



Přírodovědecká  
fakulta  
Faculty  
of Science

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**  
**Přírodovědecká fakulta**

# **Návrh a realizace úloh do Fyzikálního praktika z mechaniky a termiky**

Diplomová práce

**Lenka Kadlecová**

Školitelka: Ing. Helena Poláková, PhD.

České Budějovice 2015

Sem dám zadávací protokol

## **Bibliografické údaje**

Kadlecová Lenka, 2015: Návrh a realizace úloh do Fyzikálního praktika z mechaniky a termiky. [Design and implementation of tasks in the physical practice of mechanics and thermodynamics, Mgr. Thesis, in Czech] – 81 p., Faculty of Science, the University of South Bohemia, České Budějovice, the Czech Republic

## **Anotace:**

Tato diplomová práce vznikla za účelem vytvořit návody na fyzikální pokusy, které budou využity při výuce předmětu Fyzikální praktikum z mechaniky a termiky v nových prostorách Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity. Práce nejen dokumentuje potřebnou teorii a samotný postup při měření, ale také popisuje, jak se na tato měření jednotlivé měřicí sady připravovaly a jaké byly problémy (a řešení) u jednotlivých úloh.

## **Annotation:**

This thesis was created to design instruction papers for the physical experiments, which will be used in the Physical practice of mechanics and thermodynamics in the new premises of the Faculty of Science of the University of the South Bohemia. The work not only documents the theoretical background and approach to measurement, but also describes how these individual experiment sets were prepared and what the problems (and solutions) for each task were.

## **Klíčová slova:**

fyzika, mechanika, termika, praktikum, fyzikální měření, protokol

## **Key words:**

Physics, Mechanics, Thermodynamics, Practicum, Physical measurements, Protocol

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

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

V Českých Budějovicích dne .....

podpis autorky



## **Poděkování**

Ráda bych na tomto místě poděkovala své školitelce Ing. Heleně Polákové, PhD., která mi v průběhu psaní diplomové práce věnovala o mnoho více času, než bylo její povinností, byla se mnou trpělivá a nikdy mi neodmítla pomoci.

Dále bych chtěla vyjádřit velkou vděčnost mému manželovi Jiřímu Kadleci za pomoc při hledání slov a podporu i v případech, kdy jsem odmítala fungovat v domácnosti. Poděkování patří i mému milému tchánovi, který mi pomohl s výrobou forem na led, a celé rodině.

## Obsah

---

Úvod .....	1
Úvod do problematiky .....	1
Cíle práce .....	2
1    Metody .....	3
1.1    Příprava experimentů.....	4
1.2    Proměření experimentů.....	4
1.3    Vytváření návodů .....	4
1.4    Měření se studenty .....	5
1.5    Opravování protokolů.....	5
2    Měření momentu setrvačnosti.....	7
2.1    Teoretický základ .....	7
2.2    Způsoby měření .....	8
2.3    Zakoupená sestava.....	9
2.3.1    Princip měření .....	9
2.3.2    Problémy měření .....	9
2.3.3    Aplikované úpravy měření.....	10
2.4    Návod .....	10
2.5    Kontrolní měření .....	15
2.6    Poznámky pro vyučujícího .....	16
3    Měření povrchového napětí kapalin.....	17
3.1    Teoretický základ .....	17
3.2    Způsoby měření .....	18
3.3    Zakoupená sestava.....	19
3.3.1    Princip měření .....	19
3.3.2    Problémy měření .....	20
3.3.3    Aplikované úpravy měření.....	20
3.4    Návod .....	22
3.5    Kontrolní měření .....	25
3.6    Poznámky pro vyučujícího .....	26
4    Měření dynamické viskozity.....	28
4.1    Teoretický základ .....	28
4.2    Způsoby měření .....	29
4.3    Zakoupená sestava.....	30
4.3.1    Princip měření .....	30
4.3.2    Problémy měření .....	30
4.3.3    Aplikované úpravy měření.....	31
4.4    Návod .....	31
	VI

4.5	Kontrolní měření .....	36
4.6	Poznámky pro vyučujícího .....	37
5	Ověření stavové rovnice ideálního plynu .....	38
5.1	Teoretický základ .....	38
5.2	Způsoby měření .....	39
5.3	Zakoupená sestava .....	41
5.3.1	Princip měření .....	41
5.3.2	Problémy měření .....	42
5.3.3	Aplikované úpravy měření .....	42
5.4	Návod .....	43
5.5	Kontrolní měření .....	48
5.6	Poznámky pro vyučujícího .....	50
6	Měření tepelné vodivosti pevných látek .....	51
6.1	Teoretický základ .....	51
6.2	Způsoby měření .....	52
6.3	Zakoupená sestava .....	52
6.3.1	Princip měření .....	52
6.3.2	Problémy měření .....	53
6.3.3	Aplikované úpravy měření .....	53
6.4	Návod .....	55
6.5	Kontrolní měření .....	66
6.6	Poznámky pro vyučujícího .....	66
7	Studium funkce solárního kolektoru .....	68
7.1	Teoretický základ .....	68
7.2	Způsoby měření .....	70
7.3	Zakoupená sestava .....	70
7.3.1	Princip měření .....	70
7.3.2	Problémy měření .....	71
7.3.3	Aplikované úpravy měření .....	71
7.4	Návod .....	71
7.5	Kontrolní měření .....	77
7.6	Poznámky pro vyučujícího .....	78
	Závěr .....	79
	Použitá literatura .....	80
	Přílohy .....	81

# Úvod

---

## Úvod do problematiky

---

Na konci roku 2013 byla v kampusu Jihočeské univerzity pro potřeby Přírodovědecké fakulty dostavěna budova s označením C, ve které byly vybudovány kanceláře, učebny a laboratoře pro chemické, biologické a fyzikální obory. Od začátku roku 2014 se laboratoře začaly plnit stávajícími a především nově nakoupenými přístroji a pomůckami, od letního semestru 2013/2014 začala probíhat v prostorách laboratoří výuka.

Ústav fyziky a biofyziky sídlí v druhém patře, kde se nachází několik výzkumných a několik výukových laboratoří. V laboratoři s označením F1 se v letním semestru vyučuje předmět Fyzikální praktikum I, neboli Fyzikální praktikum z mechaniky a termiky. Do tohoto praktika byly celkem nakoupeny přístroje a pomůcky pro dvanáct úloh.

Praktikum z fyziky je velmi důležitou součástí procesu pochopení látky, kterou student slyší na přednáškách a poté procvičuje na cvičeních. Práce v laboratoři studentům jednak vstřípí základní postupy a pravidla nutná pro měření experimentů, jednak prohloubí znalosti teoretické, jelikož je podloží osobním prožitkem z měření a hledání možných chyb.

Na téma Praktika z fyziky bylo sepsáno již několik publikací, z nichž uvádím a cituji především Základy fyzikálních měření od profesora J. Brože. Všechny publikace týkající se fyzikálních praktik jsou velmi dobře a přehledně zpracované a studenti by je měli ke svému vzdělávání užívat. Žádná literatura však neobsahuje takový výběr fyzikálních měření, který by mohl sloužit k ucelené výuce specifického vysokoškolského kurzu.

Tato diplomová práce bude sloužit studentům Fyzikálního praktika z mechaniky a termiky vyučovaném na Přírodovědecké fakultě, a to především jako hlavní zdroj přípravy na měření v tomto praktiku. Lze ji však použít též k zopakování teoretického učiva či doplnění nových znalostí, a to všem studentům fyziky.

V první části diplomové práce popisuji proces jejího vypracování. Především, jakým způsobem jsem si vybrala předkládané úlohy, jak jsem postupovala v přípravě návodů a proměrování úloh, jakých výsledků jsem dosáhla. Tato část také obsahuje poznatky, kterých jsem nabyla přímo při výuce daného předmětu.

Další část obsahuje šest kapitol, které postupně popisují šest vybraných měření. Každá kapitola obsahuje teoretický oddíl, praktický oddíl a návod s řešením. Poslední zmíněný oddíl zahrnuje návod a kontrolní řešení měření. Posledním oddílem každé kapitoly jsou poznámky pro vyučujícího, ve které jsou vypsány důležité body přípravy měření. Poznámky vycházejí z mých vlastních zkušeností, které jsem načerpala v průběhu podílení se na vyučování tohoto předmětu. Tato druhá část diplomové práce je doplněna názornými obrázky, schémata a tabulkami.

## Cíle práce

---

Cílem této diplomové práce je popsat základní znalosti a vědomosti potřebné pro měření a zpracování navržených úloh Fyzikálního praktika z mechaniky a termiky. Sestavit a proměřit navržené úlohy, vytvořit podrobný návod pro tvorbu a zpracování protokolů navržených úloh.

# 1 Metody

---

Fyzikální praktikum z mechaniky a termiky je předmět vyučovaný v letním semestru v nové budově C Přírodovědecké fakulty. Poprvé byl tento předmět vyučován v letním semestru 2013/2014. V tabulce 1.1 jsou vypsána všechna měření, která v tomto předmětu probíhají. Ve své práci jednotlivá měření označuji čísly kapitol, nikoli čísly z této tabulky.

Tabulka 1.1: Tabulka fyzikálních měření

Číslo měření	Název měření
1	Měření hustoty látek
2	Měření tuhosti pružin
3	Měření momentu setrvačnosti
4	Měření modulu pružnosti
5	Měření tíhového zrychlení
6	Ověření zákona zachování energie a hybnosti
7	Měření povrchového napětí kapalin
8	Měření dynamické viskozity
9	Ověření stavové rovnice ideálního plynu
10	Měření měrné tepelné kapacity kovů
11	Měření tepelné vodivosti
12	Studium funkce solárního kolektoru

Jednotlivá měření mají různou úroveň náročnosti či aktuálnosti. Podle toho jsem volila úlohy, které budu ve své práci popisovat.

Měření hustoty látek, Měření tuhosti pružin, Měření měrné tepelné kapacity kovů jsou úlohy známé a dobře popsané v literatuře, proto jsem se těmto úlohám nevěnovala.

Měření modulu pružnosti, Měření tíhového zrychlení, Ověření zákona zachování energie a hybnosti jsou úlohy, které jsem sestavila, proměřila a připravila pro ně návody, avšak nezahrnula jsem je v této práci.

Šest zbylých úloh (v tabulce zvýrazněny modrou barvou) je inovativních. Využívají nejnovější přístroje, propojení s počítačem, v literatuře se s nimi lze setkat pouze okrajově či vůbec. Tyto úlohy jsou popisovány na dalších stranách této diplomové práce.

Proces realizace práce jsem si rozdělila do několika kroků, podle toho, jak na sebe chronologicky navazují.

### 1.1 Příprava experimentů

---

Experimenty byly přivezeny po částech, jednotlivé součásti bylo proto nutno roztřídit a zkompletovat na daných pracovištích do celku. Se součástmi byly přivezeny i návody, často to však byly návody cizojazyčné – většinou v angličtině, němčině, v jednom případě i v italštině. Některé návody byly k dispozici pouze na webových stránkách společnosti Helago a LD Didactic.

### 1.2 Proměření experimentů

---

Druhým krokem bylo proměřit dané experimenty, aby bylo možné určit, v jakém rozsahu studenti budou s danými pomůckami pracovat (počet měření, rozsah měření, ...), a především, abych dané pomůcky vyzkoušela, osvojila si jejich ovládání a byla schopna sepsat detailní návody na práci s nimi. Tato část také zahrnovala naučit se pracovat se softwarem Cassy lab 2.

Proměření většiny experimentů bylo bezproblémové, stačilo proměřit všechny možné variace experimentu a určit, jak dlouho měření probíhalo. Podle času jsem také určila počet opakování měření. U všech experimentů jsem se snažila zvolit časovou náročnost 80 – 90 minut.

U experimentů Měření povrchového napětí kapalin, Ověřování stavové rovnice ideálního plynu a Měření tepelné vodivosti pevných látek došlo při proměřování k potížím. Jednalo se o nedostatky měřicí soupravy či nedostatky v postupech popisovaných dodanými návody. Tyto nedostatky a způsoby, jimiž jsem měření upravila, popisují v kapitolách věnovaných jednotlivým měřením.

### 1.3 Vytváření návodů

---

Po proměření všech pokusů jsem vytvořila podrobné návody. Každý návod obsahuje teorii, úkol, bezpečnostní pokyny, pomůcky a postup. Návody jsou součástí mé diplomové práce, naleznete je v podobě přílohy na vloženém CD na zadních deskách práce.

Jelikož dokumentace dodávané se zařízeními byly především cizojazyčné, musela jsem je nastudovat a vhodnou formou přeformulovat tak, aby byly použitelné pro české studenty. Zároveň jsem značnou část návodu doplnila poznatky, kterých jsem nabyla při proměřování

a které nebyly v původních návodech obsažené. Často se jednalo o způsoby propojení a společné užívání více přístrojů najednou.

Návody jsem doplnila o vlastní fotografie, schémata vytvářená v programu Malování, připravené tabulky a popis požadovaného výstupu měření.

Návody jsem vytvářela v programu Microsoft Word, studentům byly návody zpřístupněny v elektronické podobě. Zároveň jsem jednu kopii vytiskla a přiložila k sadě na měření experimentu přímo na pracovišti v laboratoři.

#### 1.4 Měření se studenty

---

Studenti přicházeli do hodiny připraveni, předem prostudovali návody a věděli jaké úlohy a jak budou měřit.

V průběhu hodin jsem vyzorovala, že studenti jsou při měřeních pomalejší, než jsem očekávala, proto jsem některé úlohy zkrátila. Šlo především o zmenšení počtu opakování měření hodnot či o úplné vynechání měření nějaké závislosti.

Díky přímé odezvě studentů jsem opravila překlepy a jiné nedostatky návodů. Z nepřímé odezvy, tedy vlastního pozorování, jsem dospěla k tomu, že v některých případech musím daný návod rozepsat do více kroků, připravit návod ještě více dopodrobna. To se týká hlavně návodu k Měření tepelné vodivosti pevných látek, kde je potřeba nastavovat a ovládat také software. Oproti tomu jsem mohla u některých návodů pokyny zestručnit, jelikož bylo vidět, že studenti intuitivně pochopili postup měření, což je případ Měření momentu setrvačnosti a Měření povrchového napětí kapalin.

Práce se studenty v rámci vyučování mi byla velkým přínosem. Návody jsem mohla upravit přesně pro potřebu studentů Fyzikálního praktika z mechaniky a termiky tak, aby byly studentům přínosné a ve vyučování nanejvýš efektivní.

#### 1.5 Opravování protokolů

---

Po každém měření mi studenti zasílali emailem své protokoly a já jim červeným písmem opravovala chyby. Přibližně jsem jeden protokol opravila dvakrát předtím, než jsem jej uznala za vhodný odeslat vyučující, tedy paní doktorce Polákové.

Z oprav, které jsem musela činit, bylo zřejmé, že studenti mají problém s vytvářením odborných textů. Sestavila jsem jim proto dokument se stručnými poučkami, které se



zaměřovaly na nejčastější chyby studentů, podle něžž bylo možné sepsat protokoly na lepší úrovni. Tento dokument naleznete pod názvem Metodika protokolů v příloze. Bohužel se ale studenti i s přístupem k tomuto dokumentu nedokázali vyvarovat všem chybám podstatným v odborném textu.

Z pohledu fyzikálního studenti naměřili hodnoty s přípustně velkými chybami. Chyby měření úspěšně spočítali a zahrnuli do dalších výpočtů či grafů. V diskuzi někteří velmi dobře diskutovali důvod vzniku chyb a navrhovali způsoby, kterými by se těmto chybám dalo vyhnout.

## 2 Měření momentu setrvačnosti

### 2.1 Teoretický základ

Moment setrvačnosti  $J$  je fyzikální veličina, která popisuje míru setrvačnosti otáčejícího se tělesa. Její velikost závisí na rozložení hmoty v tělese a umístění osy otáčení.

Moment setrvačnosti soustavy lze určit jako součet momentů setrvačnosti jednotlivých segmentů podle vzorce

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots + m_n r_n^2 = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (2.1)$$

kde  $m$  je hmotnost daného segmentu a  $r$  je vzdálenost těžiště segmentu od osy otáčení.

Tabulka 2.1: Momenty setrvačnosti homogenních těles používaných v tomto měření.  $M$  značí hmotnost daného tělesa. [1]

Těleso	Moment setrvačnosti	
	Poloha osy otáčení	Velikost
Kruhová deska	jako geometrická osa desky	$\frac{1}{2}MR^2$
Tyč délky $l$	kolmá k délce tyče	$\frac{1}{12}Ml^2$
Dutý válec vnějšího poloměru $R_1$ , vnitřního poloměru $R_2$ a výšky $h$	kolmá ke geometrické ose válce	$\frac{1}{12}M \left( R_1^2 + R_2^2 + \frac{h^2}{3} \right)$

V případě spojitého rozložení hmoty a homogenity tělesa (hustota  $\rho$  je konstantní) lze použít vztah

$$J = \rho \int_V r^2 dV. \quad (2.2)$$

Moment setrvačnosti tělesa vzhledem k jiné než geometrické ose otáčení (osa neprochází těžištěm) lze určit pomocí Steinerovy věty jako součet momentu setrvačnosti vzhledem k rovnoběžné ose procházející těžištěm a součinu celkové hmotnosti a čtverce vzdálenosti od těžiště, tzn.

$$J = J_0 + mr_T^2. \quad (2.3)$$

Pro výpočet momentu setrvačnosti lze též, podobně jako u Newtonovo zákona síly, použít vztah obsahující točivý moment  $M$ , který působí na tuhé těleso s momentem setrvačnosti  $J$  tak, že se těleso otáčí s úhlovým zrychlením  $\alpha$

$$M = J \cdot \alpha. \quad (2.4)$$

Pokud je působení točivého momentu  $M$  konstantní v čase, můžeme spočítat úhel otočení  $\varphi$  v čase  $t$  od startu

$$\varphi = \frac{1}{2} \alpha t^2. \quad (2.5)$$

a z tohoto vztahu poté vyjádřit úhlové zrychlení  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{2\varphi}{t^2}. \quad (2.6)$$

Točivý moment  $M$  získáme vynásobením hmotnosti urychlovací hmoty  $m_M$  (urychlené gravitační konstantou  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ) působící ve vzdálenosti  $r_M$  od osy otáčení tělesa:

$$M = r_M m_M g. \quad (2.7)$$

## 2.2 Způsoby měření

---

Moment setrvačnosti daného tělesa lze zjistit několika postupy. Patří mezi ně: metoda definiční, metoda torzních kmitů a metoda otáčení tuhého tělesa kolem pevné osy [1][2][4].

První metoda se také označuje jako metoda výpočtem. Těleso se rozdělí na několik homogenních částí, ze znalosti hmotností a pozic těchto částí pak aplikací vzorce 2.1 lze vypočítat moment setrvačnosti. Na čím větší počet homogenních částí těleso rozdělíme, tím přesnější výpočet získáme.

Ve druhé metodě je těleso připevněno k tenkému nejlépe ocelovému drátu v některém bodu osy, vůči níž chceme moment setrvačnosti stanovit. Z doby kmitu kolem osy a výpočtu tzv. direkčního momentu vlákna pak lze dopočítat moment setrvačnosti. Častěji se však v této metodě využívá srovnání doby kmitu tělesa o známém momentu setrvačnosti a doby kmitu tělesa, jehož moment setrvačnosti chceme zjistit.

Pro studium otáčivého pohybu tělesa, na které působí stálý moment síly, se používá zařízení s kladkou otočné kolem pevné osy. Na kladce je navinuto vlákno se závažím, které urychluje otáčivý pohyb zařízení. Na popsáném zařízení lze sledovat závislost úhlového zrychlení na momentu setrvačnosti celého zařízení, na poloměru kladky a na hmotnosti závaží.

