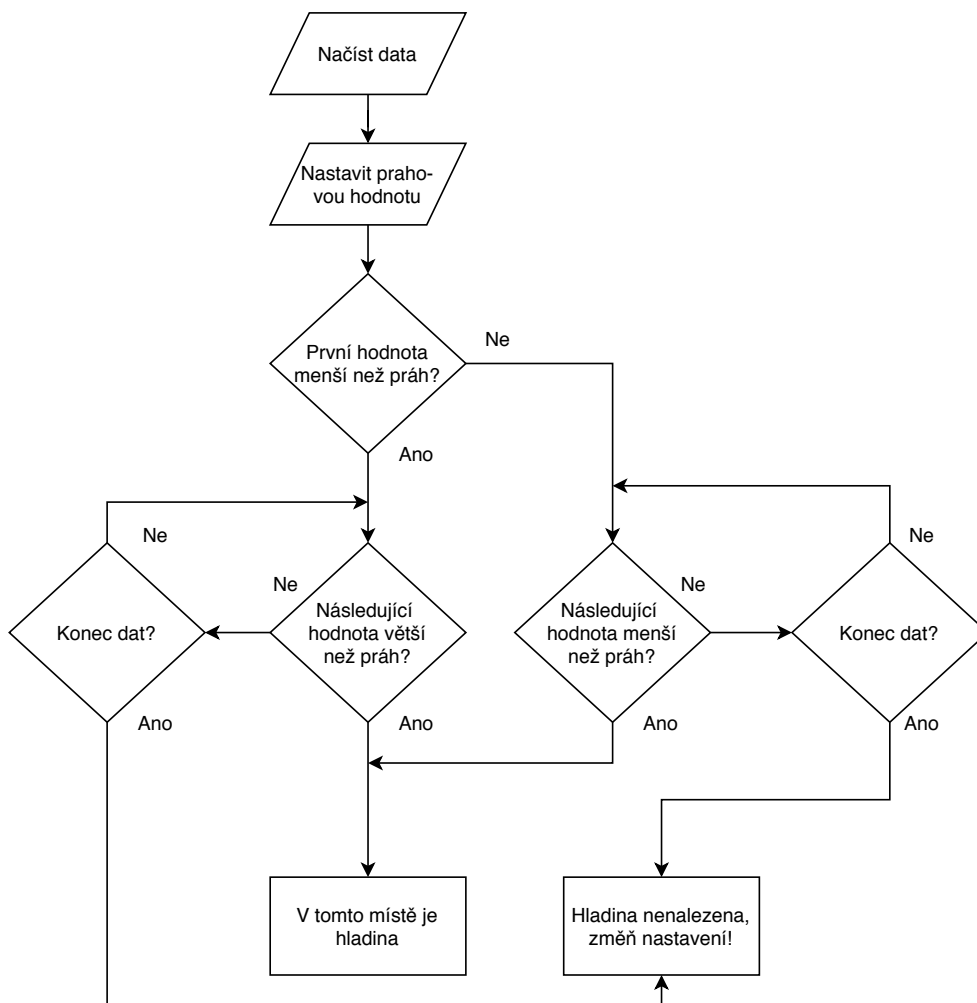
143 | void detector::methodThreshold()
144 | {
145 |     loadArray();
146 |     movingAverage();
147 |     float minTemp = *std::min_element(arr.begin(), arr.end());
148 |     float maxTemp = *std::max_element(arr.begin(), arr.end());
149 |     _threshold = (minTemp+maxTemp)/2;
150 |     _threshold=_threshold+thrTune*( _threshold - minTemp);
151 |     int l = 0;
152 |     bool levelIsSet = false;
153 |
154 |     if(arr[0]<_threshold){
155 |         for(int i = 0;i<(length);i++){
156 |             if(arr[i]>_threshold){
157 |                 levelIsSet = true;
158 |                 l = _top+i;

```

```

159         break;
160     }
161 }
162 }else{
163     for(int i = 0;i<(length);i++){
164         if(arr[i]<_threshold){
165             levelIsSet = true;
166             l = _top+i;
167             break;
168         }
169     }

```

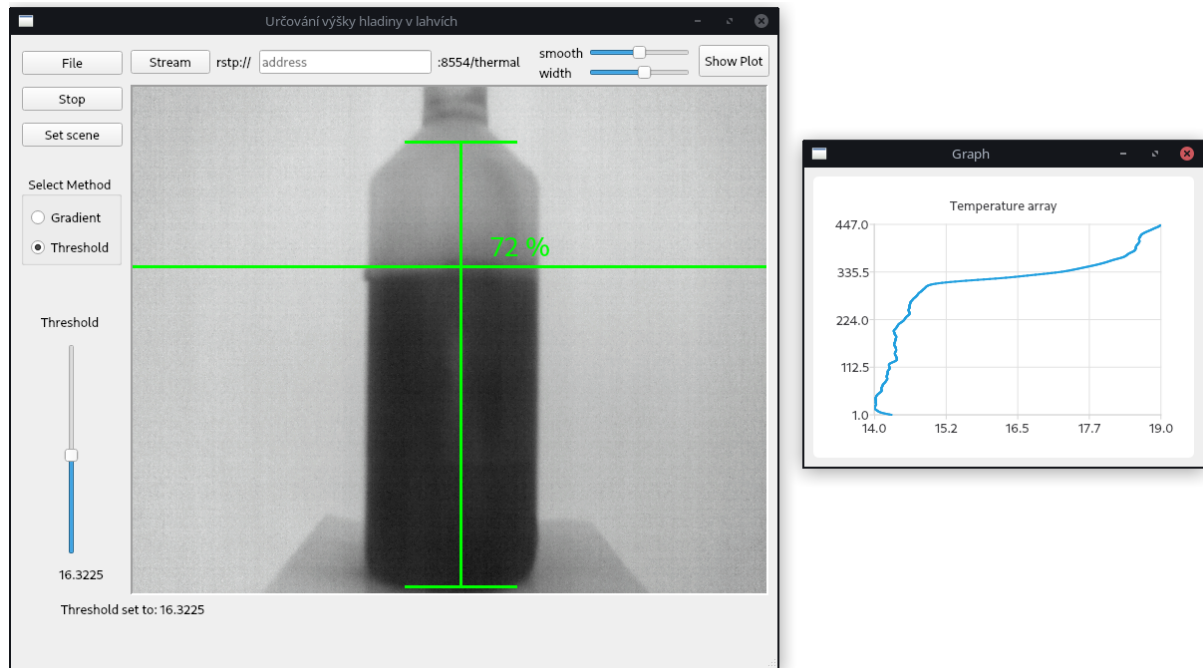


Obr. 12: Vývojový digram prahovací metody

Další metody a možná vylepšení Při hledání největšího teplotního spádu využívám fakt, že plasty používané na výrobu obalů jsou tenké a mají velice malou tepelnou vodivost ($\lambda_{PE} \approx 0.40 \text{ W/mK}$). Teplotní rozdíl je potom na povrchu ostrý a prudký. Obecně ale největší teplotní spád nebude v místě hladiny, ale nad ní. To je třeba brát v úvahu a případně pro daný obal určit, kolik bude tato nepřesnost činit v závislosti na teplotě.