## 2.3 Zakoupená sestava

---

Do laboratoře byla zakoupena vzduchová sestava od firmy Helago (výrobce 3B). Obrázek 2.1 převzatý z originálního návodu zobrazuje danou sestavu.

### 2.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje položky vyjmenované na obrázku 2.1.

Postup měření experimentu je následující. Po kalibraci se na jednotku se vzduchovým ložiskem položí rotační kotouč. Ke kotouči je nití vedenou přes kladku připevněno urychlovací závaží, které kotouč bude roztáčet. Kotouč se vychýlí o požadovaný úhel a zachytí jednotkou pro spuštění. Po uvolnění jednotky začne čítač měřit čas, kotouč se působením urychlovacího závaží začne na vzduchovém polštáři otáčet. Jakmile laserový senzor zachytí pohyb příčky, která je umístěna nad hodnotou  $0^\circ$ , čítač se vypne. Odečte se hodnota naměřeného času pro daný úhel, dané urychlovací závaží a danou soustavu.

Postup se opakuje pro různé hodnoty urychlovacího závaží, různou soustavu či různý úhel vychýlení kotouče.

Údaje o času se spolu se vstupními údaji použijí pro výpočet momentu setrvačnosti podle vzorců uvedených v Teoretickém základu 2.1.

### 2.3.2 Problémy měření

---

Při sestavování a proměřování jsem narazila na jeden funkční a jeden faktický problém.

Za prvé, při měření pokusu s přídatnými závažími o udávané hmotnosti 50 g, kdy se získávají hodnoty času otočení soustavy o  $90^\circ$  pro různé nastavení vzdáleností závaží od středu otáčení, není možné získat hodnoty, pokud závaží umístíme do vzdálenosti 90 mm od středu otáčení. V této vzdálenosti se totiž nachází spouštěcí mechanismus a závaží kvůli svým rozměrům o tento mechanismus zavadí a zastaví se.

Za druhé, originálními návody udávané hodnoty hmotností závaží se liší od reálných hodnot až o půl gramu.

### 2.3.3 Aplikované úpravy měření

---

První problém jsem vyřešila tak, že jsem v návodech uvedla, aby studenti pro vzdálenost 90 mm experiment neměřili. Studenti získají i bez toho měření dostatek dat, ze kterých je zřetelné, že závislost momentu setrvačnosti na vzdálenosti přídatných závaží je kvadratická.

Dále jsem uvedla, že je nutné si závaží několikrát převážít a spočítat chybu vážení. Studenti si tak procvičí nejen správný postup při vážení přesnými digitálními vahami, ale také způsob, kterým započítávat chybu vážení do celkového výpočtu.

Bylo také nutné si nastudovat základní principy částí soupravy. Dále jsem prostudovala návod k čítači, naučila se ovládat nastavení přístroje, které jsem pečlivě popsala v návodu tak, aby studenti během měření přesně věděli jak s čítačem zacházet.

## 2.4 Návod

---

### Úkol:

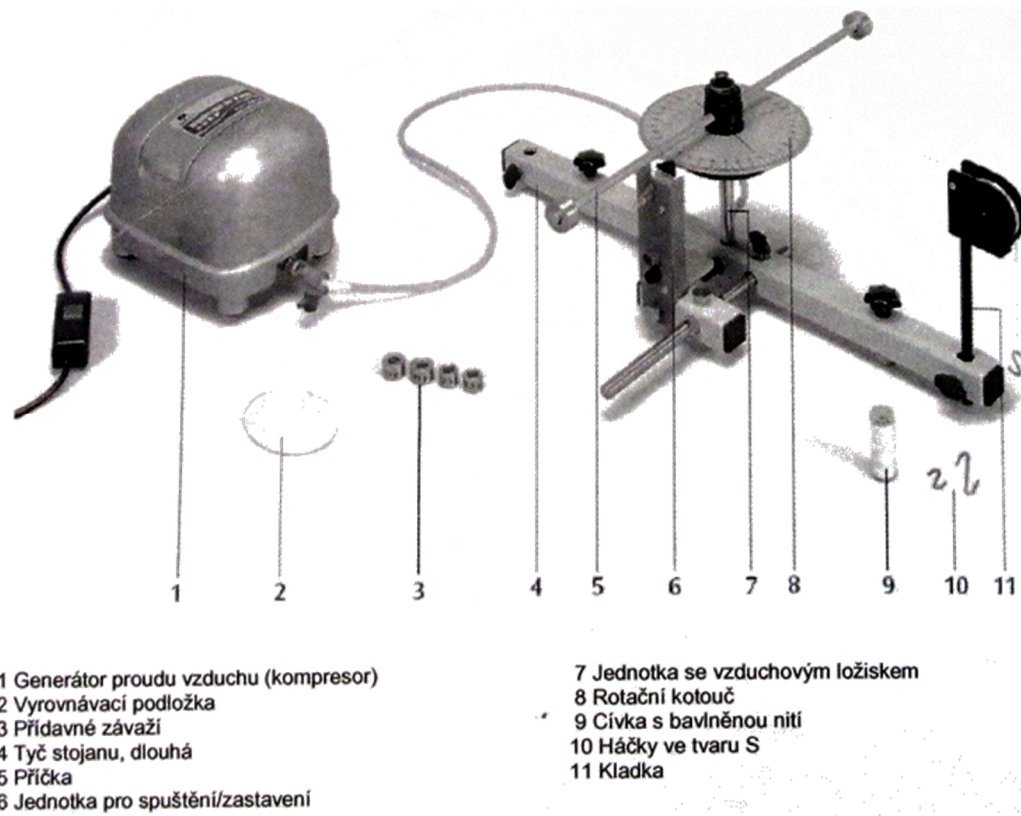
1. Určete moment setrvačnosti různých těles pomocí urychlovací hmoty. Vytvořte graf momentu setrvačnosti jako funkce přídatného závaží a jako funkce vzdálenosti přídatných hmot od osy otáčení.

### **Bezpečnostní pokyny:**

- Chraňte rotační kotouč a vzduchové ložisko před mechanickým poškozením.
- Chraňte systém před vniknutím nečistot, prachu a kapalin.
- Nedívejte se do laserového paprsku.

### **Pomůcky:**

sestava na měření momentu setrvačnosti (generátor vzduchového proudu, stojan, spouštěcí mechanismus, laserový senzor, disk, přídatné rameno), bavlněná nit, urychlovací závaží tvaru háčku, sada závaží (2·12,3 g, 2·24,5 g, 2·49,7 g) tvaru dutých válců



Obrázek 2.1: Sestava na měření momentu setrvačnosti

### Postup:

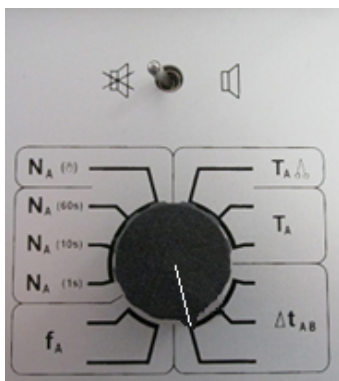
- 1) Zkontrolujte sestavu podle obrázku 2.1. Ujistěte se, že máte všechny díly. Dále zkontrolujte, že máte ke stojanu připojený laserový senzor.
- 2) Na čítači zkontrolujte zapojení podle obrázku 2.2 – jednotka pro spuštění musí být zapojena do vstupu IN START/COUNT a laserový senzor musí být zapojen do zdířky B.



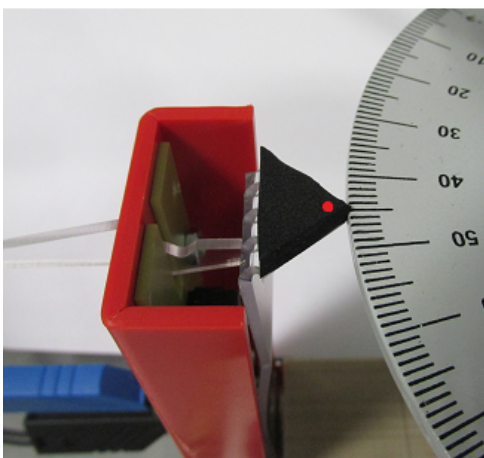
Obrázek 2.2: Zapojení čítače při měření

- 3) Zapněte elektrický proud – na čítači se zobrazí nuly – zvolte nastavení pro měření rozdílu časů AB s přesností na milisekundy (obrázek 2.3), dále se rozsvítí laserový senzor – nastavte na něm měření na velkou vzdálenost (obrázek 2.5) a ujistěte se,

že laserový paprsek ukazuje přesně na špičku černé pěnové části jednotky pro spuštění (obrázek 2.4).



Obrázek 2.3: Nastavení čítače pro měření rozdílů časů AB

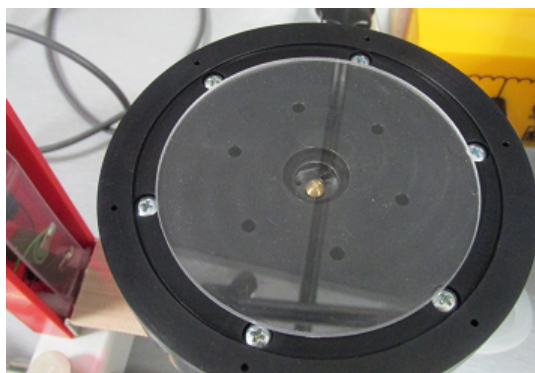


Obrázek 2.4: Pozice laserového paprsku při měření



Obrázek 2.5: Nastavení laserového snímače

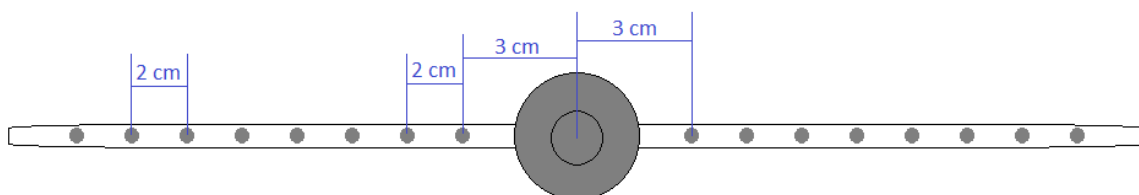
- 4) Na jednotku se vzduchovým ložiskem položte vyrovnávací podložku (průhledná kruhová plastová destička o poloměru cca 7 cm), generátor proudu vzduchu zapněte přepnutím vypínače do polohy I a vyrovnejte stojan tak, aby se vyrovnávací podložka co nejlépe vycentrovala (obrázek 2.6). Poté generátor vypněte.



Obrázek 2.6: Vycentrováná vyrovnávací podložka

- 5) Sejměte vyrovnávací podložku a místo ní vložte rotační kotouč s příčkou a s připevněnou kladkou, na níž je navinuta bavlněná nit. Nit provlékněte druhou kladkou na stojanu a na její konec upevněte urychlovací závaží o hmotnosti 2 g (větší háček). Hmotnost ověřte a případnou jinou hodnotu zapište. Urychlovací závaží nesmí viset nad deskou stolu. Ubezpečte se, že je závaží zavěšeno až za hranou stolu.
- 6) Nastavení vzdálenosti přídatných závaží: Na obrázku 2.7 jsou znázorněny vzdálenosti dírek na příčce, první dírky jsou od osy otáčení vzdálené 3 cm, poté je rozestup dírek vždy 2 cm.





Obrázek 2.7: Rozložení dírek na příčce

- 7) Nastavení přídavných závaží: Hmotnosti udané v tabulce 2.2 a 2.3 jsou pouze orientační, proto závaží převažte a vámi naměřenou hmotnost zapište a použijte ve výpočtech. Na každé rameno příčky navlékněte jedno ze dvou shodných válcovitých závaží. Obě závaží musí být stejně daleko od středu otáčení.
- 8) Nastavení úhlu: Uvolněte jednotku pro spuštění, natočte kotouč o požadovaný úhel, a poté upevněte jednotku pro spuštění (dále jednotka).
- 9) Nastavte dané parametry podle druhu měření. Parametry pro měření naleznete v tabulkách 2.2 a 2.3. Povšimněte si, že v druhé části měření nebudete u vzdálenosti přídavných závaží nastavovat hodnotu 90 mm.
- 10) Při práci s jednotkou se automaticky spustil čítač. Ten zastavte a vynulujte (RESET). Čítač budete nulovat před každým měřením.
- 11) Spusťte experiment uvolněním jednotky (zkontrolujte, zda se vám spustil čítač). Jakmile projede příčka se závažím pod laserovým senzorem, ukončí se čítání. Zapište výslednou časovou hodnotu do předpřipravené tabulky 2.4. Pro každé nastavení opakujte měření třikrát.
- 12) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data, výpočty a dva grafy (závislost momentu setrvačnosti  $J$  na hmotnosti přídavného závaží  $m_J$ , a na vzdálenosti přídavného závaží  $r_J$ ).
- 13) Na závěr shrňte výsledky svého snažení a diskutujte chyby měření.

Tabulka 2.2: Doporučené parametry pro měření první části úkolu

Moment setrvačnosti jako funkce přídavného závaží	
Úhel otáčení	$\varphi = 90^\circ$
Urychlovací hmota	$m_M \doteq 2 \text{ g}$
Poloměr vícenásobné kladky	$r_M = 10 \text{ mm}$
Vzdálenost přídavných závaží	$r_J = 150 \text{ mm}$
Hmotnost přídavných závaží	$m_J \doteq 0 \text{ g}, 12,5 \text{ g}, 25 \text{ g}, 50 \text{ g}$



Tabulka 2.3: Doporučené parametry pro měření druhé části úkolu

Moment setrvačnosti jako funkce vzdálenosti přídavného závaží od osy otáčení	
Úhel otáčení	$\varphi = 90^\circ$
Urychlovací hmota	$m_M \doteq 2 \text{ g}$
Poloměr vícenásobné kladky	$r_M = 10 \text{ mm}$
Vzdálenost přídavných závaží	$r_j = 30 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 70 \text{ mm}, 110 \text{ mm}, \dots$
Hmotnost přídavných závaží	$m_j \doteq 50 \text{ g}$

Tabulka 2.4: Tabulka pro záznam výsledků měření

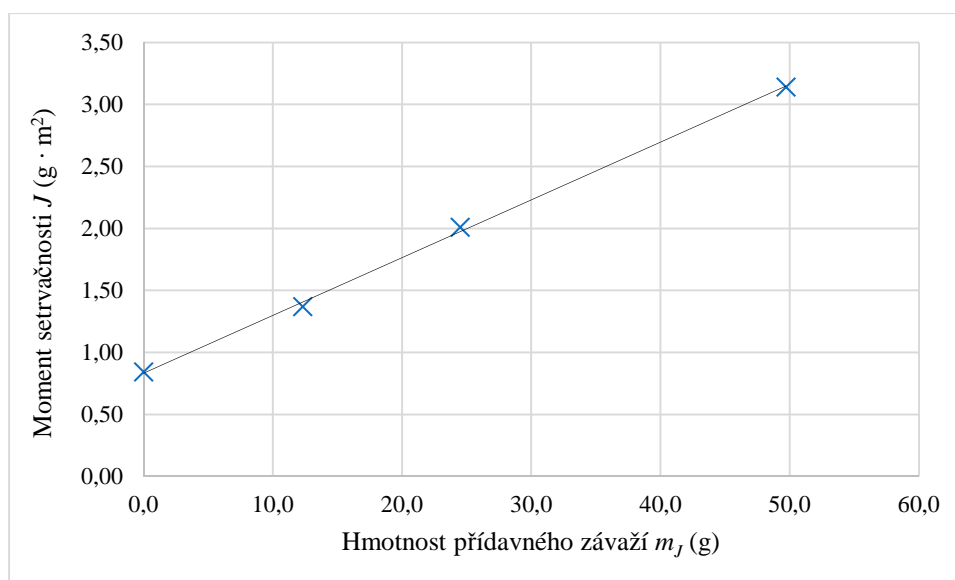
První část měření				
Hmotnost přídavného závaží $m_j$ (g)	Čas $t_1$ (ms)	Čas $t_2$ (ms)	Čas $t_3$ (ms)	Průměrný čas $t$ (ms)
0				
Druhá část měření				
Vzdálenost přídavného závaží od osy otáčení $r_j$ (mm)	Čas $t_1$ (ms)	Čas $t_2$ (ms)	Čas $t_3$ (ms)	Průměrný čas $t$ (ms)
30				
50				
70				
110				
130				
150				
170				

## 2.5 Kontrolní měření

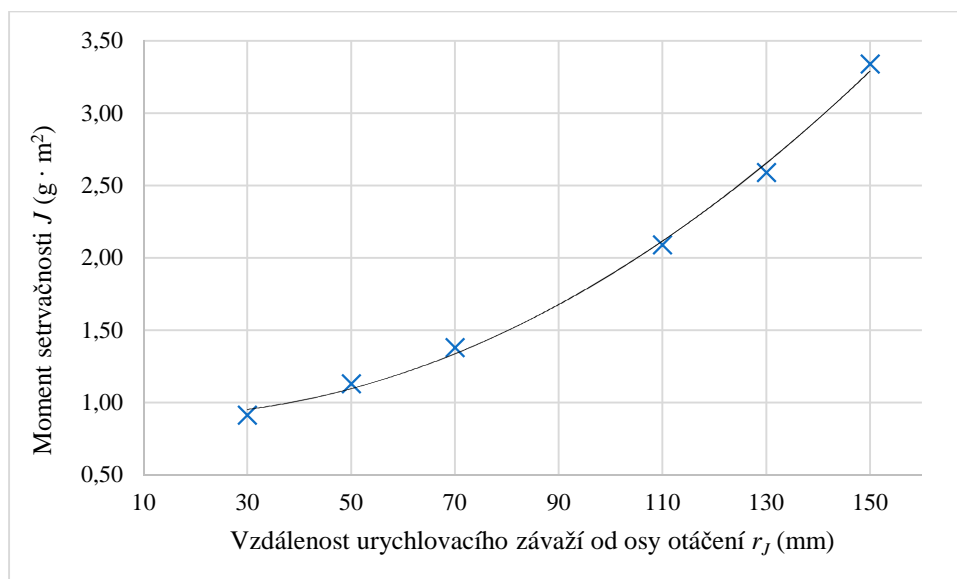
Tabulka 2.5: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

První část měření					
Hmotnost přídavného závaží $m_j$ (g)	Čas $t_1$ (ms)	Čas $t_2$ (ms)	Čas $t_3$ (ms)	Průměrný čas $t$ (ms)	Moment setrvačnosti $J$ (kg·m <sup>2</sup> )
0,0	3684	3694	3645	3674 ± 10	$(8,42 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
12,3	4698	4489	4889	4692 ± 77	$(1,37 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$
24,5	5462	5867	5667	5665 ± 78	$(2,01 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$
49,7	7161	7014	7112	7095 ± 29	$(3,14 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$
Druhá část měření					
Vzdálenost přídavného závaží od osy otáčení $r_j$ (mm)	Čas $t_1$ (ms)	Čas $t_2$ (ms)	Čas $t_3$ (ms)	Průměrný čas $t$ (ms)	Moment setrvačnosti $J$ (kg·m <sup>2</sup> )
30	3927	3967	3578	3824 ± 82	$(9,12 \pm 0,39) \cdot 10^{-4}$
50	4277	4227	4277	4260 ± 11	$(1,13 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$
70	4707	4686	4698	4697 ± 4	$(1,38 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$
110	5899	5782	5666	5782 ± 45	$(2,09 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$
130	6485	6645	6205	6445 ± 86	$(2,59 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$
150	7311	7185	7467	7321 ± 54	$(3,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$

Graf 2.1: Závislost momentu setrvačnosti  $J$  na hmotnosti urychlovacího závaží  $m_j$



Graf 2.2: Závislost momentu setrvačnosti  $J$  na vzdálenosti přídavného závaží  $r_j$  od osy otáčení



## 2.6 Poznámky pro vyučujícího

Před započítáním měření zkontrolujte, že nit je na kladce navinuta proti směru hodinových ručiček, aby při svém odvíjení roztáčela kotouč ve směru zmenšujících se čísel označení stupnice úhlu.

Při kalibrování sestavy do vodorovné polohy nelze v podmínkách učebny (narážení do stolů, proudění vzduchu, nepřesnost studentů) destičku zarovnat zcela na střed. Je proto vhodné po chvíli kalibrování studenty informovat, že přibližné vyrovnaní postačuje, a pobídnout je k dalšímu kroku měření.

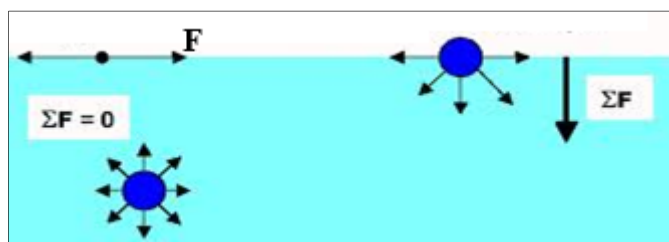
Jednotka pro spuštění občas nespustí čítač. Toto je způsobeno špatným zacházením. Spuštění jednotky by nemělo být příliš prudké a ani příliš pomalé. Je vhodné studentům ukázat jakou silou a jakou prudkostí s jednotkou zacházet.

### 3 Měření povrchového napětí kapalin

#### 3.1 Teoretický základ

Povrchové napětí je definováno jako síla působící v povrchu kapaliny kolmo na jednotku délky (obrázek 3.1). Máme-li v povrchu kapaliny úsečku délky  $l$ , působí na ni z obou stran kolmo síla  $F$  a pro povrchové napětí  $\sigma$  dostáváme vztah

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (3.1)$$



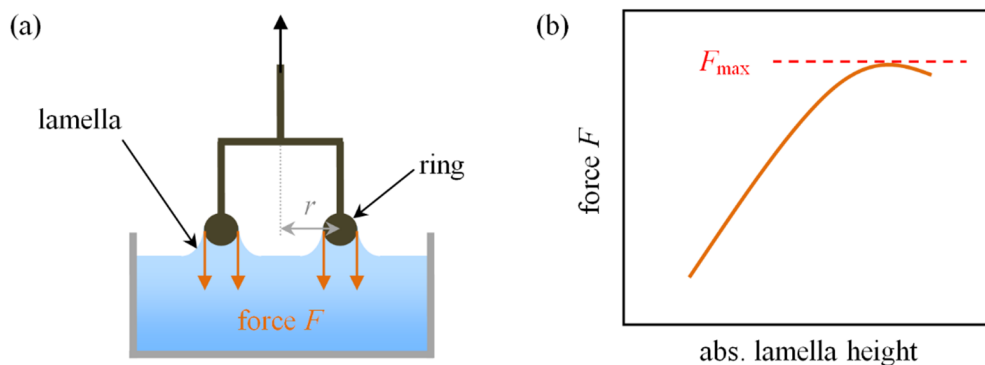
Obrázek 3.1: Silové působení pro molekuly uvnitř a na povrchu kapaliny

Povrchové napětí lze měřit například pomocí odtrhávací metody. Používá se k tomu hliníkový kroužek s ostrou hranou, který je zavěšen na hák siloměru. Vytahuje-li se kroužek o poloměru  $r$  z kapaliny, ulpívá na něm povrchová blanka kapaliny, která drží kroužek silou

$$2F = 2\sigma \cdot 2\pi r. \quad (3.2)$$

Jednoduchý vztah platí, je-li kroužek dostatečně tenký, aby ho bylo možné celý zdvihnout nad hladinu okolní kapaliny, aniž by se povrchová blanka přetrhla. Dokud je síla  $P$ , kterou působíme na kroužek při zdvihání, menší než síla  $2F$ , neopustí drátek kapalinu. Jakmile  $P$  překročí hodnotu  $2F$ , drátek se od kapaliny odtrhne (viz obrázek 3.2 (b)). Změříme-li sílu  $P_0$  v okamžiku odtržení, zjistíme hodnotu povrchového napětí  $\sigma$ . Síla  $P_0$  je v tomto případě rovna síle  $2F$  a pro povrchové napětí  $\sigma$  dostaneme z výrazu vztah

$$\sigma = \frac{P_0}{4\pi r}. \quad (3.3)$$



Obrázek 3.2: Schéma principu odtrhávací metody, graf závislosti hodnoty odtrhávací síly na výšce hladiny

Při měření se nejprve zvedne hladina kapaliny tak, že bude kroužek celý ponořený pod hladinu (nesmí se však dotýkat nádoby), odečte se síla na siloměru  $P_1$ . Poté se plynule snižuje hladina, síla na siloměru stále stoupá a v okamžiku odtržení kroužku od kapaliny se odečte ze siloměru příslušná síla  $P_2$ . Velikost síly  $P_0$  potřebné k překonání povrchového napětí je potom

$$P_0 = P_2 - P_1. \quad (3.4)$$

Dosadíme-li  $P_0$  z rovnice 3.4 do rovnice 3.3, získáme hledanou hodnotu povrchového napětí  $\sigma$ .

### 3.2 Způsoby měření

Povrchové napětí lze měřit čtyřmi různými metodami. Jsou jimi: měření pomocí kapilární elevace, měření pomocí kapkové metody, měření pomocí odtrhávací metody a měření pomocí metody bublin [1][4].

První zmíněná metoda spočívá v porovnání tíhy sloupce kapaliny v kapiláře a síly způsobené povrchovým napětím, která je tíhou sloupce kapaliny v kapiláře v rovnováze. Tato metoda je značně náročná na přesnost určování výšky sloupce kapaliny a úhlu, jenž kapalina vytvoří svou smáčivostí.

Druhá metoda je založena na odkapávání kapalin z kapiláry a porovnávání hmotnosti kapek kapaliny o známém a neznámém povrchovém napětí. Tato metoda je velmi nenáročná na aparaturu, avšak abychom dosáhli vysoké přesnosti, musíme měření mnohokrát opakovat.

Při třetí metodě se využívá přímo z definice povrchového napětí, tedy, že je to poměr síly působící na povrchu kapaliny kolmo na jednotku délky. Tato metoda vyžaduje přesný siloměr a pravidelný předmět, jenž bude z hladiny odtrháván.

Poslední zmíněná metoda je velmi podobná kapkové metodě, avšak je k ní inverzní. Kapalina neodkapává z kapiláry, místo toho kapilárou proudí do kapaliny vzduch, který v ní tvoří bubliny. Tato metoda je velmi náročná na aparaturu, avšak je s výhodou používána pro stanovení povrchového napětí při měnící se teplotě kapaliny.

### 3.3 Zakoupená sestava

---

Ilustrační obrázek 3.3 zobrazuje sestavu na měření povrchového napětí kapalin. Jednotlivé součástky jsme zakoupili od společnosti Helago.



Obrázek 3.3: Ilustrační fotografie sady na měření povrchového napětí

#### 3.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje kádinku na měřenou kapalinu, gumovou hadičku s tlačkou pro zastavení průtoku kapaliny, kádinku pro odtok kapaliny, kroužek zavěšený ve třech bodech na vlákně, magnetickou míchačku s míchátkem, digitální teploměr. Místo torzního dynamometru zobrazeného na ilustračním obrázku 3. 3 jsme zakoupili pružinový siloměr.

Postup měření experimentu je následující. Do kádinky na míchačce se nalije měřená kapalina, hadička se naplní touž kapalinou a uzavře se tlačkou. Siloměr je zavěšen na stojanu v pevně dané výšce, na jeho konci je zavěšen kroužek. Kádinka s kapalinou se naplní tak, aby kroužek byl celý ponořen. Poté se hadičkou začne odpouštět kapalina. Na siloměru se odečte hodnota síly v momentu odtržení kroužku od hladiny kapaliny.

Postup se opakuje pro různé hodnoty teploty, případně pro různé kapaliny – doporučované jsou voda a slunečnicový olej.

### 3.3.2 Problémy měření

---

Základním problémem tohoto měření byla nutnost přepouštět kapalinu z jedné kádinky do druhé. Jednak se musela kapalina komplikovaně napouštět do hadičky, což bylo pro studenty zdlouhavé a pracné, jednak se při měření povrchového napětí slunečnicového oleje ušpinilo nejen mnoho nástrojů, ale často také samotné pracovní místo. Přelévání kapalin o teplotě 70 °C bylo též jedním z důvodů nevhodnosti tohoto postupu.

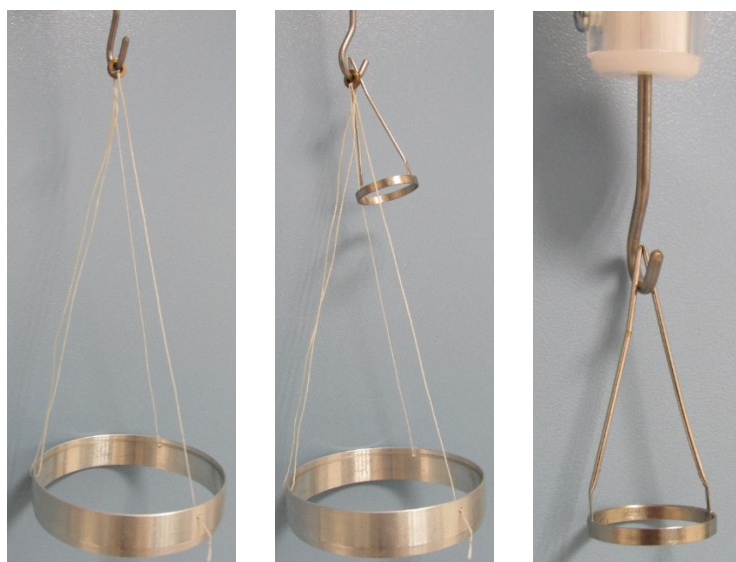
Dalším problémem se projevil samotný kroužek pro odtrhávání, který jsme zakoupili od firmy Helago. Jeho provedení (viz obrázek 3.4 vlevo) je naprosto nevhodné, jelikož je velmi náročné ho vyvážit a jakákoli malá síla působící na kroužek jej převáží k jedné straně.

V původním experimentu se používal ke změření odtrhávací síly torzní dynamometr, jehož hodnota se pohybuje kolem 40 000 Kč, my jsme proto zakoupili sadu pružinových siloměrů, kterými bychom torzní dynamometr mohli nahradit. Ukázalo se, že siloměry nemají takové rozsahy či přesnosti, abychom mohli provést všechna měření.

### 3.3.3 Aplikované úpravy měření

---

Jako první jsem se snažila vyřešit problém týkající se kroužku. Vlákná kroužku byla rozvolněná, proto jsem se je snažila stabilizovat. Bohužel tento postup se projevil nevhodným, jelikož nebyl přesný a zkresloval výsledky měření. Proto jsem navrhla objednat nový kroužek, tentokrát od firmy Phywe (obrázek 3.4 vpravo), který svým provedením již vyhovoval danému experimentu. Nyní se při měření používá dokoupený kroužek. Porovnání velikostí a provedení obou kroužků lze pozorovat na obrázku 3.4 uprostřed.



Obrázek 3.4: Vlevo původní kroužek od Helaga, uprostřed porovnání velikostí obou kroužků, vpravo detail nového kroužku od Phywe

Problém s přepuštěním kapaliny jsem vyřešila tak, že jsem našla návod na stejné měření od firmy LD Didactic, kde je postup práce odlišný. Místo přepouštění kapaliny hadičkou se využívá posuvu kádinky nahoru a dolů pomocí zdvihací plošiny. Tu jsme dokoupili od firmy Phywe a nyní ji používáme. Tato metoda je výhodnější i z toho důvodu, že rychlost klesání kapaliny lze snadno regulovat a měření se dá velmi rychle opakovat.

V poslední řadě jsem řešila problém se siloměry. Nejprve jsem zkoušela experiment měřit pomocí siloměru o rozsahu 0,01 N s nejmenším dílkem 0,1 mN. Jelikož kroužek sám o sobě působí na siloměr silou 0,007 N, bylo jeho použití vhodné pouze pro kapaliny s nízkým povrchovým napětím, kterými jsou například etanol či ricinový olej. Pro kapaliny, v jejichž povrchu působily větší síly (destilovaná voda, glycerol), byl siloměr příliš zatížen, neměřil a ničil se. Proto jsem opakovala měření se siloměrem o rozsahu 0,1 N s přesností 1 mN. Tímto siloměrem bylo možné naměřit všechny úlohy, kromě závislosti povrchového napětí kapalin na jejich teplotě, jelikož pro teploty nad 50 °C povrchové síly nabývají menších hodnot, než je rozlišení siloměru. Rozhodla jsem se proto, že studenti měření závislosti povrchového napětí na teplotě nebudou provádět. Místo toho jsem do návodu zařadila měření závislosti povrchového napětí na koncentraci roztoku.

Zvažovala jsem též dokoupení siloměru s rozsahem 0,1 N a přesností 0,1 mN, jímž by bylo možné měřit všechny druhy závislostí. Po komunikaci s několika obchody jsem však zjistila, že švédská firma Pesola, která siloměr s našimi požadavky vyráběla, tuto výrobu zastavila. Jiný vyhovující pružinový siloměr jsem nenalezla a digitální siloměry byly již příliš drahé (rozuměj více než 30 000 Kč).



### 3.4 Návod

---

#### Úkol:

1. Vytvořte graf závislosti povrchového napětí na koncentraci etanolu v destilované vodě.
2. Určete povrchové napětí destilované vody, etanolu, ricinového oleje, glycerolu a vody s cukrem o dvou různých koncentracích.

#### Bezpečnostní pokyny:

- Zacházejte opatrně s kroužkem k určování povrchového napětí – je křehký.
- Při zacházení s etanolem dodržujte dostatečnou vzdálenost od výparů. Pokud se vám udělá nevolno, běžte se v doprovodu vaší dvojice projít na chodbu.
- Kapaliny nepožívejte. V případě zasažení oka kapalinou ihned vypláchněte tekoucí vodou.

#### Pomůcky:

Kroužek k určování povrchového napětí o průměru 20 mm, měřené kapaliny (slunečnicový olej a glycerol již připravené v kádinkách), siloměr o rozsahu 0,1 N, dvě 200ml kádinky, digitální teploměr, stojan, zdvihací plošina



Obrázek 3.5: Ilustrační obrázek sestavy na měření povrchové napětí kapalin

#### Postup:

- 1) Zkontrolujte sestavu podle ilustračního obrázku 3.5. Ujistěte se, že máte všechny díly jak z obrázku, tak ze seznamu pomůcek.

- 2) Pro měření závislosti povrchového napětí na koncentraci etanolu v destilované vodě nejprve nalijte do kádinky 90 ml destilované vody. Změřte teplotu kapaliny  $t_{poč}$  a zapište ji.
- 3) Na hák siloměru zavěste kroužek k určování povrchového napětí (dále jen kroužek).
- 4) Zvedněte plošinu otáčením šroubu tak, aby se kroužek celý ponořil do kapaliny.
- 5) Zapište hodnotu  $P_1$ , kterou ukazuje siloměr.
- 6) Pomalu snižujte plošinu a sledujte ukazatel siloměru. Hodnotu  $P_2$ , kterou siloměr ukazuje v okamžiku těsně před odtržením, si zaznamenejte.
- 7) Měření opakujte třikrát. Po měření sejměte opatrně kroužek a odložte jej na papírový ubrousek.
- 8) Poté do kádinky přilejte 10 ml etanolu naměřených v odměrném válci a zamíchejte. Opakujte měření podle bodů 4 až 6, opět třikrát.
- 9) Poté přilévejte do destilované vody takový objem etanolu, aby celkový objem v 90 ml destilované vody odpovídal objemům etanolu v tabulce 3.1. Vždy roztok pečlivě zamíchejte.
- 10) Jakmile získáte 50% roztok, změřte teplotu  $t_{konc}$  a zapište si ji. Ve vašem protokolu diskutujte, proč došlo ke změně teploty.
- 11) Při měření koncentrací vyšších než 50 % postupujte obráceně, tzn., nejprve změřte povrchové napětí 90 ml 100% etanolu, poté přilévejte destilovanou vodu podle tabulky 3.1.
- 12) Pro měření jednotlivých kapalin postupujte následovně.
- 14) Nalijte do kádinky přibližně 200 ml kapaliny, jejíž povrchové napětí budete měřit. Seznam kapalin je v tabulce 3.2. Glycerol je již připraveny v 600ml kádince. Roztoky destilované vody s cukrem vyrábějte tak, aby konečná hmotnost byla 200 g.
- 13) Opakujte postup měření podle bodů 4 až 6, vždy proveďte trojí měření.
- 14) Z rovnice 3.3 vypočtete povrchové napětí kapalin, odvoďte chybu měření povrchového napětí.
- 15) Sestrojte graf závislosti povrchového napětí kapaliny roztoku etanolu na procentuálním objemu etanolu v destilované vodě. Procentuální objem získáte dopočítáním ze známých objemů. Zapište hodnoty na připravená místa v tabulce 3.1.
- 16) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data, výpočty a graf závislosti povrchového napětí na koncentraci etanolu. Hodnoty povrchového napětí pro kapaliny z tabulky 3.2 porovnejte s hodnotami uvedenými v matematicko-fyzikálních tabulkách.

17) Na závěr shrňte výsledky svého snažení, vypočítejte a diskutujte chyby měření.