Možností vylepšení by bylo místo práce s diskretními hodnotami proložit teplotní řadu polynomem metodou nejmenších čtverců a pracovat s ní jako s funkcí. Tím by bylo možné zvýšit přesnost, šlo by o tzv. subpixelovou metodu. Odpadla by zároveň nutnost vyhlazovat data jinými způsoby.

4.3.4 Grafické rozhraní



Obr. 13: Grafické rozhraní

V hlavním okně jsou všechny ovládací prvky. Tlačítkem *File* se otevře okno výběru souboru, ve kterém uživatel vybere termogram nebo sekvenci. Tlačítkem *Stop* se zastavuje běh streamu nebo sekvence. Po stisknutí tlačítka *Set scene* v hlavním okně program očekává nastavení scény třemi kliknutími do zobrazovacího panelu. Očekává nejprve nastavení dna a vrcholu lahve, které nastaví podle toho, která ze souřadnic je níž. Nakonec uživatel určí souřadnici X osy lahve, podél které proběhne samotná detekce. Při nastavování je nutné brát v úvahu, že jsou to pouze krajní hodnoty, mezi kterými se načte řada hodnot z pixelů. Je tedy nutné, aby tyto hranice byly uvnitř lahve a ne až za její hranou, protože to může způsobit chybu viz Obr. 16. Pro připojení ke streamu zadá uživatel adresu do adresového řádku a stiskne *Stream*. Posuvníky vpravo nahoře slouží k vylepšení vstupních dat, *smooth* určuje počet cyklů plovoucího průměru a *width* nastaví šířku řádku, ze které se určí průměr. Okno s grafem se otevře a obnovuje tlačítkem *Show plot*. Vlevo se přepíná použitá metoda, *Gradient* je metoda gradientu a *Threshold* je prahování. Posuvníkem *Threshold* lze upravit prahovací hodnotu. V hlavním panelu se zobrazuje aktuální snímek s překryvnou vrstvou zobrazující hranice detekce a urč-

nou hladinu. Pro ukázkou jsem doplnil alarm upozorňující červenou barvou překryvné vrstvy na nedostatečné naplnění, v mém případě 70 %.

5 Testování

Program jsem otestoval na vypůjčené kameře Workswell Wiris Pro. Tu jsem měl v ethernetovém módu připojenou k síti, abych se mohl připojit k rstp serveru. V tomto módu probíhá ovládání a nastavování kamery textovými příkazy po síti. Uvedení kamery do ethernetového módu, nastavení černobílé palety a nastavení rozsahu teplot by bylo možné implementovat přímo jako funkci programu, Workswell k tomu nabízí návod a vzorový kód. [17] Jelikož jsem ale při testování předpokládal nutnost pružně vyladit některá nastavení za běhu podle konkrétního použití (například rozsah teplot), rozhodl jsem se pro jednodušší možnost ovládat zařízení přes Telnet.



Obr. 14: Pracoviště

Kód 5: Připojení ke kameře v programu Telnet, uvedení do ethernetového módu a nastavení černobílé palety

```
[user@userspc ~]$ telnet 10.0.0.230 2240
> SETH TRUE
> OK
> SPTE GRAY
> OK
```

K vyzkoušení jsem si připravil tři druhy obalů - dvě 1 l lahve z HD-PE a jeden nápojový karton také o objemu 1 l. Pro úplnost jsem zároveň vyzkoušel místo vody použít technický líh. Udělal jsem tři měření, nejprve jsem měl kapalinu teplejší než okolí, podruhé chladnější a při třetím měření jsem nechal kapalinu ustálit na teplotu okolí a vyzkoušel jsem dvě metody, které by mohly umožnit určit hladinu i v tomto případě. Lahve jsem umístil před desku z lakovaného plechu, abych měl rovnoměrné pozadí bez rušivých prvků. Kameře jsem měl umístěnou ve vzdálenosti přibližně 0,5 m od lahve a správně zaostřenou. Na kameře jsem nastavil automatický teplotní rozsah a emisivitu $\varepsilon = 1$. Teploty jsem měřil rtuťovým teploměrem.