Tabulka 3.1: Tabulky pro namíchání roztoků destilované vody a etanolu a pro zápis naměřených hodnot

Voda (ml)	Etanol (ml)	Podíl etanolu ve vodě (%)	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)
90	0					
90	10					
90	20					
90	50					
90	70					
90	90					

Etanol (ml)	Voda (ml)	Podíl etanolu ve vodě (%)	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)
90	0					
90	10					
90	20					
90	50					
90	70					
90	90					

Tabulka 3.2: Tabulka měřených kapalin

Kapalina	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)
Destilovaná voda				
Etanol				
Glycerol				
Ricinový olej				
Destilovaná voda s cukrem 20%				
Destilovaná voda s cukrem 40%				

### 3.5 Kontrolní měření

$$t_{poč} = 22,7 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{konc} = 28,7 \text{ } ^\circ\text{C}, P_1 = 0,0075 \text{ N}$$

Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty povrchového napětí roztoků etanolu v destilované vodě o různých koncentracích

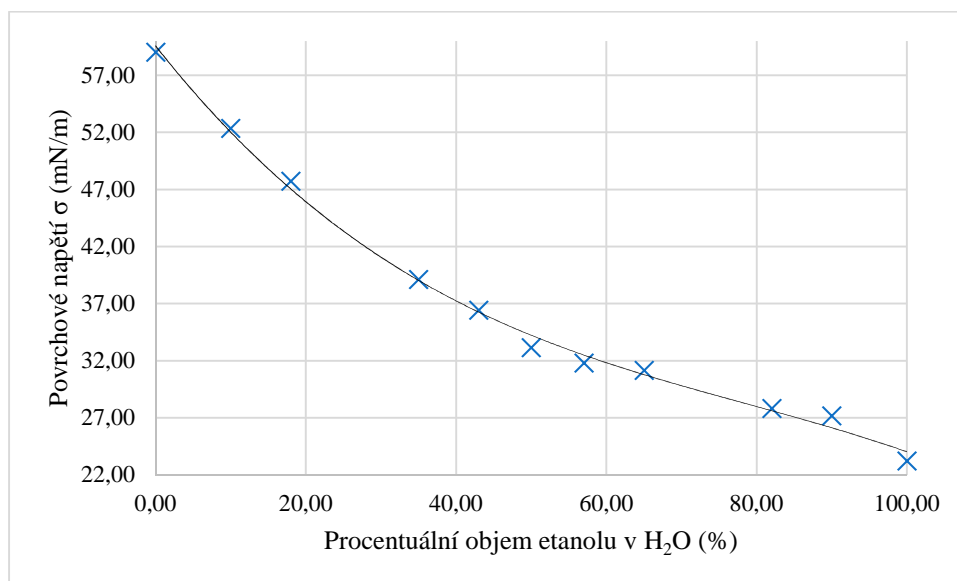
Voda (ml)	Etanol (ml)	Podíl etanolu ve vodě (%)	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)	Vypočtená hodnota napětí $\sigma$ (mN/m)
90	0	0	15,00	14,75	15,00	14,92	$59,0 \pm 1,2$
90	10	10	14,00	14,25	14,00	14,08	$52,4 \pm 1,1$
90	20	18	13,50	13,50	13,50	13,50	$47,8 \pm 1,1$
90	50	35	12,25	12,50	12,50	12,42	$39,2 \pm 0,9$
90	70	43	12,00	12,00	12,25	12,08	$36,5 \pm 0,9$
90	90	50	11,75	11,75	11,50	11,67	$33,2 \pm 0,9$

Etanol (ml)	Voda (ml)	Podíl etanolu ve vodě (%)	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)	Vypočtená hodnota napětí $\sigma$ (mN/m)
90	0	100	10,50	10,25	10,50	10,42	$23,2 \pm 0,7$
90	10	90	11,00	10,75	11,00	10,92	$27,2 \pm 0,7$
90	20	82	11,00	11,00	11,00	11,00	$27,9 \pm 0,8$
90	50	65	11,25	11,50	11,50	11,42	$31,2 \pm 0,8$
90	70	57	11,50	11,50	11,50	11,50	$31,8 \pm 0,8$
90	90	50	11,75	11,75	11,50	11,67	$23,2 \pm 0,6$

Tabulka 3.4: Naměřené hodnoty povrchového napětí různých kapalin

Kapalina	Měření 1 (mN)	Měření 2 (mN)	Měření 3 (mN)	Průměr měření $P_2$ (mN)	Vypočtená hodnota napětí $\sigma$ (mN/m)
Destilovaná voda	15,00	14,75	15,00	14,92	$59,1 \pm 1,2$
Etanol	10,50	10,25	10,50	10,42	$23,2 \pm 0,7$
Glycerol	15,25	15,00	14,75	15,00	$59,7 \pm 1,2$
Ricinový olej	12,00	12,00	12,00	12,00	$35,8 \pm 0,9$
Destilovaná voda s cukrem 20%	15,10	15,10	15,00	15,07	$60,2 \pm 1,2$
Destilovaná voda s cukrem 40%	15,00	15,20	15,10	15,10	$60,5 \pm 1,2$

Graf 3.1: Graf závislosti povrchového napětí roztoku na objemovém procentu etanolu v destilované vodě



Tabulka 3.5: Tabulka naměřených hodnot povrchového napětí různých kapalin

Kapalina	Vypočtená hodnota napětí $\sigma$ (mN/m)	Tabulková hodnota napětí (mN/m)	Rozdíl vypočtené a tabulkové hodnoty (mN/m)
Destilovaná voda	$59,0 \pm 1,2$	72,75	$13,7 \pm 1,2$
Etanol	$23,2 \pm 0,7$	22,55	$-0,7 \pm 0,7$
Glycerol	$59,7 \pm 1,2$	62,50	$2,8 \pm 1,2$
Ricinový olej	$35,8 \pm 0,9$	36,40	$0,6 \pm 0,9$
Voda s cukrem 20%	$60,2 \pm 1,2$	není	-
Voda s cukrem 40%	$60,5 \pm 1,2$	není	-

### 3.6 Poznámky pro vyučujícího

V tomto experimentu se používají různé chemické látky. Dbejte na to, abyste jich měli dostatečné množství. Pro destilovanou vodu je toto množství 180 ml pro jednu skupinu, totéž (180 ml/skupina) platí pro etanol. Glycerol a ricinový olej doporučuji mít připravený ve dvou kádinkách, a to tak, že do 600ml kádinky nalijete přibližně 450 ml kapaliny, lze je pak opakovaně použít pro každou skupinu a též v experimentu Měření viskozity kapalin. Vodu s cukrem doporučuji míchat v nádobě o objemu 200 ml, kdy na výrobu 20% roztoku použijeme 160 g vody a 40 g cukru a na výrobu 40% roztoku použijeme 120 g vody a 80 g cukru.

Vzhledem k opakovanému ponořování a vynořování kroužku do kapalin je vhodné mít na pracovním místě dostatečné množství papírových ubrousků, někteří studenti mohou vyžadovat ochranné (silikonové či latexové) rukavice.

## 4 Měření dynamické viskozity

---

### 4.1 Teoretický základ

---

Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření, které při proudění vzniká uvnitř tekutin vzájemným silovým působením mezi částicemi. O ideální kapalině předpokládáme, že má nulové vnitřní tření. Skutečné kapaliny se od ideální kapaliny liší tím, že u nich při proudění dochází k přeměně části kinetické energie jednotlivých částic kapaliny v tepelnou energii. Kapaliny s vnitřním třením se označují jako viskózní (vazké).

Podle Newtonova zákona platí

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (4.1)$$

kde  $\frac{dv}{dy}$  označuje gradient (růst) rychlosti ve směru kolmém na směr rychlosti,  $\tau$  je tečné napětí a  $\eta$  se nazývá součinitel viskozity (vnitřního tření) nebo dynamická viskozita (vazkost).

Uvedený vztah platí pro většinu kapalin, nazývají se newtonské tekutiny. Dynamická viskozita u nich nezávisí na gradientu rychlosti. Existují však také anomální tekutiny, u nichž je viskozita na gradientu rychlosti závislá. Takové kapaliny se nazývají neneutonské.

Převrácená hodnota dynamické viskozity se nazývá tekutost

$$\varphi = \frac{1}{\eta}. \quad (4.2)$$

Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se označuje jako součinitel kinematické viskozity nebo kinematická viskozita (vazkost)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (4.3)$$

V úloze budeme měřit viskozitu kapalin pomocí rotačního viskozimetru. Principem společným všem typům rotačních viskozimetrů je měření momentu síly, který musí překonávat rotující těleso ponořené do kapaliny. Za ideálních podmínek pro velikost tohoto momentu platí:

$$M = k\omega\eta, \quad (4.4)$$

kde  $M$  je moment síly,  $\omega$  je úhlová frekvence rotujícího tělesa,  $\eta$  je dynamická viskozita a  $k$  je konstanta přístroje zahrnující především jeho geometrii.

Pochopitelně, rotace tělesa musí být tak pomalá, aby nedocházelo k turbulentnímu proudění. Obvyklou geometrií je válcová nádoba, do které je ponořen rotující válec. Velkou výhodou rotačních viskozimetrů je to, že jsou v principu schopny měřit i viskozitu newtonských kapalin.

Viskozita kapalin závisí na teplotě a tlaku. S rostoucí teplotou klesá, s rostoucím tlakem vzrůstá. Vliv tlaku je však většinou zanedbatelný, projevuje se až při velmi vysokých hodnotách tlaku. Rozhodujícím faktorem určujícím velikost viskozity je tedy teplota. Závislost viskozity při stálém tlaku na teplotě lze vyjádřit vztahem

$$\eta = e^{\left(A + \frac{B}{T}\right)}, \quad (4.5)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota a  $A, B$  jsou empirické konstanty.

## 4.2 Způsoby měření

---

K měření viskozity je možno užít jednu z pěti metod. Všechny metody využívají zařízení nazývaná viskozimetry, tato zařízení jsou však založena na různých principech [1][3][4].

Prvním druhem jsou kapilární (výtokové) viskozimetry. Jejich princip spočívá v měření objemu kapaliny, který proteče kapilárou o známých vlastnostech za daný čas, při tlakovém rozdílu mezi konci trubice. Mezi kapilární viskozimetry patří Ostwaldův a Ubbelohdův, dále také Mariottova láhev.

Druhou možností je využít tzv. tělískové viskozimetry. Jsou to zařízení, u kterých se viskozita určuje z rychlosti pádu tělíška v měrné kapalině. Tělískovým viskozimetrem je například Stokesův či Höpplerův viskozimetr.

Dalším druhem viskozimetrů jsou rotační a torzní viskozimetry. Tyto viskozimetry přímo měří sílu přenášenou nehomogenním tokem kapaliny z jedné plochy viskozimetru na druhou. Přesnější princip je popsán v teorii této kapitoly.



Čtvrtým druhem jsou vibrační viskozimetry. Ty využívají k měření viskozity útlumu kmitajícího tělesa v kapalině, tvar tělesa může být různé geometrie, např. deska, válec, kruhový terč, apod. [5].

Posledním druhem jsou plovákové viskozimetry. Jsou založeny na obdobném principu jako viskozimetry rotační. Místo rotačního válce však je viskozimetr sestaven z otáčející se osy, na níž jsou dva plováčky. Jeden plováček je referenční, umístěný v dané výšce, druhý plováček určuje svou polohou viskozitu měřené kapaliny [6].

### 4.3 Zakoupená sestava

---

Zakoupili jsme rotační viskozimetr se sadou rotačních vřeten od firmy Helago, viskozimetr byl vyroben firmou Brookfield. Fotografie viskozimetru i sady vřeten je na obrázku 4.1.

#### 4.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje rotační viskozimetr, sadu vřeten, kádinky válcovitého tvaru a digitální teploměr.

Postup měření experimentu je následující. Do kádinky se naliže měřená kapalina, na otočný šroub viskozimetru se upevní příslušné vřeteno. Kádinka se umístí tak, aby ryska na hřídeli vřetena byla ponořena těsně pod hladinou zkoumané kapaliny. Ovládacími prvky viskozimetru se nastaví charakteristický údaj vřetena a rychlost otáčení. Při spuštění přístroje se začne vřeteno otáčet navolenou rychlostí, po ustálení se na displeji zobrazí hodnota naměřené viskozity kapaliny.

Postup se opakuje pro různé hodnoty teploty, případně pro různé kapaliny – doporučované jsou slunečnicový olej a glycerol.

#### 4.3.2 Problémy měření

---

Při sestavování a proměřování experimentu jsem na žádné problémy nenarazila, sestava je zcela funkční a podává správné hodnoty. Bylo však nutné si pečlivě nastudovat části soupravy.

Vřetena mají různé velikosti a tvary, a proto mají i různé použití. Proto jsem je proměřila a vybrala vhodná vřetena pro danou úlohu. Maximální rozsah měřených hodnot viskozit

pro daná vřetena při zvolené rychlosti otáčení lze nalézt v tabulce 4.1. Chyba měření je vždy jedno procento z hodnoty uvedené v tabulce 4.1 při daném nastavení.

Tabulka 4.1: Tabulka maximálních rozsahů všech vřeten pro všechna různá nastavení rychlosti otáčení (RPM – otáčky za minutu)

RPM	Hodnoty maximálního rozsahu měření pro jednotlivá vřetena (mPa·s)			
	61	62	63	64
10	599	2999	12000	59990
20	299	1500	5999	29990
30	200	1000	3999	20000
50	120	599	2399	12000
60	100	499	2000	9998
100	59,9	299	1200	5999

Dále jsem prostudovala návod k rotačnímu viskozimetru, naučila se ovládat nastavení přístroje, které jsem pečlivě jej popsala v návodu tak, aby studenti během měření přesně věděli jak s přístrojem zacházet.

#### 4.3.3 Aplikované úpravy měření

---

Nemusela jsem aplikovat žádné úpravy měření.

#### 4.4 Návod

---

##### Úkol:

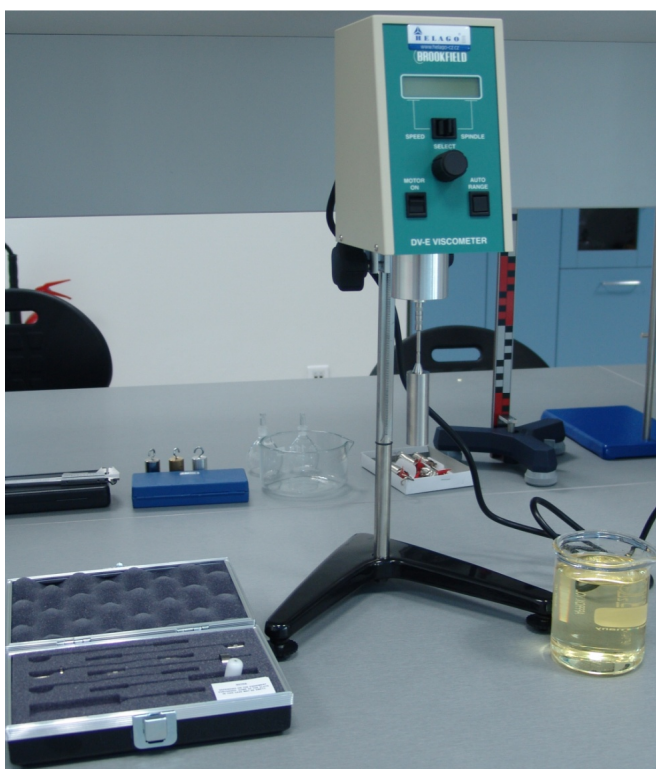
1. Určete viskozitu slunečnicového oleje a glycerinu v závislosti na teplotě.

##### **Bezpečnostní pokyny:**

- Chraňte rotační čep před mechanickým poškozením. Nezapínejte viskozimetr, pokud je ochranný kryt nasazen na rotačním čepu.
- Dbejte zvýšené bezpečnosti v blízkosti zahřáté plotýnky.
- Nezahřívejte dané kapaliny nad teplotu 70 °C. Se zahřátými kapalinami pracujte pouze s ochrannými prostředky.

##### **Pomůcky:**

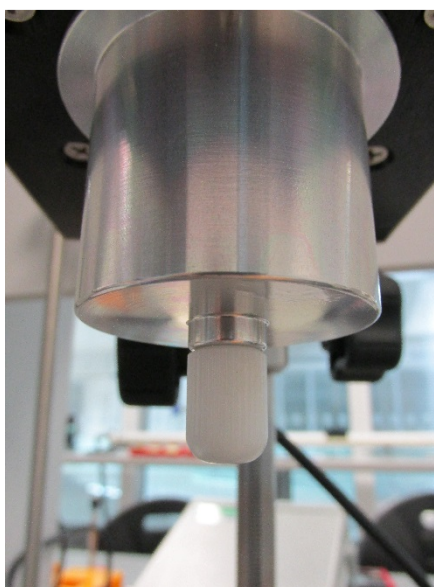
sestava na měření viskozity kapalin (rotační viskozimetr, sada vřeten, dvakrát 600ml tlustostěnná kádinka s připraveným obsahem (slunečnicový olej, glycerin), viz obrázek 4.1), podstavec, digitální teploměr, magnetická míchačka s ohřevem, hadřík, papírové ubrousky



Obrázek 4.1: Sestava na měření viskozity kapalin

**Postup:**

- 1) Zkontrolujte sestavu podle obrázku 4.1. Ujistěte se, že máte všechny díly, tzn. sadu vřeten, rotační viskozimetr, kádinku a měřené kapaliny.
- 2) Ustavte rotační viskozimetr do vodorovné polohy. Vodorovná poloha se nastaví za použití tří nivelačních šroubů v podstavci. Nastavte vodorovnou polohu tak, aby nivelační bublina (na horní straně přístroje) byla ve středu kruhu.
- 3) Odšroubujte ochranný kryt z otočného čepu.



Obrázek 4.2: Umístění ochranného krytu otočného čepu

- 4) Přesvědčte se, že síťový vypínač na zadní straně přístroje je v pozici vypnuto (0). Připojte síťový kabel do zásuvky.
- 5) Přepněte síťový vypínač do pozice ON (zapnuto) a vyčkejte, dokud se na displeji neobjeví nápis, viz obrázek 4.3. Na prvním řádku vidíte jednotku viskozity  $mPa \cdot s$ . Za tímto údajem se bude během měření ukazovat naměřená hodnota. Na druhém řádku je zapsána rychlost otáčení vřetena (10 otáček za minutu), stav otáčení vřetena (OFF – vypnuto), symbol %, za nímž se objeví aktuální procentuální torze vřetena při nastavené rychlosti. Symbol S61 označuje právě použité vřeteno s označením 61. Hodnoty na obrázku 4.3 se mohou od hodnot, které vidíte, lišit. Přístroj si pamatuje poslední používané nastavení.



Obrázek 4.3: Detail přední desky rotačního viskozimetru

- 6) Vyberte vřeteno podle kapaliny, kterou budete měřit (viz tabulka 4.2). Označení vřetena naleznete na závitě vřetena.

Tabulka 4.2: Vřetena a kádinky vhodné pro měření viskozity daných kapalin

Kapalina	Vřeteno	Symbol	Kádinka	Objem kapaliny
Slunečnicový olej	61	S61	600 ml	450 ml
Glycerin	63, příp. 62	S63	600 ml	450 ml

- 7) Jednou rukou lehce nadzvedněte a podržte spojovací (otočný) šroub. Druhou rukou pozvolna přišroubujte vřeteno. Pamatujte, že vřeteno a spojka mají levý závit.
- 8) Zadejte do přístroje kód vřetena následujícím způsobem:
  - a. Přepínač mezi polohami SPEED, neutrální a SPINDLE přepněte do pozice SPINDLE.

- b. Otáčejte knoflíkem SELECT dokud se na displeji neobjeví symbol daného vřetena.
  - c. Přepínač přepněte do neutrální polohy.
- 9) Navolte na přístroji rychlost 50 otáček za minutu následujícím způsobem:
- a. Přepínač přepněte do pozice SPEED.
  - b. Otáčejte knoflíkem SELECT dokud se na displeji neobjeví 50.
  - c. Přepínač přepněte do neutrální polohy.
- 10) Stlačením a podržením tlačítka AUTO RANGE se vám na prvním řádku objeví maximální hodnota viskozity, kterou přístroj při daném nastavení dokáže změřit. Jedno procento z této hodnoty je chyba měření přístroje. Zapište si hodnotu pro každé nastavení přístroje, v protokolu chybu měření uveďte a zanepte ji do grafu pomocí chybové úsečky.
- 11) Za použití otočného šroubu na stojanu vysuňte přístroj do nejvyšší možné polohy. Tato poloha je označena. Nevysouvejte přístroj výše, neboť by spadl ze stojanu.
- 12) Připravenou kádinku s kapalinou postavte na podstavec.
- 13) Spouštějte rotační viskozimetr po stojanu dolů. Nesmí dojít k bočnímu nárazu na vřeteno! Ponořte a vycentrujte (posunutím kádinky) vřeteno v měřené kapalině, dokud hladina kapaliny nebude sahat po drážku vyznačující ponor, vyrytou do hřídele vřetena.
- 14) Zapněte rotaci vřetena přepnutím tlačítka MOTOR ON do horní polohy. Vřeteno se nyní otáčí a místo nápisu OFF se objeví nápis RPM (rotations per minute).
- 15) Vyčkejte, dokud se hodnoty neustálí (přibližně 30 s).
- Digitálním teploměrem změřte teplotu kapaliny. Při měření dbejte, abyste se jehlou teploměru nedotýkali ani kádinky ani vřetena. Zapište hodnotu do tabulky.
  - Pro dosažení maximální přesnosti je třeba se vyhnout údajům pod 10 % torze vřetena. Pokud se na displeji zobrazuje nižší procentuální hodnota, je třeba nastavit vyšší rychlost otáčení vřetena. Nastavení rychlosti lze provádět při spuštěném otáčení vřetena, a to podle návodu v bodě 9.
- 16) Opište naměřené hodnoty do tabulky 4.2.
- 17) Vypněte rotaci vřetena přepnutím tlačítka MOTOR ON do dolní polohy.
- 18) Pokud zvýšení rychlosti nepostačuje, vypněte motor viskozimetru a vyměňte dané vřeteno. Tato situace nastane při měření glycerolu, kde vřeteno 61 při vyšších teplotách nahradíte vřetenem 62.

Tabulka 4.3: Tabulka pro zápis naměřených hodnot

Slunečnicový olej			Glycerin		
Teplota (°C)	Torze vřetena (%)	Viskozita (mPa·s)	Teplota (°C)	Torze vřetena (%)	Viskozita (mPa·s)

- 19) Vysuňte přístroj do nejvyšší možné polohy a opatrně vyjměte kádinku. Pod visící vřeteno umístěte hadřík, který zachytí kapalinu odkapávající z vřetena.
- 20) Umístěte kádinku na magnetickou míchačku. Zapojte magnetickou míchačku do sítě a otočením knoflíku zapněte zahřívání. Spuštění zahřívání je indikováno rozsvícenou kontrolkou.
- 21) Ponořte jehlu teploměru do kapaliny a promíchejte. Jakmile naměříte na teploměru teplotu přibližně 35 °C, sejměte opatrně kádinku z míchačky a položte ji na připravený čistý ubrousek na podstavci. Míchačku vypněte otočením knoflíku do mezní polohy, kdy kontrolka nesvítí.
- 22) Kapalinu v kádince ještě jednou dobře promíchejte.
- 23) Změřte viskozitu ohřáté kapaliny stejným způsobem, jakým jste ji měřili poprvé, tzn., opakujte postup od bodu 13. Při ustalování hodnot na displeji viskozimetru nyní čekejte alespoň 40 s, a to z důvodu ustalování teploty v celém objemu kapaliny.
- 24) Zapište si teplotu, kterou má kapalina těsně po odečtení hodnoty viskozity z přístroje.
- 25) Naměřte hodnoty viskozity pro pět různých teplot, které se liší přibližně o 10 °C. Tzn., že v tabulce budou hodnoty viskozity kapaliny při teplotách přibližně 25 °C, 35 °C, 45 °C, 55 °C a 65 °C.
- 26) Po naměření hodnot pro jednu kapalinu vypněte motor viskozimetru, odejměte kádinku s kapalinou a pod vřeteno umístěte hadřík. Jednou rukou lehce nadzvedněte a podržte spojovací (otočný) šroub. Druhou rukou pozvolna odšroubujte vřeteno. Pamatujte, že vřeteno a spojka mají levý závit.
- 27) Vřeteno otřete o hadřík, abyste jej zbavili nejhrubší nečistoty. Poté vřeteno omyjte jarem, opláchněte pod tekoucí vodou a papírovými ubrousky vysušte. Pokud se dostala voda do závitu, smotejte roh papírového ubrousku a vodu vysušte. Vyperte hadřík a vyždímejte jej pro další použití.
- 28) Měření opakujte pro druhou kapalinu.

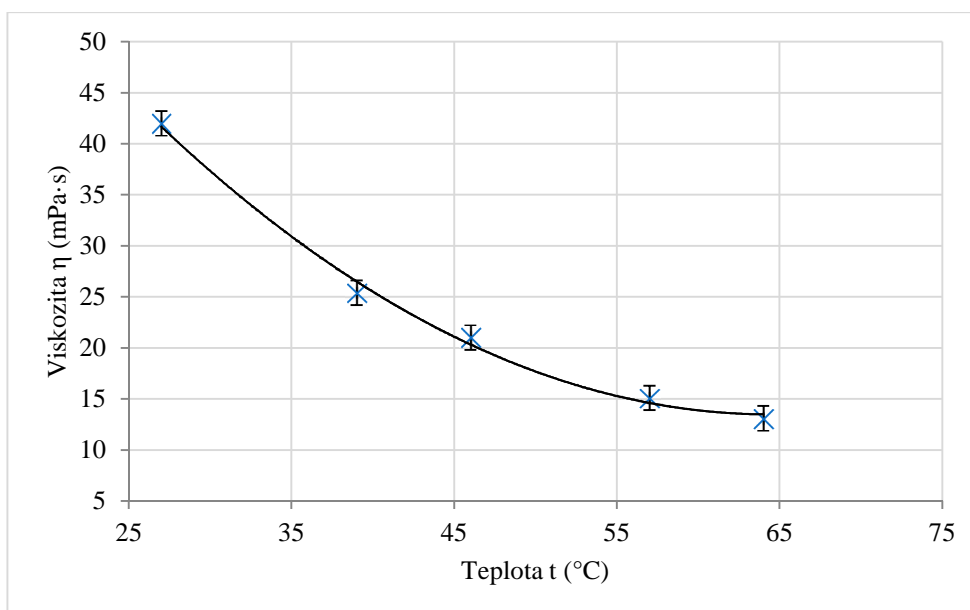
29) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data a grafy závislosti viskozity daných kapalin na teplotě (podle návodu v bodě 10 vložte chybové úsečky). Do závěru napište, k čemu jste dospěli a diskutujte chyby měření.

#### 4.5 Kontrolní měření

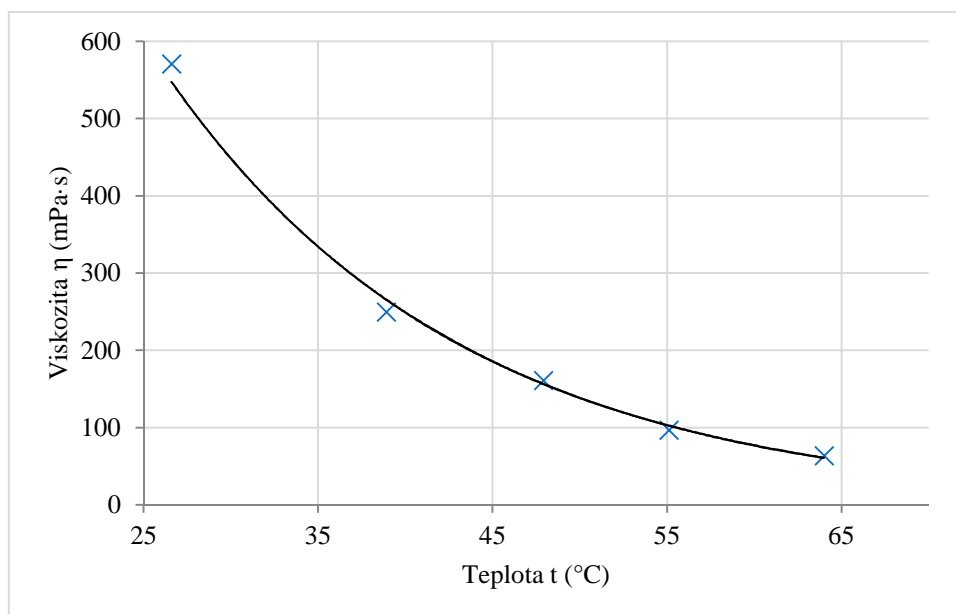
Tabulka 4.4: Tabulka naměřených hodnot, slunečnicový olej měřen vřetenem 61, glycerin vřetenem 63 (\*rychlost 100 RPM) a \*\*62

Slunečnicový olej			Glycerin		
Teplota (°C)	Torze vřetena (%)	Viskozita (mPa·s)	Teplota (°C)	Torze vřetena (%)	Viskozita (mPa·s)
27,0	35,0	42,0 ± 1,2	26,6	23,8	571 ± 24
39,0	21,2	25,4 ± 1,2	38,9	10,4	250 ± 24
46,0	17,5	21,0 ± 1,2	47,2	13,4*	161 ± 12
57,0	12,6	15,1 ± 1,2	55,1	32,3**	96 ± 3
64,0	11,0	13,1 ± 1,2	64,0	21,2**	63 ± 3

Graf 4.1: Graf závislosti viskozity slunečnicového oleje na teplotě



Graf 4.2: Graf závislosti viskozity glycerinu na teplotě



#### 4.6 Poznámky pro vyučujícího

Slunečnicový olej i glycerin doporučuji mít připravený v dostatečně velkých kádinkách (maximální objem 600 ml) a dostatečném objemu dané kapaliny (400 – 450 ml). Vzhledem k vlastnostem obou kapalin dbejte, aby na pracovním místě byl dostatek utěrek či papírových ubrousků.

Někteří studenti vyžadují pro práci s kapalinami ochranné (latexové) rukavice.

Jelikož studenti budou zacházet s horkými kapalinami, měli by být poučeni o bezpečnosti a první pomoci. Zároveň je nutné je vybavit ochrannými prostředky (rukavice odolné teplotám, úchytové kleště, apod.).



## 5 Ověření stavové rovnice ideálního plynu

---

### 5.1 Teoretický základ

---

Ideální plyn je fyzikálně zjednodušený model plynu, který má ideální vlastnosti. Částice ideálního plynu splňují následující podmínky, a to, že rozměry částic jsou zanedbatelné vzhledem ke vzdálenostem mezi nimi, kromě srážek na sebe částice jinak nepůsobí, celková kinetická energie částic se při vzájemných srážkách nemění, tzn., srážky částic jsou dokonalé pružné. Důsledkem těchto podmínek jsou dokonalá stlačitelnost a žádné vnitřní tření (dokonalá tekutost). Reálné plyny se při dostatečně vysoké teplotě a nízkém tlaku ideálnímu plynu svými vlastnostmi přibližují.

Pro termodynamické děje v plynech platí stavová rovnice plynu:

$$pV = NkT, \quad (5.1)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $V$  je objem plynu,  $N$  je celkový počet částic plynu,  $T$  je termodynamická teplota a  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ) Pokusy ukazují, že tuto rovnici lze přibližně použít také pro skutečné plyny, a to tím přesněji, čím nižší je jejich tlak a čím vyšší je jejich teplota.

Pokud budeme uvažovat stavové změny (tzn. změny tlaku, objemu a teploty) ideálního plynu o konstantní hmotnosti, popíšeme dva různé stavy téhož plynu rovnicemi

$$p_1V_1 = NkT_1, \quad p_2V_2 = NkT_2, \quad (5.2)$$

z obou rovnic plyne

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}, \quad (5.3)$$

Můžeme tedy tvrdit, že výraz  $\frac{pV}{T}$  je konstantní.

Děj, při němž je teplota stálá, se nazývá izotermický děj. Při tomto ději s plynem o stálé hmotnosti se mění objem  $V$  a tlak plynu  $p$ . Křivka grafu vyjadřujícího tlak plynu stálé hmotnosti jako funkci jeho objemu při izotermickém ději se nazývá izoterma (viz obrázek 5.1).

$$p_1V_1 = p_2V_2, \quad \text{resp.} \quad pV = \text{konst.} \quad (\text{zákon Boyleův – Mariottův})$$

Děj, při němž je objem plynu stálý, se nazývá izochorický děj. Zahříváme-li plyn určité hmotnosti tak, že jeho objem zůstává stálý, zvětšuje se jeho tlak. Křivka znázorňující v diagramu  $p - V$  izochorický děj se nazývá izochora (obrázek 5.1). Při izochorickém ději je objem plynu stálý, a proto izochora je úsečka rovnoběžná s osou  $p$ .

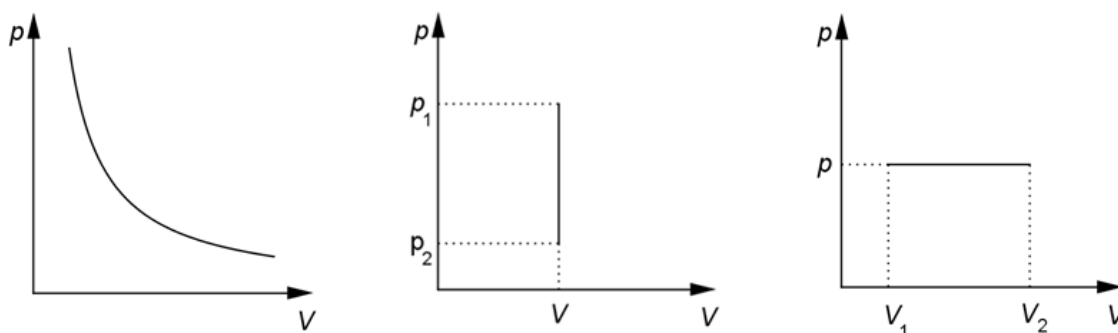
Platí vztahy

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \text{resp.} \quad \frac{p}{T} = \text{konst.} \quad (\text{zákon Charlesův})$$

Děj, při němž je tlak plynu stálý, se nazývá izobarický děj. Zahříváme-li plyn určité hmotnosti tak, že jeho tlak udržujeme stálý, zvětšuje se objem plynu. Křivka grafu vyjadřujícího tlak plynu stálé hmotnosti jako funkci jeho objemu při izobarickém ději se nazývá izobara (obrázek 5.1).

Pro izobarický děj platí následující vztahy

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \text{resp.} \quad \frac{V}{T} = \text{konst.} \quad (\text{zákon Gayův – Lussacův})$$



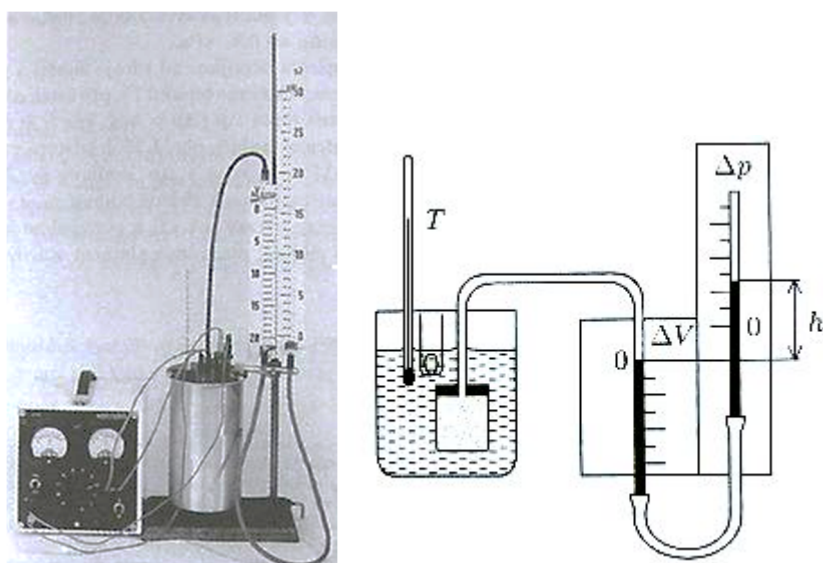
Obrázek 5.1:  $p - V$  diagramy po řadě izotermického, izochorického, izobarického děje

## 5.2 Způsoby měření

Nejjednodušším způsobem jak ověřit Boyleův – Mariottův zákon je Meldova trubice. Je to silnostěnná kapilára, do níž je vpraven sloupec rtuti, který uzavře na zataveném konci sloupec vzduchu. Pokud je kapilára rovnoběžná se směrem gravitační síly, působí na sloupec vzduchu větší síly, nežli pokud kapiláru nakloníme o vybraný úhel. Ze znalosti všech délek, úhlů, vlastností plynu a rtuti lze pak matematicky dospět k ověřovanému výrazu  $pV = \text{konst.}$

Stavová rovnice ideálního plynu se běžně ověřuje také pomocí tzv. pVT přístroje s manometrem. Tento přístroj i jeho schéma jsou znázorněny na obrázku 5.2 převzatého ze skript Karlovy univerzity [8].

Přístroj se skládá z hliníkové nádoby s vnitřní skleněnou baňkou propojenou s otevřeným rtuťovým manometrem, k zahřívání slouží zdroj napětí připojený na topné těleso uvnitř nádoby. Při změně teploty vody v hliníkové nádobě dochází k ohřevu plynu ve skleněné baňce a tím k jeho rozpínání. Pokud nebudeme posouvat nastavitelný manometr, můžeme pozorovat závislost objemu plynu na teplotě, pokud budeme manometrem posouvat tak, aby objem plynu byl konstantní, získáme závislost tlaku na teplotě.



Obrázek 5.2: Vlevo fotografie přístroje pVT, vpravo jeho schématický náčrt

Novější sestavy jsou založeny na témž principu, ale využívají k vizualizaci a pozdějšímu zpracování výsledků výpočetní techniku, kterou dodává např. firma Vernier. Na obrázku 5.3 vidíme sestavu na ověřování stavové rovnice ideálního plynu s využitím USB teplotní sondy a USB tlakoměrové sondy [9].



Obrázek 5.3: Sestava pro ověřování stavové rovnice ideálního plynu s čidly od firmy Vernier [9]

### 5.3 Zakoupená sestava

---

Zakoupili jsme sestavu od firmy Helago, sestava se skládá z velké zkumavky, plynového teploměru a vakuové pumpy (viz obrázek 5.4).

#### 5.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje plynový teploměr spojený hadičkou s vakuovou pumpou, velkou zkumavku, multimetr s teplotní sondou, 600ml kádinku, stojan a svorky (viz obrázek 5.4).

Postup měření experimentu je rozdělen do tří částí.

V první části se připraví plynový teploměr a odečte se výška vzduchového sloupce pod rtuťovou kapkou. Vakuovou pumpou se v krocích snižuje hodnota tlaku v plynovém teploměru, v každém kroku se přitom odečítá výška vzduchového sloupce, a to až do podtlaku cca 650 mbar.

V druhé části se připravený plynový teploměr ponoří do velké zkumavky naplněné vodou o teplotě cca 90 °C. Po ustálení výšky vzduchového sloupce se odečte teplota vody a výška sloupce. Poté se přidá kostka ledu, kapalina se promíchá a po ustálení teploty se opět odečtou hodnoty teploty a výšky vzduchového sloupce. Měření se opakuje přibližně 15 krát.

V třetí části se připravený plynový teploměr opět ponoří do velké zkumavky naplněné vodou o teplotě cca 90 °C. Po ustálení výšky vzduchového sloupce se odečte teplota vody a zapíše se výška sloupce, nazve se počáteční. Poté se přidá kostka ledu, kapalina se promíchá a po ustálení teploty se pomocí vakuové pumpy sníží tlak v plynovém teploměru

tak, aby výška vzduchového sloupce pod rtutí nabyla stejné hodnoty, jako byla hodnota počáteční. Odečtou se hodnoty teploty ve stupních Celsia a podtlaku v jednotkách mbar. Přidá se další kostka a postup se opakuje. Stejně jako v případě druhé části se hodnoty měří přibližně 15 krát.

### 5.3.2 Problémy měření

---

Jako hlavní problém toho měření se projevila časová náročnost. Experiment byl navržen tak, že druhá a třetí část měření podle dodaného návodu v anglickém jazyce trvají každá více než hodinu, což není pro Fyzikální praktikum vhodné.

### 5.3.3 Aplikované úpravy měření

---

Ačkoli by se dala druhá a třetí část spojit dohromady a odečítat všechny hodnoty při jednom měření, není tento postup vhodný, protože velmi zatěžoval studenty a ti pak dělali velké chyby.

Místo toho jsem navrhla, že je třeba vodu ve zkumavce chladit. Připravila jsem návod, ve kterém studenti používali 2000ml kádinku, kterou naplnili studenou vodou a celou sestavu (tzn. plynový teploměr ponořený do zkumavky) do této kádinky ponořili. Tento způsob se zdál být efektivní, bohužel však zkresloval výsledky měření. To bylo způsobeno tím, že kádinka není dostatečně vysoká, a proto chladí pouze spodní polovinu zkumavky. Jelikož voda je materiál, který špatně vede teplo, vznikal ve zkumavce teplotní rozdíl až 40 °C. Proto nebylo možné zjistit, jakou teplotu má reálně vzduchový sloupec uvnitř plynového teploměru. Vznik teplotního rozdílu jsem se snažila odstranit přidáním magnetického míchátko do zkumavky a magnetické míchačky pod celou sestavu. Bohužel magnetické míchátko nepromíchávalo vodu po celém objemu, ale pouze ve spodní části zkumavky, a proto problém přetrvával.