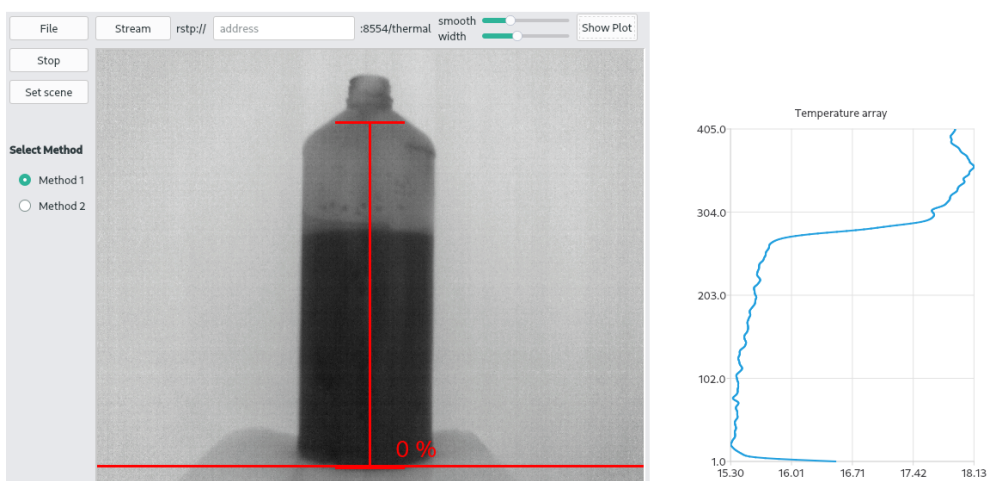


(a) Obal A - lahev HDPE naplněná vodou (b) Obal B - Tetrapak naplněný vodou (c) Obal C - HDPE lahev naplněná technický lihem

Obr. 15: Použité obaly

5.1 Nižší teplota

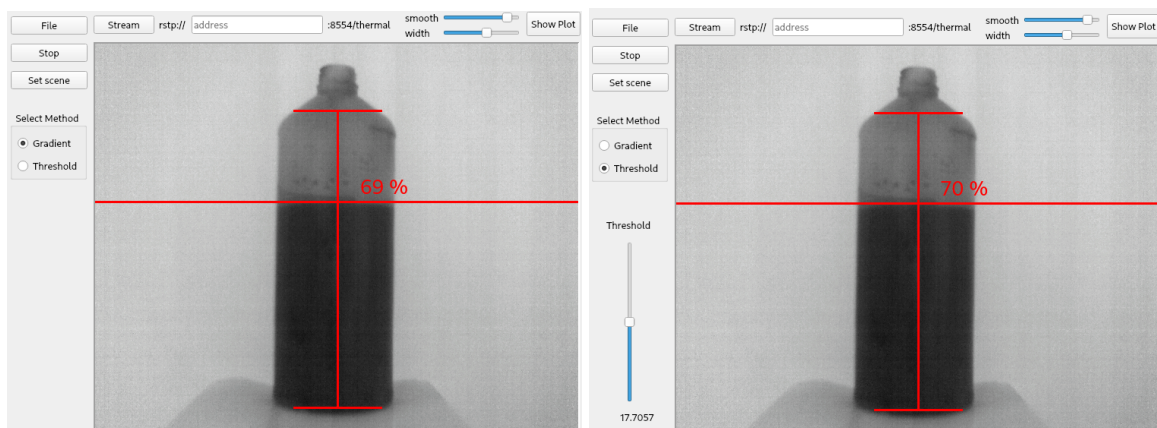
Při naplnění obalů kapalinou o nižší teplotě fungoval program velmi dobře. Metodou hledání největšího gradientu lze přesně určit hladinu. Problém nastane, pokud se nastaví měřený úsek příliš velký. Potom je zpravidla určený přechod mezi lahví a podložkou jako největší tak, jak je to vidět na Obr. 16. Metoda prahování bez upravení hraniční hodnoty dává o 1 až 2 % jinou hodnotu, ale nemívá problém s nevhodným nastavením polohy dna.



Obr. 16: Chyba v případě špatně nastavených mezí

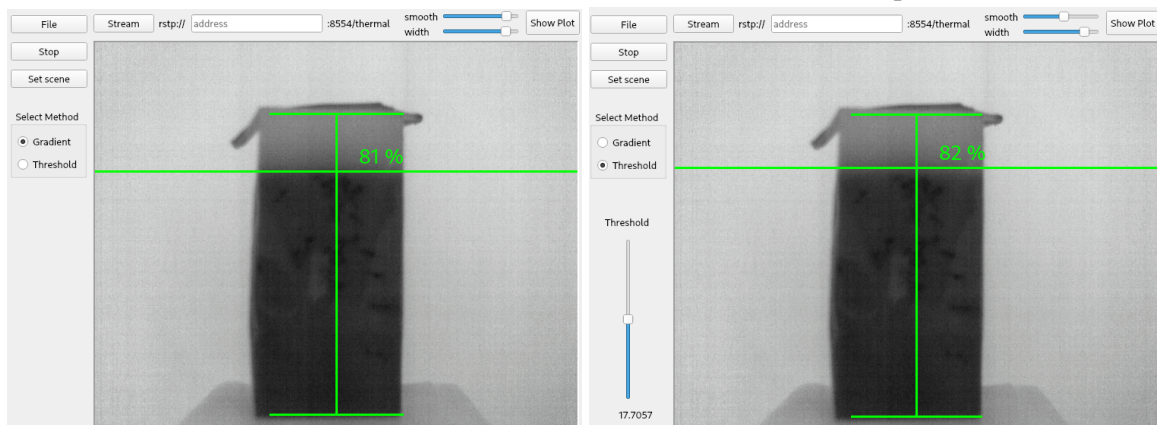
	Obal A	Obal B	Obal C	vzduch
Teplota	19 °C	19 °C	16 °C	24 °C

Tab. 1: Teploty při pokusu s obsahem o nižší teplotě než teplota okolí



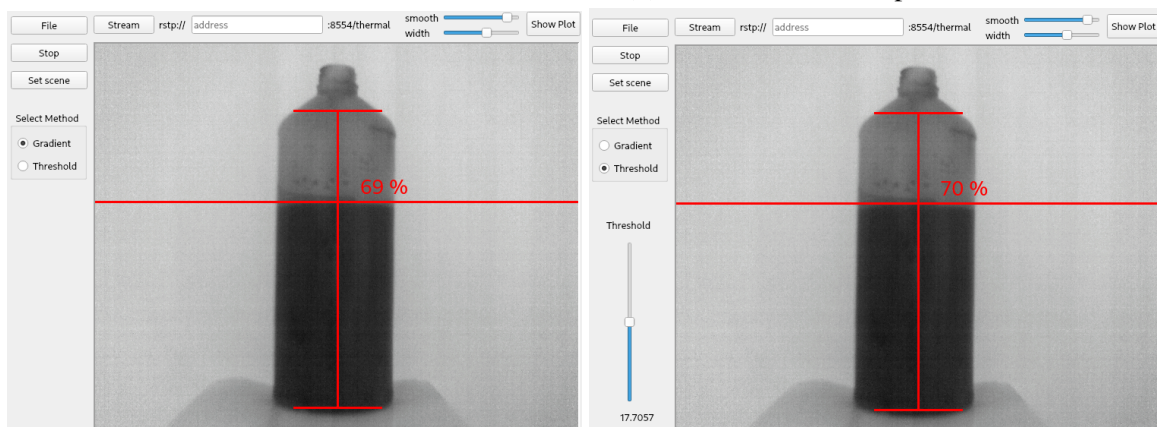
(a) Metoda gradientu aplikovaná na obal A

(b) Prahovací metoda aplikovaná na obal A



(c) Metoda gradientu aplikovaná na obal B

(d) Prahovací metoda aplikovaná na obal B



(e) Metoda gradientu aplikovaná na obal C

(f) Prahovací metoda aplikovaná na obal C

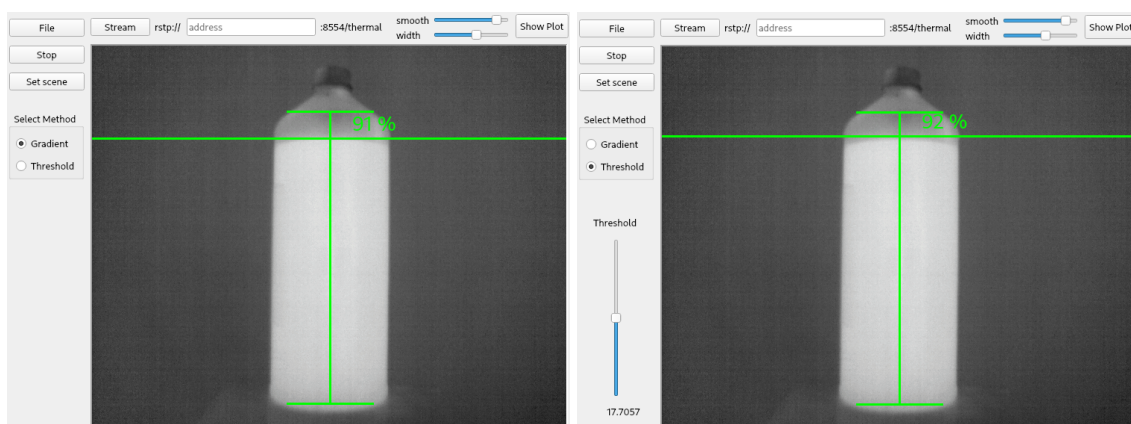
Obr. 17: Výsledky pokusu s obsahem o nižší teplotě než teplota okolí

5.2 Vyšší teplota

V případě testování s obsahem o teplotě vyšší než teplota okolí jsou výsledky prakticky stejné jako v předchozím případě, prahováním opět dostáváme mírně vyšší hodnotu. Opět je v případě určování gradientu potřeba dbát na správně nastavené hranice.

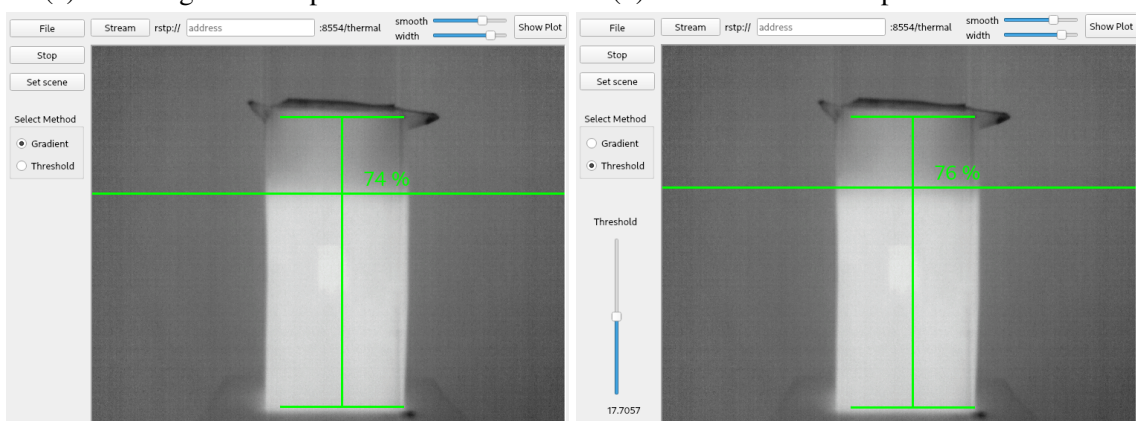
	Obal A	Obal B	Obal C	vzduch
Teplota	30,2 °C	29,9 °C	29 °C	24 °C

Tab. 2: Teploty při pokusu s obsahem o vyšší teplotě než teplota okolí



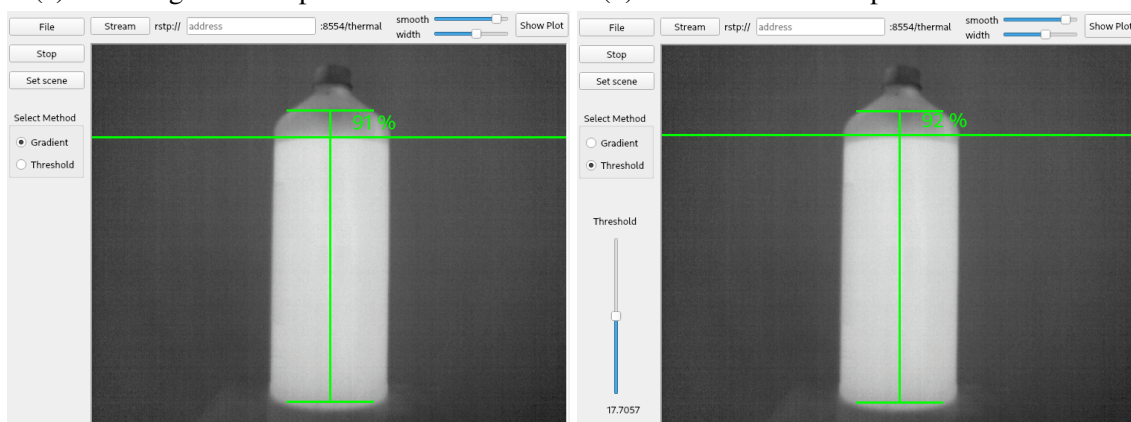
(a) Metoda gradientu aplikovaná na obal A

(b) Prahovací metoda aplikovaná na obal A



(c) Metoda gradientu aplikovaná na obal B

(d) Prahovací metoda aplikovaná na obal B



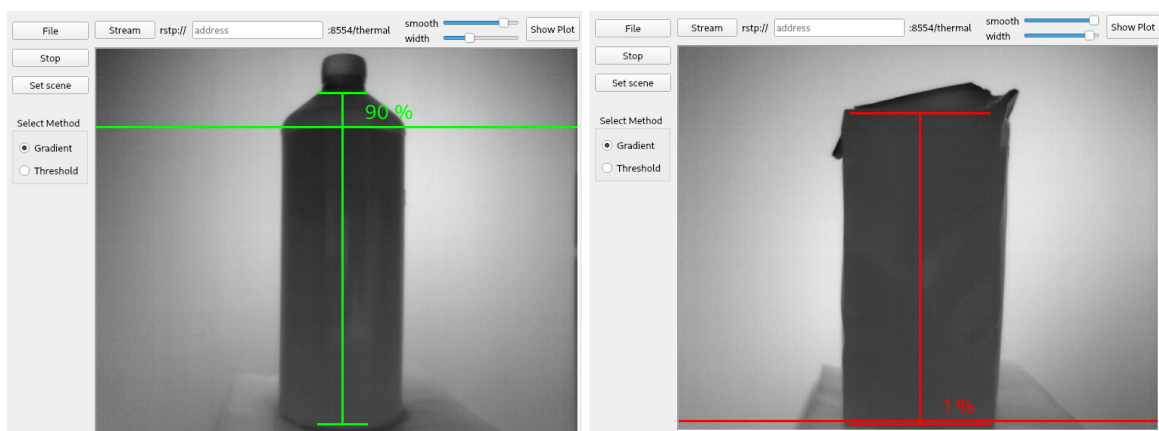
(e) Metoda gradientu aplikovaná na obal C

(f) Prahovací metoda aplikovaná na obal C

Obr. 18: Výsledky pokusu s obsahem o vyšší teplotě než teplota okolí

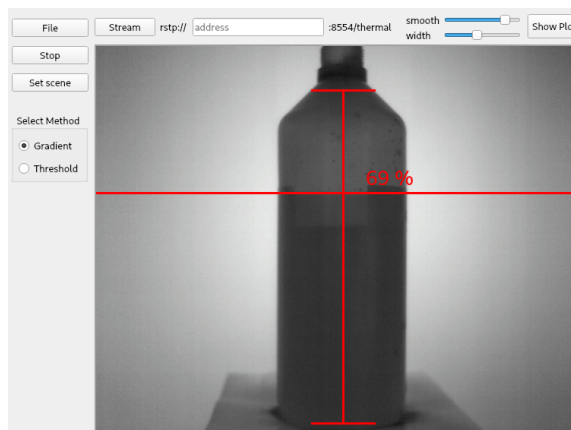
5.3 Ustálená teplota

Lahve jsem nechal ustálit na teplotu okolí, kdy už nebylo možné jednoznačně určit hladinu. Nejprve jsem se pokusil využít průsvitnosti obalu a prosvítit lahev ohřátou deskou v pozadí. Ta měla