Finální úpravou je postup, kdy se ponechala sestava ze zadání, a po každém odečtu hodnot se do zkumavky přidá jedna kostka ledu. Jelikož studená voda má vyšší hustotu než voda teplá, klesá a kapalina ve zkumavce se samovolně promíchává. Nevzniká tedy žádný teplotní rozdíl, který by zkresloval měření. Tato metoda je jednoduše implementovatelná a zkrátí dobu měření na přibližně 30 minut. Tato doba závisí na velikostech kostek ledu a případném ručním promíchávání vody.

### Úkol:

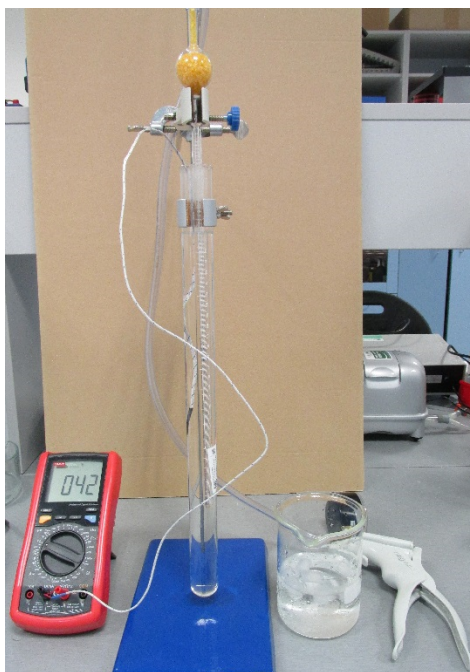
1. Ověřte stavovou rovnici ideálního plynu pro konstantní teplotu.
2. Ověřte stavovou rovnici ideálního plynu pro konstantní objem.
3. Ověřte stavovou rovnici ideálního plynu pro konstantní tlak.

### Bezpečnostní pokyny:

- Plynový teploměr obsahuje rtuť, zacházejte s ním proto obezřetně a vyhněte se jeho poškození.
- Při zacházení s horkou vodou používejte ochranné pomůcky a dbejte bezpečnosti.
- Chraňte multimetr před kontaktem s vodou.

### Pomůcky:

sestava na měření vlastností ideálního plynu (stojan, svorky, plynový teploměr spojený hadičkou s ruční vakuovou pumpou, velká zkumavka), multimetr UNI-T s teplotním čidlem, rychlovarná konvice, 600ml kádinka, led



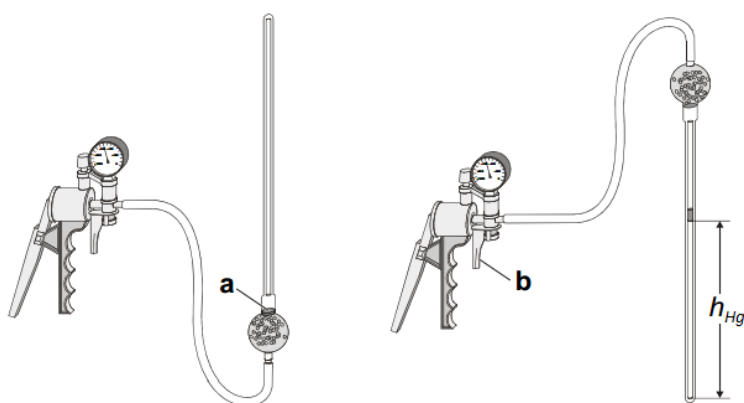
Obrázek 5.4: Sestava na měření vlastností ideálního plynu

### Postup:

#### *Část 1*

- 1) Zkontrolujte sestavu podle obrázku 5.4. Ujistěte se, že máte všechny díly jak z obrázku, tak ze seznamu pomůcek.
- 2) Připravte plynový teploměr k experimentu:

- a. Otočte teploměr rtuť nahoru (viz obrázek 5.5, a), dejte přitom pozor, aby se krystalky, jež se uvolnily z rozšířené části, nedostaly do vakuové pumpy. Začněte pumpovat, v teploměru tak začne vznikat podtlak a rtuť se začne uvolňovat a padat po kapkách dolů.
- b. Opatrně sklepejte všechny kapky rtuť na bílý špunt (obrázek 5.5, a). Až bude veškerá rtuť na bílém špuntu, nechte teploměr ve stejné poloze a uvolněte podtlak pomocí ventilu na spodní části vakuové pumpy (obrázek 5.5, b). Poté vytvořte podtlak právě 500 mbar.
- c. Obráťte plynový teploměr vzhůru nohama (částí s krystaly nahoru, obrázek 5.5 vpravo), pokud se uvolnily nějaké krystalky, sklepejte je do skleněné části.
- d. Pomocí ventilu na spodní části vakuové pumpy uvolněte podtlak v teploměru až na atmosférický tlak. Kapka rtuť by se měla jednoduše posunout po stupnici směrem dolů. Pokud se vám kapka rozdělila na více částí, opakujte postup od bodu a.



Obrázek 5.5: Kolekce rtuť v plynovém teploměru a uvolňování podtlaku

- 3) Určete hodnotu tlaku v místnosti. Pokud nemáte přístup k zařízení, měřicímu tlak, využijte hodnoty zjištěné dne 4. 2. 2015,  $p_0 = 1012,47$  hPa.
- 4) Zapište si hodnotu výšky  $h_{Hg}$  (výška spodní části rtuťové kapky).
- 5) Vakuovou pumpou vytvořte v plynovém teploměru podtlak přibližně 100 mbar, zapište si hodnotu podtlaku  $p$  v plynovém teploměru, kterou odečtete na budíku vakuové pumpy (obrázek 5.6) do tabulky 5.1. (Všimněte si, že hodnota podtlaku je na budíku uvedena v jednotkách mbar. Před výpočty proto nezapomeňte naměřené hodnoty převést na hPa.) Zapište si hodnotu výšky  $h$ , do které vystoupala rtuťová kapka.





Obrázek 5.6: Budík vakuové pumpy

- 6) Postup z kroku 5 opakujte pro další hodnoty podtlaku. Celkem udělejte dvanáct různých měření (krok cca po 50 mbar). Výsledky zapisujte do tabulky 5.1.
- 7) Z těchto dat vytvoříte ve vašem protokolu graf závislosti objemu na tlaku při konstantní teplotě, tedy izotermu.

### Část 2

- 8) Opakujte krok 2 – příprava plynového teploměru k experimentu.
- 9) Do 600ml kádinky napusťte cca 5 cm studené vody z vodovodu, do vody nasypejte 17 kostek ledu.
- 10) V tomto experimentu používáte multimetr s teplotním čidlem, multimetr chraňte před vodou. Multimetr zapnete žlutým tlačítkem POWER (viz obrázek 5.7), otočným knoflíkem zvolte měření v °C. Teplotní čidlo zapojte podle obrázku 5.7 vpravo – černý kolík do druhé zdířky, červený kolík do třetí zdířky multimetru.



Obrázek 5.7: Multimetr UNI-T UT76A a zapojení teplotního čidla

- 11) V rychlovarné konvici uvařte přibližně 400 ml vody.
- 12) Zahřátou vodu nalijte do velké zkumavky upevněné svorkou na stojanu. Výška vodního sloupce by měla dosahovat maximálně do výšky 10 cm pod okraj zkumavky.



- 13) Do připravené druhé svorky vsuňte plynový teploměr. Nastavte svorku tak, aby byla mezi svorkou a okrajem zkumavky mezera pro vhazování kostek ledu (cca 4 cm).
- 14) Do zkumavky zaveďte teplotní sondu, jejíž hrot umístěte do výšky středu vzduchového sloupce v plynovém teploměru.
- 15) Počkejte přibližně minutu, než se poloha rtuťové kapky v teploměru ustálí – zahříváním byla vytlačena do výšky  $h_0$  – zapište si hodnotu (výška spodní části rtuťové kapky), zapište si též hodnotu teploty  $t_0$ , obojí do tabulky 5.2.
- 16) Do zkumavky vhodte jednu kostku ledu, pomocí teplotní sondy promíchejte vodu ve zkumavce a počkejte, než se teplota ustálí.
- 17) Za ustálenou teplotu vody považujeme stav, kdy teplota vody ve výšce, kde je rtuťová kapka, a ve výšce, kde končí vzduchový sloupec (spodní hrana teploměru), jsou shodné.
- 18) Zapište hodnotu teploty  $t$  ve zkumavce. Zapište výšku rtuťové kapky  $h_p$  (výška při konstantním tlaku).
- 19) Vhodte další kostku ledu a pokračujte podle kroků 16 až 19.
- 20) Jakmile dosáhnete ve zkumavce teploty  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , začněte v každém kroku přidávat dvě kostky ledu, pokud vám kostky ledu dojdou, můžete vlévat studenou vodu, která z ledů zbyla.
- 21) Celkem provedte 15 měření nebo tolik měření, kolik bude s ohledem na objem vody ve zkumavce možno provést.
- 22) Sestavu rozeberte a vodu vylijte do rychlovarné konvice. Zbylý led je možné použít při dalším měření.
- 23) Za znalosti vnitřního poloměru plynového teploměru  $d = 2,7\text{ mm}$  a předpokladu, že vnitřní prostor tohoto teploměru je dokonalý válec, spočítejte z naměřených hodnot výšek hodnoty objemu  $V$  v každém měření. Tyto hodnoty uveďte v protokolu v přehledné tabulce a použijte ve výpočtech.
- 24) Z těchto dat vytvoříte ve vašem protokolu graf závislosti teploty na objemu při konstantním tlaku (použijte hodnoty  $T$  a  $V$ , kde  $T$  je teplota v Kelvinech).

### Část 3

- 25) Opakujte body 8 až 14.
- 26) Počkejte přibližně minutu, než se poloha rtuťové kapky v teploměru ustálí – zahříváním byla vytlačena do výšky  $h_0$  – zapište si hodnotu (výška spodní části rtuťové kapky), zapište si též hodnotu teploty  $t_0$  a tlaku  $p_0$ , obojí do tabulky 5.3.

- 27) Do zkumavky vhoďte jednu kostku ledu, pomocí teplotní sondy promíchejte vodu ve zkumavce a počkejte, než se teplota ustálí (viz bod 17).
- 28) Zapište hodnotu teploty  $t$  ve zkumavce. Poté pomocí ventilu vyrovnejte tlaky v teploměru (stlačte ventil a držte, dokud se rtuť neustálí). Následně vakuovou pumpou odčerpajte tlak tak, aby rtuťová kapka vystoupala zpět do výšky  $h_0$ . Zapište hodnotu podtlaku v plynovém teploměru  $p_V$  (spočítáte tlak při konstantním objemu).
- 29) Vhoďte další kostku ledu a pokračujte podle kroků 27 až 29.
- 30) Jakmile dosáhnete ve zkumavce teploty  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , začněte v každém kroku přidávat dvě kostky ledu, pokud vám kostky ledu dojdou, můžete vlévat studenou vodu, která z ledů zbyla.
- 31) Celkem proveďte 15 měření nebo tolik měření, kolik bude s ohledem na objem vody ve zkumavce možno provést.
- 32) Vyjměte opatrně plynový teploměr ze svorky, teploměr osušte a odložte. Vodu z velké zkumavky vylijte do umyvadla, nádoby nechte uschnout.
- 33) Z dat vytvoříte ve vašem protokolu graf závislosti teploty na tlaku při konstantním objemu (použijete hodnoty  $T$  a  $p_A$ , kde  $T$  je teplota v Kelvinech a  $p_A = p_0 - p_V$ ).
- 34) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data, výpočty a tři grafy (měření pro konstantní teplotu, pro konstantní plyn a pro konstantní objem).
- 35) Na závěr shrňte výsledky svého snažení, vypočítejte a diskutujte chyby měření.

Tabulka 5.1: Tabulka pro zápis hodnot pro měření při konstantní teplotě

Podtlak $p$ (mbar)	Výška $h$ (cm)	Podtlak $p$ (mbar)	Výška $h$ (cm)
$p_0 = 0$	$h_{Hg} =$	350	
100		400	
150		450	
200		500	
250		550	
300		600	

Tabulka 5.2: Tabulka pro zápis hodnot pro měření při konstantním tlaku

Číslo měření	Teplota $t$ (°C)	Výška $h_p$ (cm)
1	$t =$	$h_p =$
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Tabulka 5.3: Tabulka pro zápis hodnot pro měření při konstantním objemu

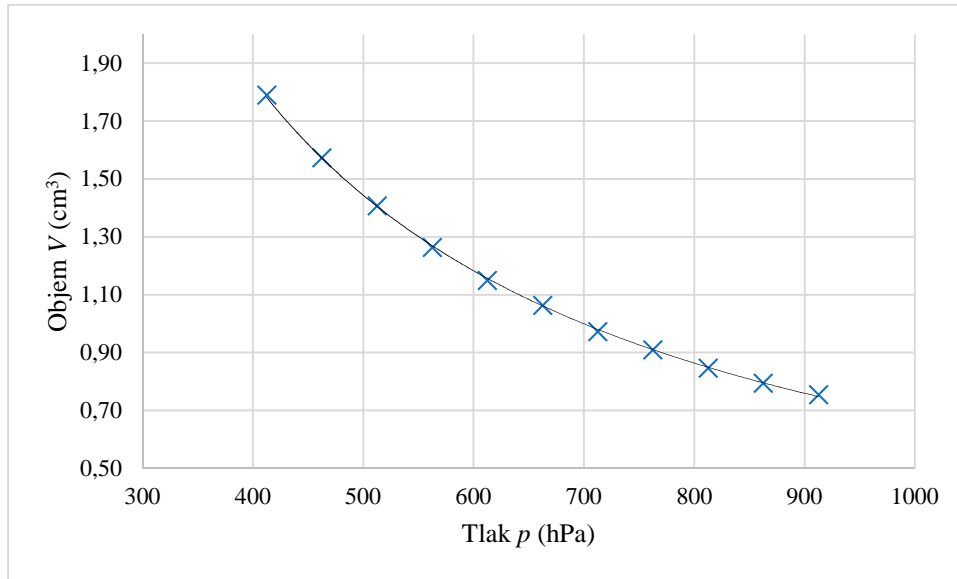
Číslo měření	Teplota $t$ (°C)	Podtlak $p_V$ (mbar)
1	$t =$	$p_V = 0$
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

## 5.5 Kontrolní měření

Tabulka 5.4: Tabulka s naměřenými hodnotami pro měření při konstantní teplotě

Podtlak $p$ (mbar)	Výška $h$ (cm)	Podtlak $p$ (mbar)	Výška $h$ (cm)
$p_0 = 0$	$h_{Hg} = 11,9$	350	18,6
100	13,2	400	20,1
150	13,9	450	22,1
200	14,8	500	24,6
250	15,9	550	27,5
300	17,0	600	31,3

Graf 5.1: Závislost nepřímo úměrné závislosti objemu vzduchu na jeho tlaku



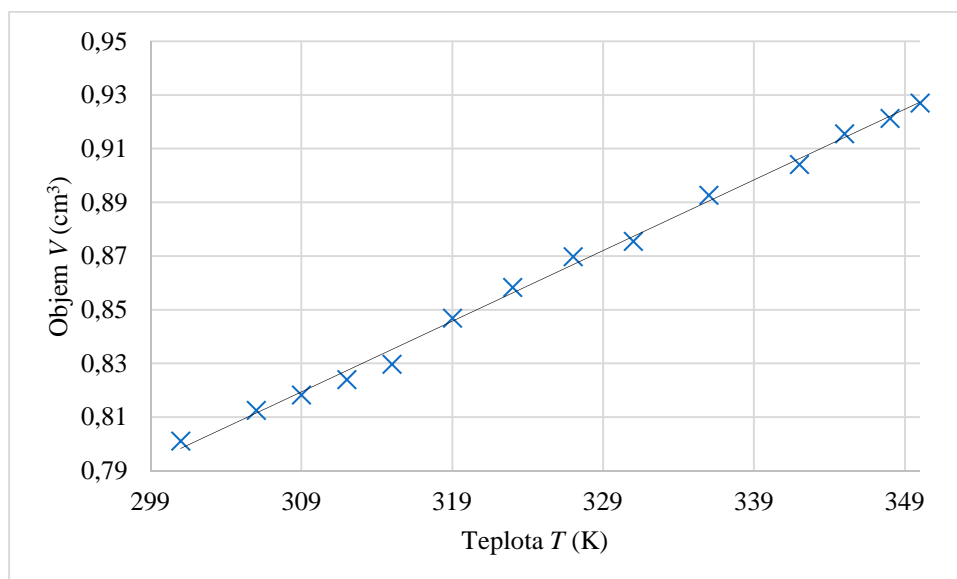
Tabulka 5.5: Tabulka s naměřenými hodnotami pro měření při konstantním tlaku  $p = 1012,47$  hPa

Číslo měření	Teplota $t$ (°C)	Výška $h_p$ (cm)	Objem $V$ (cm <sup>3</sup> )
1	77	16,2	$0,927 \pm 0,002$
2	75	16,1	$0,921 \pm 0,002$
3	72	16,0	$0,916 \pm 0,002$
4	69	15,8	$0,904 \pm 0,002$
5	63	15,6	$0,893 \pm 0,002$
6	58	15,3	$0,876 \pm 0,002$
7	54	15,2	$0,870 \pm 0,002$
8	50	15,0	$0,858 \pm 0,002$
9	46	14,8	$0,847 \pm 0,002$
10	42	14,5	$0,830 \pm 0,002$
11	39	14,4	$0,824 \pm 0,002$
12	36	14,3	$0,818 \pm 0,002$
13	33	14,2	$0,813 \pm 0,002$
14	28	14,0	$0,801 \pm 0,002$

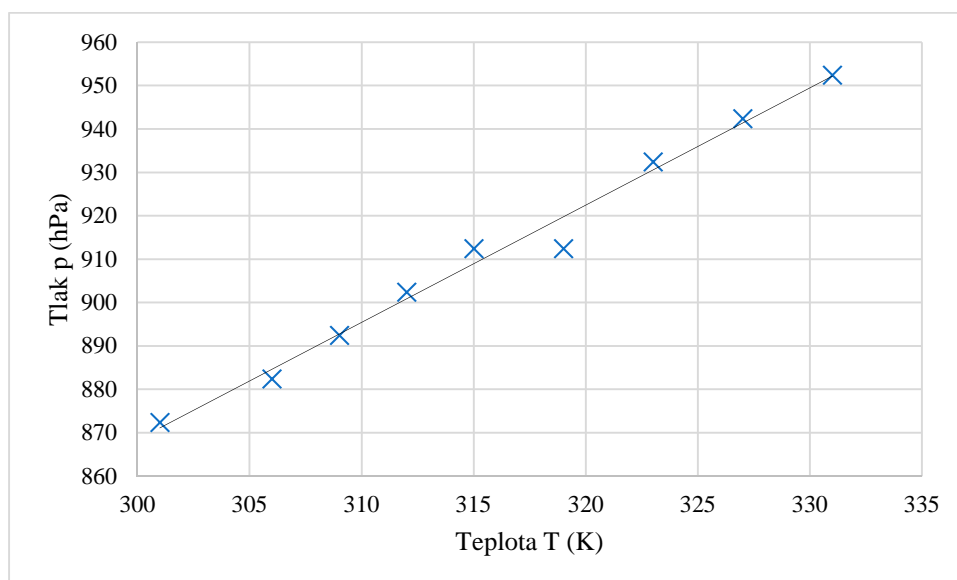
Tabulka 5.6: Tabulka s naměřenými hodnotami pro měření při konstantním objemu  $V = 0,93$  cm<sup>3</sup>

Číslo měření	Teplota $t$ (°C)	Podtlak $p_V$ (mbar)	Tlak $p_A$ (hPa)
1	77	nelze změřit	-
2	75	nelze změřit	-
3	72	nelze změřit	-
4	69	nelze změřit	-
5	63	nelze změřit	-
6	58	60	$952 \pm 7$
7	54	70	$942 \pm 7$
8	50	80	$932 \pm 7$
9	46	100	$912 \pm 7$
10	42	100	$912 \pm 7$
11	39	110	$902 \pm 7$
12	36	120	$892 \pm 7$
13	33	130	$882 \pm 7$
14	28	140	$872 \pm 7$

Graf 5.2: Graf přímo úměrné závislosti objemu vzduchu na jeho teplotě



Graf 5.3: Graf přímo úměrné závislosti tlaku vzduchu na jeho teplotě



## 5.6 Poznámky pro vyučujícího

Základem úspěchu měření je dostatek připraveného ledu. Pro jednu skupinu pracujících na tomto měření doporučuji mít připraveno dvakrát 17 kostek ledu, celkem tedy 34 kostek. Vhodnější jsou menší kostky, které se vejdu do zkumavky, ve které je po celou dobu měření ponořený plynový teploměr.

Jelikož se v tomto měření pracuje s proudem a vodou, připravte na pracovišti dostatek papírových ubrousků a utěrku. Zároveň dbejte na takové rozložení ostatních měřících sad po učebně, aby toto pracoviště nebylo bezprostředně u přístrojů napájených ze sítě.

## 6 Měření tepelné vodivosti pevných látek

---

### 6.1 Teoretický základ

---

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z teplé části homogenního materiálu do části studenější.

Tepelnou vodivost dané látky charakterizuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Jedná se o materiálovou konstantu, která je zjišťována experimentálně. Součinitel tepelné vodivosti homogenního tělesa lze určit ze známého tepla  $Q$ , které projde za čas  $\tau$  plochou  $S$  do hloubky  $d$  (uvažované ve směru šíření tepla). Výsledný vztah má tvar

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot \tau. \quad (6.1)$$

kde  $\Delta T$  je rozdíl teplot na rovnoběžných površích desky materiálu.

Tepelná vodivost je charakteristická veličina dané látky nepřilíš výrazně závislá na teplotě materiálu. Pro jednoduchost předpokládáme, že  $\lambda$  je pro danou látku konstanta, jejíž hodnotu získáme jako průměr hodnot  $\lambda$  z jistého teplotního intervalu.

Kalorimetrická komora (viz obrázek 6.1) pracuje na principu průchodu tepelného toku vznikajícího uvnitř komory zahříváním topného tělesa skrz měřený materiál, který tvoří vrchní stěnu komory. Vnější plocha materiálu je chlazená tak, aby teplota na této straně materiálu zůstávala co možná nejvíce konstantní, tzn., odvádíme veškeré teplo, které materiálem projde. Nejsnáze dokážeme na materiálu udržet teplotu v rozmezí 0 °C až 4 °C za použití dostatečného množství ledu.

Energii, kterou dodává topné těleso, můžeme označit také jako teplo, tedy  $Q$ . Velikost tohoto tepla lze vypočítat ze znalosti proudu  $I$ , který protéká topným tělesem a napětím  $U$ , jež je v něm indukováno po dobu  $\tau$ . Platí vztah

$$Q = U \cdot I \cdot \tau. \quad (6.2)$$

Teplota uvnitř komory se bude při sepnutém obvodu zvyšovat, a to až do okamžiku, kdy velikost energie uvolňované topným tělesem bude rovna energii, která prochází materiálem a je odváděna ledovým chlazením. Poté bude teplota v komoře setrvávat

na stejných hodnotách. V tento okamžik můžeme vztah (6.2) dosadit do vzorce (6.1). Po úpravě a vyjádření součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  získáme výsledný vztah

$$\lambda = U \cdot I \cdot \frac{d}{S} \cdot \frac{1}{\Delta T}. \quad (6.3)$$

## 6.2 Způsoby měření

---

K měření tepelné vodivosti pevných látek se využívá homogenní tyče vyrobené ze zkoumaného materiálu. Měření může probíhat jedním ze dvou způsobů [1].

Prvním způsobem je vedení tepla tyčí s tepelně izolovaným pláštěm. Při tomto způsobu je tyč po délce izolována od svého okolí, jeden konec tyče je zahříván na zvolenou teplotu, z druhého konce je teplo odebíráno chladičem. Teplota je měřena na dvou místech tyče – u zahříváče a u chladiče. Tepelná vodivost materiálu mezi dvěma konci se vypočítá podle výše uvedených vzorců.

Za druhé je možné měřit vedení tepla tyčí obklopenou prostředím o stálé teplotě. V praxi to znamená, že dlouhá tenká tyč není izolovaná od okolí, které tvoří buď plyn, nebo kapalina, jeden konec tyče zahříván a zbytek tyče je ponechán volně v obklopujícím prostředí. Teplota je měřena termočlánky na více místech tyče. Výpočet teplotní vodivosti probíhá aplikací derivace podle veličiny délky.

## 6.3 Zakoupená sestava

---

Do laboratoře jsme zakoupili sestavu (viz obrázek 6.1) od firmy Helago. Její hlavní součástí je kalorimetrická komora se dvojicí topných těles, sada desek zkoumaných materiálů, multimetr propojitelný s počítačem a zdroj napětí.

### 6.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje kalorimetrickou komoru s topným tělesem, desku materiálu (Fermacell, dřevotřísková nebo polystyren), hák na vyjímání materiálu z otvoru komory, zdroj napětí, propojovací kabely, multimetr s dvěma teplotními sondami, počítač a chladicí část (ledové desky, led, molitan, potravinářská fólie, izolační molitan).

Postup měření experimentu je následující. Měřený materiál se připraví vlepením kontaktních disků a vloží se do otvoru v kalorimetrické komoře. Poté se do materiálu zavedou teplotní sondy. Otvor komory s vloženým materiálem se vodotěsně odizoluje

potravinářskou fólií. Na fólii se nejprve položí sáček s ledovými deskami a poté sáček s ledovými kostkami. Chlazení se zakryje molitanem a pro lepší kontakt s měřeným materiálem se zatíží. V průběhu ustalování teploty na straně chlazení se zapne v počítači program Cassy lab 2. V programu se nastaví sledování hodnot napětí a proudu v elektrickém obvodu, teplot z obou teplotních sond a rozdílu těchto teplot. Teplotní sondy se zkalibrují. Po ustálení teploty materiálu na straně s ledem se spustí měření v Cassy lab 2 a zapne se zdroj napětí – topné těleso začne komoru zahřívat. Po dobu měření (60 min) se kontroluje a zajišťuje stálost teploty na chlazené straně desky a vodotěsnost komory. Po ukončení experimentu se data uloží ve formátu labx a jpg. Z naměřených hodnot se vypočítá součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ .

### 6.3.2 Problémy měření

---

Po dodání sady na měření tepelné vodivosti materiálů bylo mým prvním úkolem nastudovat návody dodané s jednotlivými součástmi. V dodaných návodech nebyla schémata obvodů ani popis nastavení elektrického napětí pro jednotlivá topná tělesa. Pro práci s kalorimetrickou komorou bylo také nutné nainstalovat a prostudovat software Cassy lab 2.

Dodaná vodivá pasta určená k lepení hliníkových desek k měřenému materiálu po aplikaci částečně zatvrdla a způsobila ještě horší přilnavost těchto materiálů.

Při samotném měření podle dodaných návodů jsem dostávala špatné výsledky. Bylo to způsobeno nedostatečným chlazením komory. Podle návodů, ve kterých byly na toto téma jen ilustrační obrázky, se mělo použít malé množství ledu, ale experimentálně bylo toto množství nedostatečné.

### 6.3.3 Aplikované úpravy měření

---

Zapojení elektrického obvodu jsem ze znalostí základní elektroniky odvodila a do návodu jsem vytvořila přehledné schéma. Prostudovala jsem samostatné návody pro jednotlivé součástky a dohledala informace na webových stránkách výrobce. [10] Software Cassy lab 2 jsem nainstalovala do školního počítače a prostudovala jsem si jeho nastavení a ovládání. Proces nastavení pro měřený experiment jsem nafotila (print screen) a podrobně okomentovala v návodu.

Navrhla jsem používat vodivou pastu pouze pro vlepení kontaktních disků do otvorů v měřeném materiálu. Aby bylo docíleno co nejlepšího vedení tepla mezi hliníkovými



deskami a materiálem, přidala jsem do otvoru v kalorimetrické komoře měkký izolační materiál (modrý teplu odolný molitan na obrázku 6.5) a do návodu dopsala, že je potřeba celý systém zatížit.

Problém s chlazením jsem řešila v několika krocích. Nejprve zvětšením objemu ledových kostek oproti objemu navrhovaném v dodaném návodu, poté přidáním izolačního materiálu – molitanu. Nakonec jsem využila formu, která byla součástí příslušenství ke komoře. Tato forma slouží k výrobě dalších desek, jejichž tepelnou vodivost bychom chtěli pomocí kalorimetrické komory měřit. Forma je vytvořena tak, aby v materiálu vznikla drážka pro teplotní sondu a aby materiál měl rozměry odpovídající otvoru v komoře, tedy 15 cm x 15 cm. Pomocí této formy lze vytvořit ledovou desku o výšce přibližně 0,7 cm. Tato ledová deska chladí měřený materiál po celé vnější ploše, čímž se chlazení velmi zefektivní. Jelikož je však doba měření experimentu 60 minut, ledová deska se v průběhu měření rozpustila a opět se objevovaly problémy s udržením nízké teploty na vrchní straně materiálu.

Proto jsem vytvořila vlastní formu, fotografie je na obrázku 6.1. Její vnitřní rozměry jsou 15 cm x 15 cm x 4 cm, lze v této formě tedy vytvořit ledovou desku o tloušťce až 4 cm. Aby bylo možné měření během jednoho dne opakovat, vytvořila jsem tyto formy dvě.



Obrázek 6.1: Formy vlastní výroby na ledové desky

### Úkol:

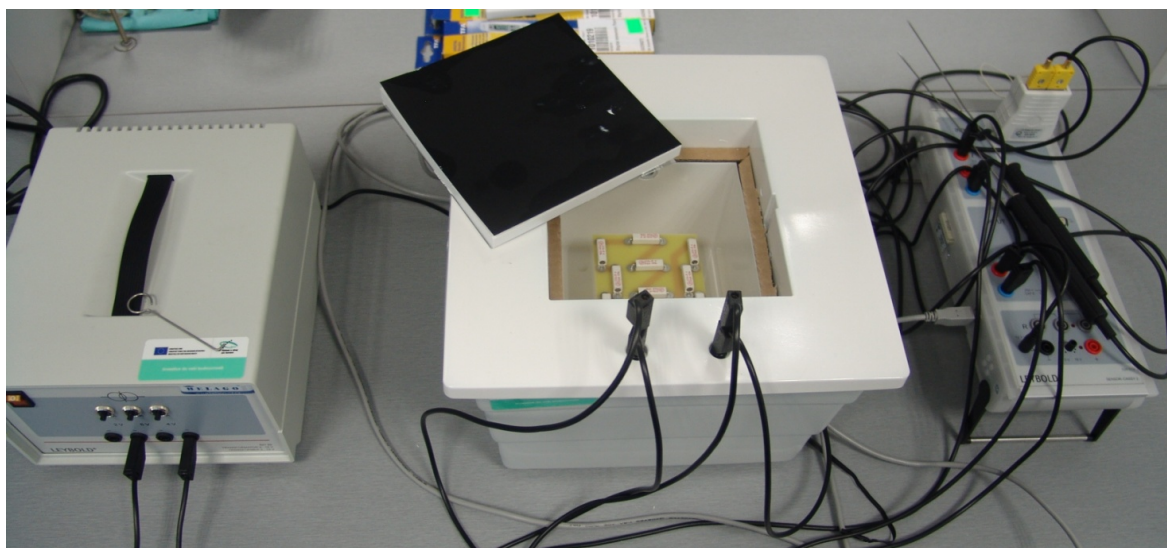
1. Určete součinitel tepelné vodivosti Fermacellu, dřevotřísky či polystyrenu.

#### Bezpečnostní pokyny:

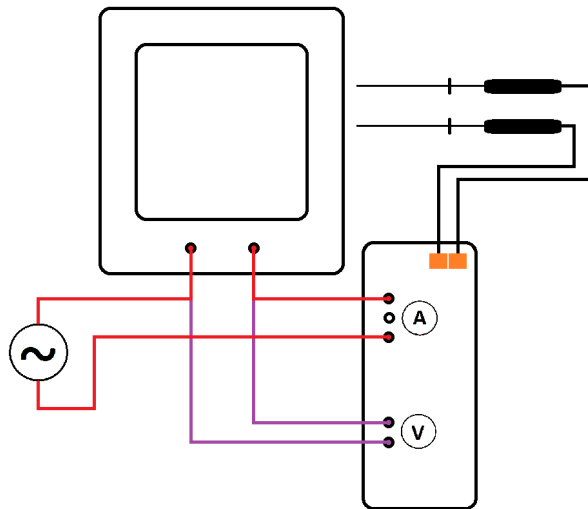
- Topné těleso uvnitř komory se zahřívá na vysoké teploty. Vyhněte se kontaktu s tělesem.
- Při zacházení s ledem a vodou v blízkosti elektrického obvodu dbejte zvýšené opatrnosti.
- Chraňte multimetr před kontaktem s vodou.
- S teplotními sondami zacházejte tak, aby se kovové části neohnuly.
- V určených časových intervalech kontrolujte chlazení, zda voda neprotéká do komory.

#### Pomůcky:

sestava na měření tepelné vodivosti stavebních materiálů (zdroj střídavého napětí, kalorimetrická komora s topným tělesem, multimetr s teplotními sondami, propojovací kabely, viz obr. 6.2), vzorek stavebního materiálu, dvě hliníkové desky z jedné strany černé, dva kontaktní disky, ledové kostky a desky, ochranné potravinářské fólie, pytle na led, molitan, zatěžovací desky, odměrný válec o objemu 100 ml, počítač



Obrázek 6.2: Fotografie sestavy na měření tepelné vodivosti stavebních materiálů



Obrázek 6.3: Schéma sestavy na měření tepelné vodivosti stavebních materiálů

**Postup:**

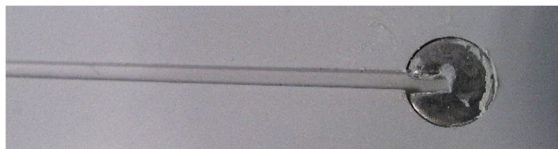
- 1) Zkontrolujte sestavu na měření dle obrázku 6.2. Ujistěte se, že máte všechny díly.
- 2) Zkontrolujte (sestavte) obvod podle schématu na obrázku 6.3. Nechte si zkontrolovat obvod vyučujícím. Nezapínejte zdroj napětí, dokud tak nebude napsáno v tomto postupu.
- 3) Zapněte počítač.
- 4) Zapojte multimetr síťovým kabelem do zásuvky a USB kabelem do počítače. Správnost zapojení značí jedno zelené a čtyři červená světla na multimetru (viz obrázek 6.4)



Obrázek 6.4: Osvětlení multimetru připojeného k počítači

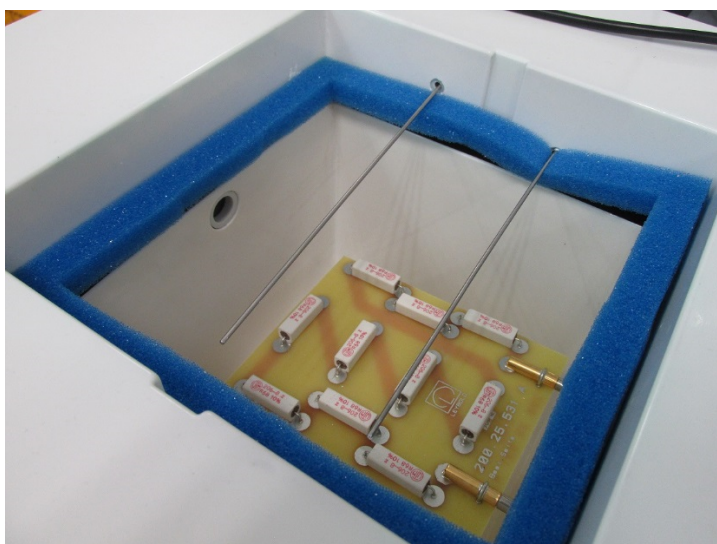
- 5) Jeden ze dvojice připraví stavební materiál a komoru:

1. Vezměte měřený stavební materiál, z jedné strany aplikujte trochu vodivé pasty do prohlubně určené pro kontaktní disk. Vložte kontaktní disk do prohlubně tak, aby drážka v disku navazovala na drážku v materiálu (obrázek 6.5)



Obrázek 6.5: Pozice kontaktního disku ve stavebním materiálu

2. Přiložte na stavební materiál hliníkovou desku tak, že černá strana bude vidět (bude na vrchu).
3. Opakujte postup i pro druhou stranu stavebního materiálu.
4. Stavební materiál vložte do otvoru kalorimetrické komory tak, že drážky v materiálu budou na stejné straně, jakou jsou vstupy pro teplotní sondy v komoře (obrázek 6.6).



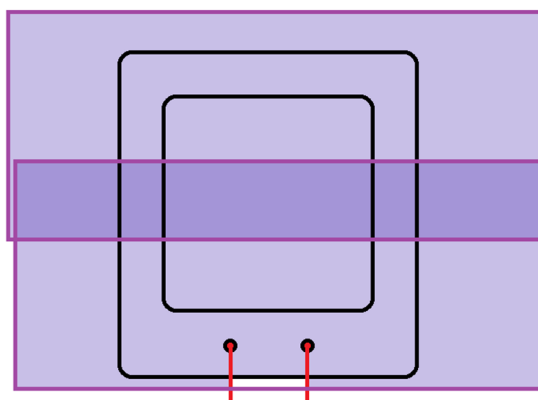
Obrázek 6.6: Umístění vstupů pro teplotní sondy v materiálu a ve stěně komory

5. Do připraveného materiálu zasuňte opatrně teplotní sondy. Pokud bude potřeba, zatlačte na materiál či si pomozte nadzvednutím připraveného materiálu kovovým háčkem (obrázek 6.7).



Obrázek 6.7: Kovový háček pro vyjmutí stavebního materiálu

6. Stavební materiál zakryjte dvěma pruhy potravinové fólie tak, aby případná voda z chladicího ledu nemohla protéct do komory ani ke kontaktům přívodních kabelů. Překryjte dva pruhy fólie podle nákresu na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Schéma zakrytí kalorimetrické komory potravinovou fólií

6) Druhý ze dvojice připraví led:

7. Za pomoci vyučujícího dojděte do kuchyňky a z mrazáku vyndejte led. Budete potřebovat jednu ledovou desku v dřevěné formě a přibližně dvě hrsti ledových kostek.
8. Ledovou desku v sáčku vytáhněte z formy a zabalte ještě do jednoho sáčku.
9. Ledové kostky vložte do dalšího sáčku a zavažte jej tak, aby uvnitř nezůstal téměř žádný vzduch. Celkem tedy budete mít dva balíčky.
10. S balíčky přistupte ke komoře, která je již zakrytá potravinovou fólií.
11. První položte na měřený materiál ledovou desku. Pokud se při vyndávání z formy deska rozbila, poskládejte ji na materiál jako puzzle, aby zakrývala celý povrch desky. Na sáček s deskou poté položte sáček s kostkami ledu.
12. Oba balíčky pokládejte tak, že uzly na balíčcích (pořádně utažené) budou směřovat do strany, ne směrem vzhůru, abychom docílili nejefektivnějšího chlazení.
13. Led zakryjte molitanem a zatíže zatěžovacími deskami.