povrchovou teplotu přibližně o 5 °C teplejší než okolí. Očekával jsem, že HDPE obaly by měly být částečně průhledné a to se potvrdilo jak u průsvitné lahve A, tak i u tlustší neprůhledné lahve od lihu C, jak je vidět na Obr. 20a a 20c. Větší problém než u ostatních metod tu ale dělá etiketa, která oproti plastu záření nepropouští. Tetrapak blokuje záření v LWIR spektru, podobně jako většina ostatních běžně používaných materiálů na obaly včetně například PET. Obě metody určování fungovaly podobně jako v předchozích případech, ukazují pouze hledání maximálního gradientu.



(a) Obal A - HDPE lahev s vodou

(b) Obal B - Tetra Pak s vodou

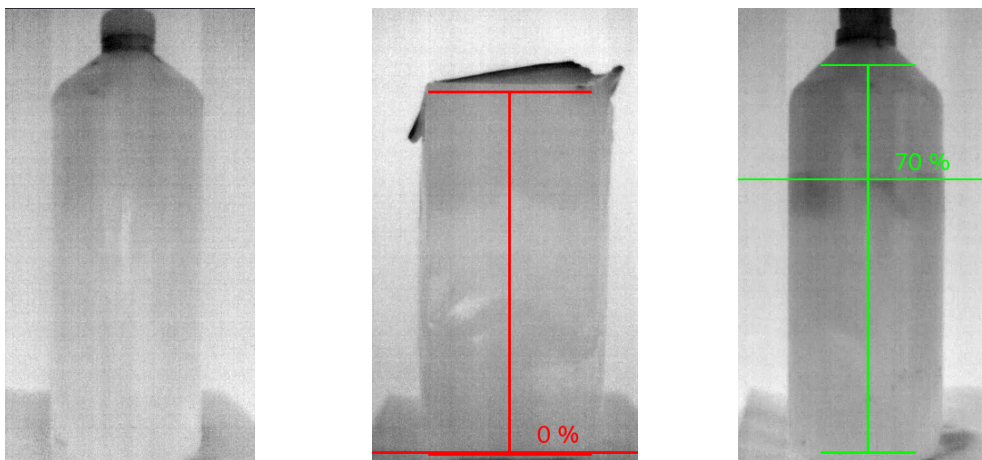


(c) Obal C - HDPE lahev s lihem. V tomto případě je chybně označen za hladinu okraj papírové etikety

Obr. 19: Výsledky při použití teplejšího pozadí

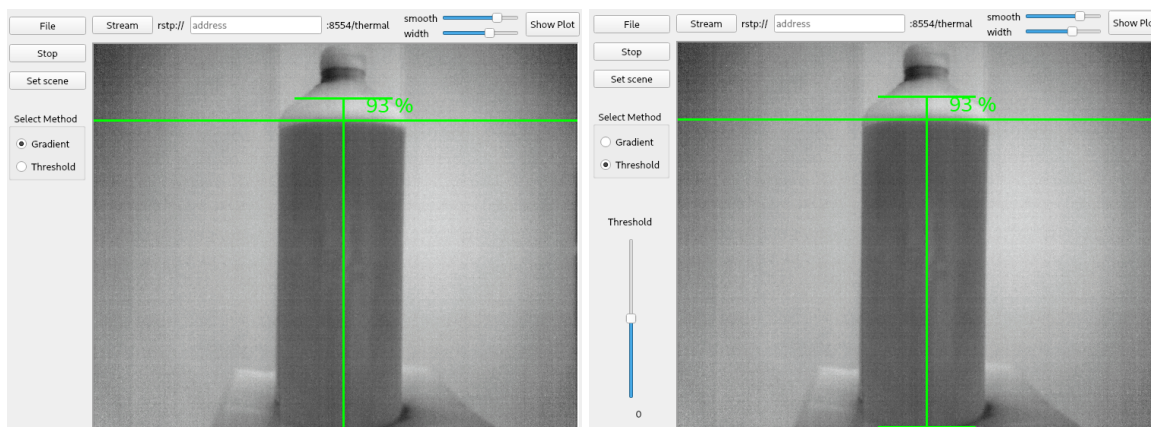
Jako druhý přístup k problému jsem použil fén, kterým jsem asi 2 vteřiny ohřál povrch lahve. To podle termogramu způsobilo ohřátí povrchu lahve v místě nesmáčeném kapalinou rozdíl asi 5 °C, kdežto ve smáčené části se její povrchová teplota nezměnila. Tato metoda funguje podstatně lépe než předchozí a mělo by ji být možné aplikovat na jakoukoli nádobu.

Obě metody detekování hladiny fungovaly s podobnou přesností, problém občas nastal, pokud nebyla lahev rovnoměrně ohřátá, prahovací metoda potom může dělat problém.

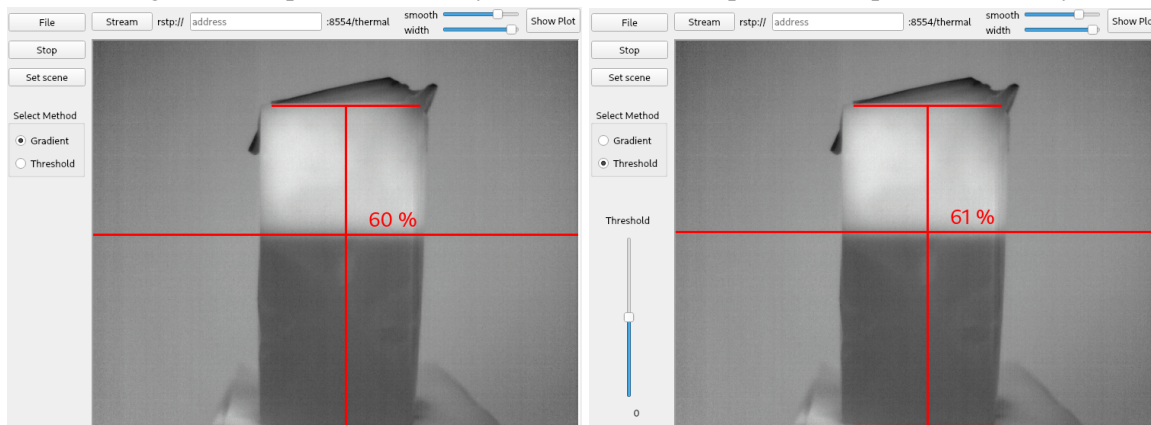


(a) Obal A - HDPE lahev s vodou (b) Obal B - Tetra Pak s vodou (c) Obal C - HDPE lahev s lihem. označený je okraj papírové etikety

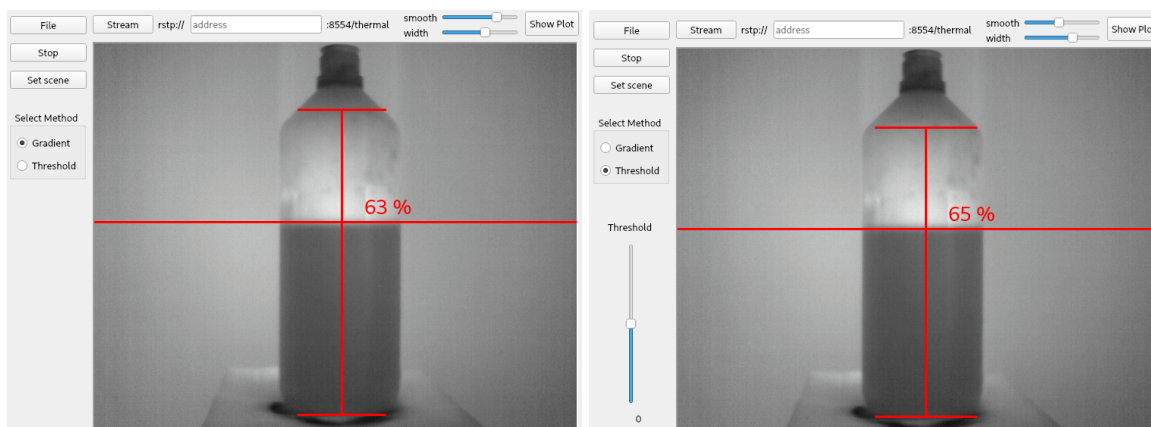
Obr. 20: Lahve při ustálené teplotě



(a) Metoda gradientu a povrchově ohřátý obal A (b) Metoda prahování a povrchově ohřátý obal A



(c) Metoda gradientu a povrchově ohřátý obal B (d) Metoda prahování a povrchově ohřátý obal B



(e) Metoda gradientu a povrchově ohřátý obal C (f) Metoda prahování a povrchově ohřátý obal C

Obr. 21: Výsledky při ohřátí povrchu horkým vzduchem

6 Využití v praxi

6.1 Existující řešení

O použití termokamer s tepelným senzorem ke kontrole naplnění jsem nenalezl žádné dostupné informace. Našel jsem ukázky jejich využití pouze pro monitoring hladiny uvnitř velkých průmyslových tanků a nádrží. [14] Praktické použití IR záření pro detekci hladiny existuje, ale využívá pouze dva senzory, kontrolující nedostatek nebo nadbytek kapaliny. Systém předpokládá, že kapalina IR záření absorbuje, zatímco lahev jej propustí. [13]

Schopnost nahlédnout do neprůhledných obalů často zmiňují články o SWIR kamerových systémech, například [16] nebo [3]. Použití kamer s chlazeným kvantovým detektorem v SWIR pásmu by mělo výhodu v tom, že plastové lahve bývají této části spektra průsvitné, jako je vidět na Obr. 22. Stejně tak je pro SWIR průsvitné i sklo. Nevýhodou je ale obecně vyšší pořizovací cena takovýchto kamer.



Obr. 22: Různé plastové lahve v SWIR spektru [3]

6.2 Návrh řešení

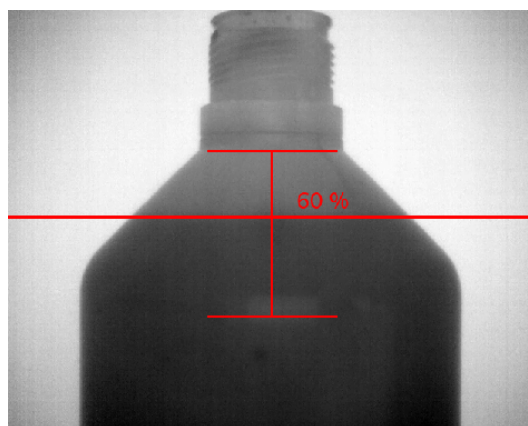
Pro praktickou aplikaci by bylo výhodnější místo snímání celé lahve zabírat kamerou pouze horní část, ve které předpokládáme, že se úroveň hladiny bude pohybovat, tak jako je na Obr. 23. To by zvýšilo přesnost, nebo umožnilo použití levnější kamery s nižším rozlišením. Zároveň by při použití objektivu s menším zorným úhlem docházelo k menší chybě vlivem perspektivy.

Vybuzení u ustálených nádob horkým vzduchem funguje překvapivě dobře a efekt zůstává ještě několik sekund po ohřátí. Toho by bylo vhodné využít a ohřívací stanoviště umístit v dostatečné vzdálenosti od kamery, aby nedocházelo k ohřívání měřicího pracoviště a pozadí za lahví, které by vytvářelo rušivé vlivy. V praktické aplikaci by se dalo také experimentovat s použitím zdroje tepla ve formě záblesků synchronizovaných s pořízením termografického snímku (*flash thermography*). Otázka je, jak silný by záblesk musel být, aby přístup fungoval. To jsem bohužel neměl možnost vyzkoušet.

Prozařování by mohlo také najít využití. Pravděpodobně by bylo potřebné použít silnější zářič, aby hladina vynikla lépe než při mém testování. Výhodou by bylo, že při prozařování by mělo mít menší vliv vedení tepla, jelikož zaznamenáváme přímo přítomnost kapaliny díky její absorpenci a ne teplotní jevy, které vyvolá. Ze mnou vyzkoušených obalů by ale byl tento přístup využitelný pouze pro polyethylenové.

Podobné kontrolní systémy, které pracují ve viditelném spektru, nabízí i možnost kontroly přítomnosti zátky, často podle její barvy. Implementovat tuto funkci do termografického systému měřicího systému by bylo složitější, bylo by potřeba aby zátka měla charakteristický tvar a muselo by být zaručeno, že nesplyne s pozadím.

Problém, který by mohl při reálné aplikaci nastat, vidím v tom, že pokud by byl systém použitý pro průběžnou kontrolu na dopravníkovém páse, kde by docházelo k otřesům, kapalina uvnitř by mohla omývat stěnu lahve, a měnit povrchovou teplotu i té části lahve, která by v klidu nebyla smáčená.



Obr. 23: Zaměření pouze na část lahve

7 Závěr

Na základě mé práce vidím potenciál v užití této metody v praxi. Pokud lze zaručit, že bude mít kapalina vždy dostatečně odlišnou teplotu oproti okolí, stačilo by k automatické kontrole naplnění použít v nejjednodušším případě pouze termokameru a vhodný software. Je ale potřeba dbát na to, aby nesmáčená část lahve byla ustálená na teplotu okolí. Přestože mají plastové obaly malou tepelnou kapacitu, pokud se nesmáčená část kapalinou ohřeje nebo ochladí, například při rozstříku při stáčení nebo nerovnoměrným pohybem po dopravníku, trvá několik sekund, než se opět dostane na teplotu okolí a je jasně vidět hladina. Z toho důvodu by bylo vhodné ohřev horkým vzduchem používat nejen pokud má kapalina teplotu okolí, ale i pokud je chladnější. Pokud je kapalina teplejší, bylo by potřeba ji naopak povrchově chladit, to by ale bylo technicky náročnější. Celé kontrolní stanoviště by mělo být odstíněné od rušivých zdrojů tepla.

Jak jsem zmiňoval, žádný případ využití termokamery k měření hladiny naplnění jsem nenašel. Zařízení nabízená k průběžné kontrole naplnění používají mimo viditelného spektra převážně gamma záření nebo rentgen. Oproti obojímu by řešení s termokamerou bylo jednodušší a možná i levnější, avšak konkrétní cenu těchto systémů jsem nenašel.

Rozdíl oproti nim je, že obě využívají zářič a detektor, který detekuje kapalinu díky její absorpenci. Přímo tedy zaznamenaná přítomnost kapaliny. Při tomto termografickém přístupu se detekuje změna teploty povrchu lahve, tedy až důsledek přítomnosti kapaliny.

Podmínkou pro přesné měření jsou tedy vhodné termofyzikální vlastnosti použitých lahví. Obaly z nejběžněji používaných materiálů jsem otestoval a krom HDPE a Tetra Paku, na které jsem se soustředil v praktické části, by bylo toto řešení funkční i při použití PET. Lze předpokládat, že i další plasty budou pro tuto metodu vhodné, díky jejich obecně nízké tepelné kapacitě, vodivosti a hmotnosti.

Mnou vytvořený software považuji pouze za potvrzení konceptu. Pro reálné nasazení by potřeboval upravit podle dané situace. Chybí v něm jakýkoliv záznam dat nebo možnost komunikace po průmyslových sítích. Nepřetržité vyhodnocování na živém přenosu z kamery by pro praktické využití bylo velmi nevhodné, mnohem lepší by bylo pracovat s jedním snímkem pro každou lahev, která se před kamerou objeví. Bohužel jsem ale nenašel vhodný způsob, jak načíst poslední pořízený snímek z kamery, která je ukládá na vnitřní paměť a přistupuji k nim po síti. Řešením by bylo přizpůsobení firmwaru kamery.

Krom toho mnou použitá termokamera Wiris Pro od společnosti Workswell s.r.o. fungovala velice dobře, poskytuje vysoké rozlišení a na termogramech je minimum šumu. Ještě větší rozsah měření a vyšší přesnost by bylo možné získat otočením kamery "na výšku", tato kamera k tomu ale není určena, neměl jsem tedy možnost ji v této poloze upevnit na stativ.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] DHAR, Nibir K., DAT Ravi, SOOD, Ashok K.. *Advances in Infrared Detector Array Technology, Optoelectronics - Advanced Materials and Devices*, S. Pyshkin. [online], 2013, DOI: 10.5772/51665. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/optoelectronics-advanced-materials-and-devices/advances-in-infrared-detector-array-technology>
- [2] DU K., LI Q., ZHANG W., YANG Y. and QIU M., *Wavelength and Thermal Distribution Selectable Microbolometers Based on Metamaterial Absorbers* [online]. IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 3, pp. 1-8, 2015, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2406763. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7047761/> [cit. 24.5.2020]
- [3] ETTENBERG, Martin H. MALCHOW, Douglas S., SENSORS UNLIMITED - UTC AEROSPACE. *SWIR Imaging: An Industrial Processing Tool* [online]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/SWIR_Imaging_An_Industrial_Processing_Tool/a25134 [cit. 24.5.2020]
- [4] FLIR. *12 Things To Consider Before Buying an Infrared Camera* [online]. Dostupné z: https://assets.omega.com/manuals/FLIR12_BOOKLET.pdf. [cit. 13.6.2011]
- [5] HOELTER T., KATHMAN A., RICHARDS A., WALTERS M. - FLIR Systems Inc., *Key Technology Trends and Emerging Applications for Compact Thermal Imagers*, AMA Conferences 2015, Nürnberg, Germany, ISBN: 978-3-9813484-8-4.
- [6] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [7] MALÁ, Zuzana, Danuše NOVÁKOVÁ a Rudolf NOVÁK. Fyzika II. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04365-3.
- [8] OTYEPKOVÁ, Eva. KVÍTEK, Libor. OTYEPKA, Michal. PANÁČEK, Aleš *Cvičení z vybraných fyzikálně-chemických metod* [online]. Katedra fyzikální chemie, 2004. Dostupné z: <https://fch.upol.cz/skripta/zfcm/index.html> [cit. 18.4.2020]
- [9] SOVA, Jan a KADLEC, Karel. *Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití*. [online] www.allforpower.cz, 23.4.2014 [cit. 17.12.2019]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [10] VOLLMER, Michael a MÖLLMANN Klaus-Peter. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim: Wiley, 2010. ISBN 9783527407170; 3527407170;.
- [11] ČSN ISO 18 434-1. Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [12] *Aktivní termografie a IRNDT* [online]. Plzeň: Nové technologie – výzkumné centrum Západočeská univerzita v Plzni, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://http.zcu.cz/cz/laboratore/irndt/aktivni-termografie>
- [13] Miho Inspektionssysteme. *Fill Level - How to Choose the Right Technology*. Ahnatal, Německo, 2020. [online] https://miho.de/wp-content/uploads/Presse/Fill%20Level_UK_Web.pdf [cit. 28.6.2020]
- [14] *IR – STORAGE TANKS* [online]. Maverick Inspection Ltd. Sherwood Park, Kanada, 2020. Dostupné z: <https://www.maverickinspection.com/services/infrared-thermography/sample-imagery/ir-storage-tanks/> [cit. 24.5.2020]
- [15] *Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste* [online] - Scientific Figure on ResearchGate. [cit. 18.4.2020] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/FT-IR-spectrum-of-the-PET-sample_fig1_320288961
- [16] *Short Wave Infrared Enhances Machine Vision* [online]. Quality magazine, 5.5.2013. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91011-short-wave-infrared-enhances-machine-vision> [cit. 24.5.2020]
- [17] *WIRIS Ethernet Stream SDK Programming Guide* [online]. Praha: Workswell s.r.o., 2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.drone-thermal-camera.com/wiris-ethernet-stream-sdk-programming-guide/>
- [18] *Workswell Wiris Pro(WWP) Data SDK* [online]. Praha: Workswell s.r.o., 2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.drone-thermal-camera.com/wirisdata/html/index.html/>
- [19] *Qt Wiki* [online]. Espoo: The Qt Company, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://wiki.qt.io/About_Qt

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1	Rozdělení EM spektra podle vlnových délek [10]	7
Obrázek 2	Propustnost atmosférou na povrchu Země v závislosti na vlnové délce [1]	7
Obrázek 3	Vyzařovací spektrum černého tělesa o různých teplotách [10]	8
Obrázek 4	Schéma rozkladu záření na rozhraní tělesa	9
Obrázek 5	Znázornění situace při měření termokamerou [9]	10
Obrázek 6	Výsledek IČ spektroskopie vzorku PET [15]	12
Obrázek 7	Ukázka základních barevných palet v programu FLIR Tools	14
Obrázek 8	Termogram HDPE lahve s obsahem teplejším než teplota okolí	15
Obrázek 9	Termogram HDPE lahve s obsahem o teplotě okolí povrchově ohřáté fénem	15
Obrázek 10	Výběr vhodných obalů	16
Obrázek 11	Možný průběh teploty, na kterém pak probíhá detekce.	20
Obrázek 12	Vývojový digram prahovací metody	22
Obrázek 13	Grafické rozhraní	23
Obrázek 14	Pracoviště	24
Obrázek 15	Použité obaly	25
Obrázek 16	Chyba v případě špatně nastavených mezí	25
Obrázek 17	Výsledky pokusu s obsahem o nižší teplotě než teplota okolí	26
Obrázek 18	Výsledky pokusu s obsahem o vyšší teplotě než teplota okolí	27
Obrázek 19	Výsledky při použití teplejšího pozadí	28
Obrázek 20	Lahve při ustálené teplotě	29
Obrázek 21	Výsledky při ohřátí povrchu horkým vzduchem	30
Obrázek 22	Různé plastové lahve v SWIR spektru [3]	30
Obrázek 23	Zaměření pouze na část lahve	31

Seznam tabulek

Tabulka 1	Teploty při pokusu s obsahem o nižší teplotě než teplota okolí	25
Tabulka 2	Teploty při pokusu s obsahem o vyšší teplotě než teplota okolí	27

Seznam použitého SW

- Flir Tools
- Qt Creator
- Workswell Core Player
- Workswell WIRIS Pro Data SDK
- Workswell WIRIS Stream SDK
- L^AT_EX

Seznam příloh

Všechny přílohy se nachází na přiloženém CD.

Příloha 1: Pořízené termogramy

Příloha 2: Zdrojové kódy

Příloha 3: Zkompilovaný program pro Linux