- 7) Na počítači spusťte program Cassy lab 2 a postupujte podle návodu pro obsluhu softwaru (návod na obsluhu softwaru Cassy lab 2 následuje za bodem 24 aktuálního návodu).
- 8) Vyčkejte, než teplota na chlazené straně stavebního materiálu klesne na rozmezí  $0\text{ °C} - 3\text{ °C}$ .
- 9) Jakmile docílíte dané teploty, zapněte zdroj napětí, na kterém nastavíte 12 V.
- 10) Zapište si reálné hodnoty napětí  $U$  a proudu  $I$ , které udává program Cassy lab 2. Podle vztahu  $P = U \cdot I$  vypočítejte výkon topného tělesa.
- 11) Nechte zdroj napětí spuštěný.
- 12) V průběhu měření neustále kontrolujte teplotu chlazené strany stavebního materiálu. Pokud se teplota začne zvyšovat, upravte umístění ledu na materiálu tak, aby se zvětšila kontaktní plocha mezi materiálem a ledem. Případně upravte polohu molitanu, či zatěžovacích desek.
- 13) Při kontrole teploty též zkontrolujte, zda z pytlů s ledy neuniká voda. Při jakémkoli podezření, že voda uniká pod potravinovou fólii, vypněte okamžitě zdroj napětí. Zavolejte vyučující a poté použijte papírové utěrky k vysušení vody.
- 14) Konec měření byl experimentálně určen na 60 minut. Po uběhnutí této doby (odpočítávání zajišťuje software Cassy lab 2) vypněte zdroj napětí.
- 15) Uložte vámi naměřená data na plochu počítače ve tvaru `Prijmeni1_Prijmeni2__material_den-mesic-rok`. Vyfoťte vámi naměřená data pomocí klávesy `PrtSc` – `print screen` – a uložte obrázek pomocí programu Malování opět na plochu pod stejným jménem jako soubor z Cassy lab 2. Program nevyvínejte.
- 16) Pro jistotu si data zkopírujte také na flash disk či do emailu.
- 17) Po uložení souboru vypněte multimetr vypojením ze sítě.
- 18) Ukliděte led – dle stavu (zkonzultujte s vyučujícím) jej vraťte do mrazáku, či vložte do umyvadla v laboratoři.
- 19) Pokud je třeba, vysušte pracovní stůl a soupravu na měření.
- 20) Sejměte z kalorimetrické komory potravinovou fólii a za použití kovového háčku vyjměte stavební materiál, aby teplo z komory mohlo odejít.
- 21) Vraťte se k počítači s otevřeným programem Cassy lab 2 a vašimi naměřenými daty.
- 22) V levé části okna je tabulka naměřených hodnot. Sjedťte posuvníkem na konec tabulky a posunutím doprava najděte poslední hodnotu rozdílu teplot mezi sondami  $\Delta T_{A1}$ . Hodnotu si zapište.
- 23) Pomocí vztahu

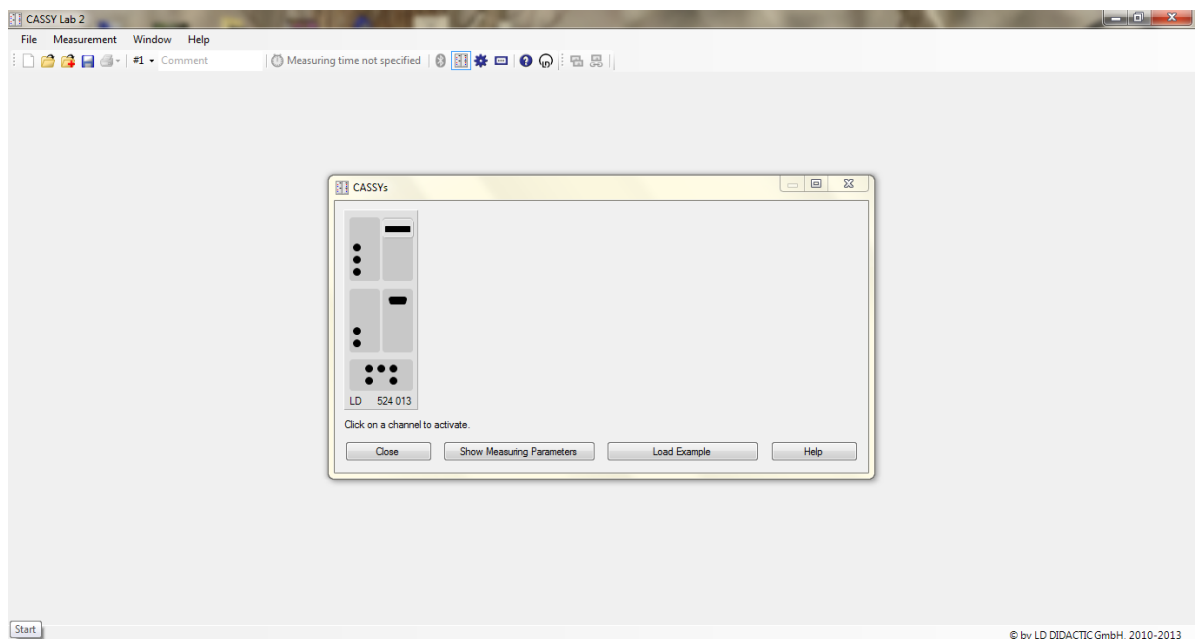
$$\lambda = U \cdot I \cdot \frac{d}{S} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

a znalosti rozmětů  $S = 0,0225 \text{ m}^2$  a  $d = 0,01 \text{ m}$  určete součinitel teplotní vodivosti materiálu  $\lambda$ .

- 24) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data ve formě získaného grafu a výpočty součinitele teplotní vodivosti  $\lambda$ . Na závěr shrňte výsledky svého snažení, porovnejte je s tabulkovými hodnotami (lze dohledat na internetu). Vypočtete chybu měření a diskutujte možnosti, kterými mohly chyby vzniknout.

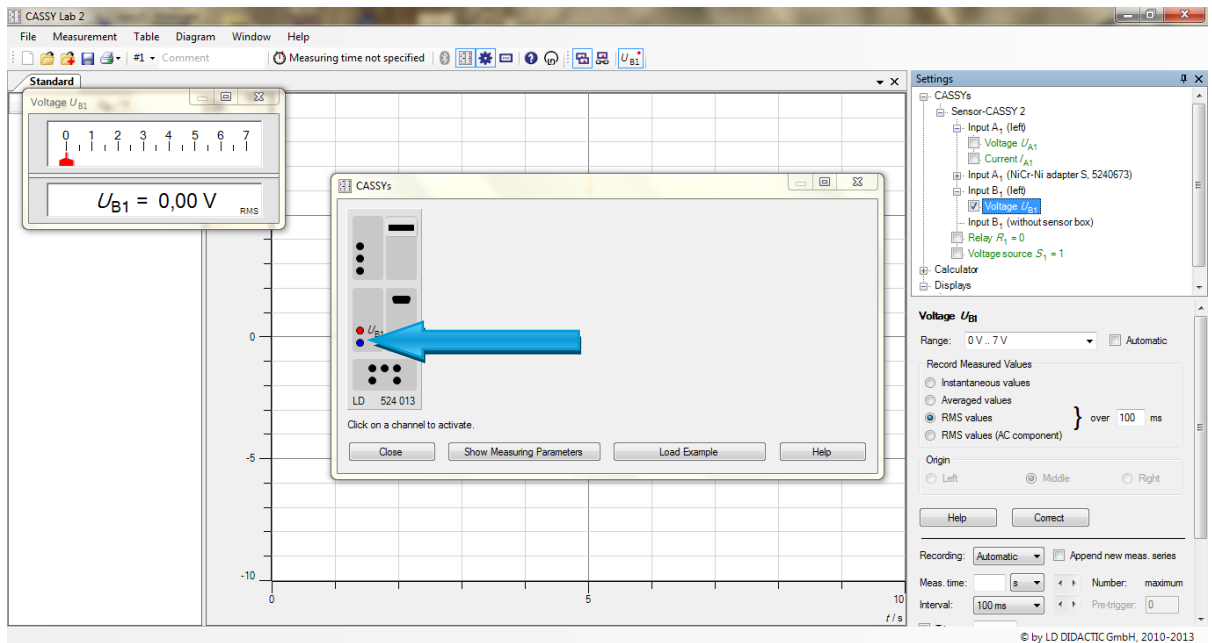
### Návod na obsluhu softwaru Cassy lab 2:

- Po spuštění programu uvidíte na svém monitoru základní pracovní prostředí Cassy lab 2 a okno nazvané CASSYs, na kterém je schéma multimetru (obrázek 6.9).



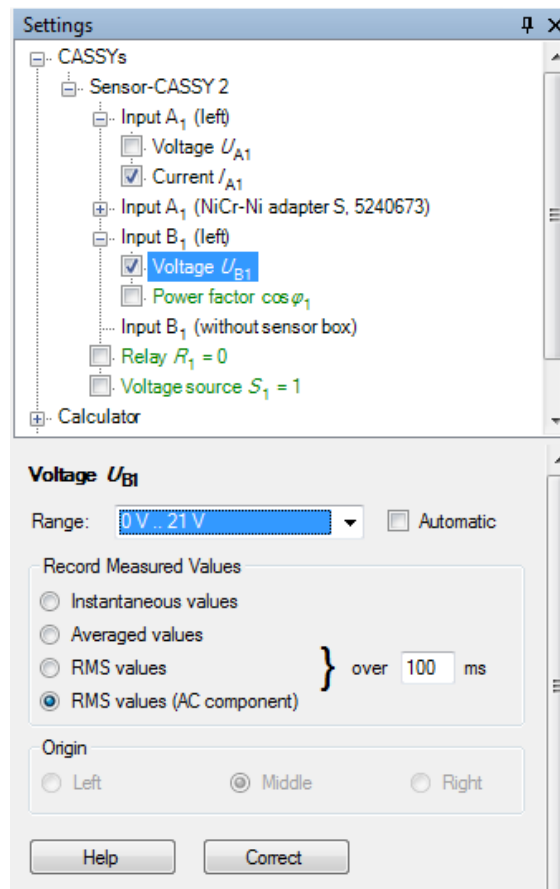
Obrázek 6.9: Základní pracovní prostředí Cassy lab 2 s okénkem CASSYs

- Na schématu klikněte na místo, které v našem obvodu představuje voltmetr.



Obrázek 6.10: Výběr měřených dat - voltmetr

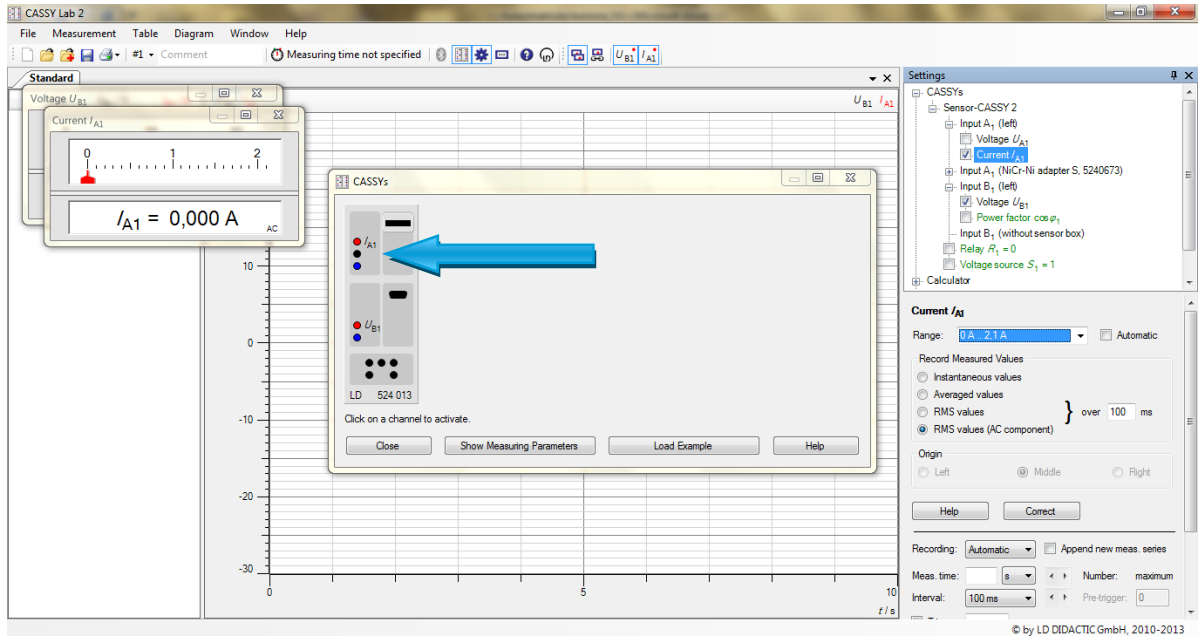
3. V pravé části okna je nastavení pro zvolený vstup. Nastavte Range na 0V..21V a Record Measured Values na RMS values (AC component). Zkontrolujte nastavení podle obrázku 6.11.



Obrázek 6.11: Nastavení měření voltmetrem

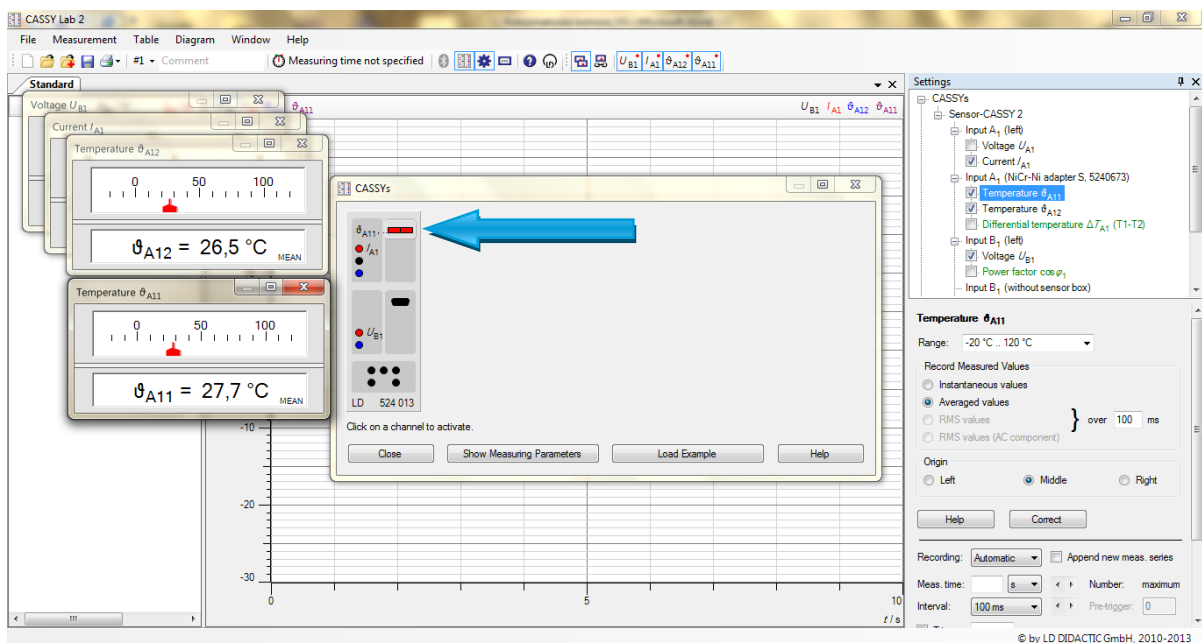


4. Na schématu klikněte na místo, které v našem obvodu představuje ampérmetr.



Obrázek 6.12: Výběr měřených dat – ampérmetr, nastavení měření

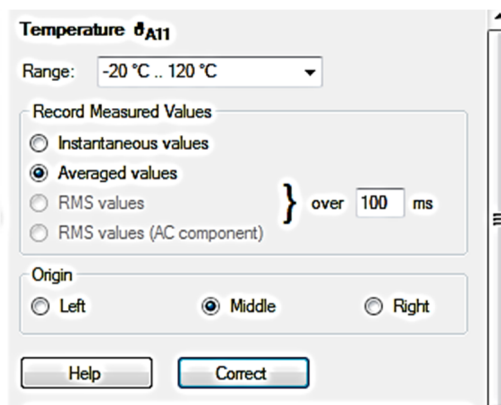
5. V pravé části okna je nastavení pro zvolený vstup. Nastavte Range na 0V..2,1A a Record Measured Values na RMS values (AC component). Zkontrolujte nastavení podle obrázku 6.12.
6. Na schématu klikněte na místo, které v našem obvodu představuje místo zapojení teplotních čidel. Kliknutím na pravou část zvolíte pravé teplotní čidlo, analogicky pak zvolíte levé kliknutím na levou část.



Obrázek 6.13: Výběr měřených dat - teplotní sondy, nastavení měření

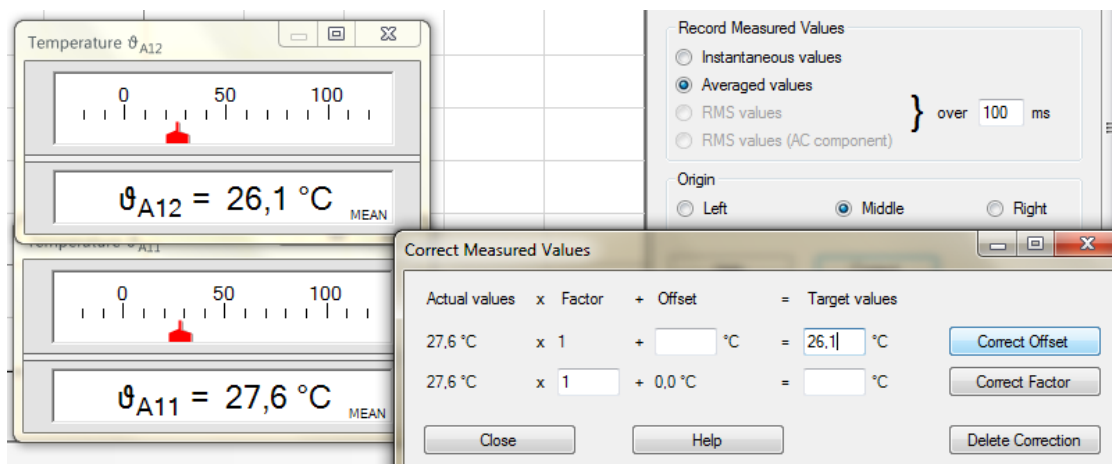
7. Zkalibrujte teplotní sondy následujícím způsobem:

- a. Do odměrného válce natočte vodu z vodovodu.
- b. Vložte obě teplotní sondy do válce tak, že jsou potopené pouze kovové části. Nepotápějte plastové části.
- c. V pravé části okna Cassy lab 2 vidíte nastavení teplotní sondy  $\vartheta_{A11}$ . Klikněte na tlačítko Correct (viz obrázek 6.14).



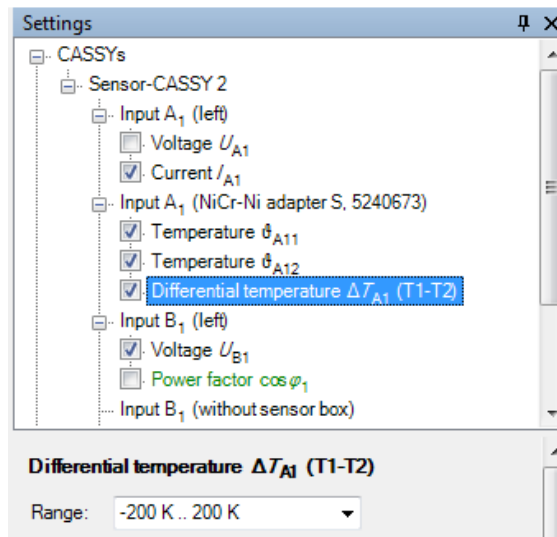
Obrázek 6.14: Nastavení teplotních sond

- d. V okně Correct measured values se zobrazuje teplota naměřená danou sondou. Pro kalibrování vepište do prvního políčka teplotu udávanou druhou teplotní sondou a potvrďte kliknutím na tlačítko Correct Offset. Poté okno zavřete kliknutím na tlačítko Close.



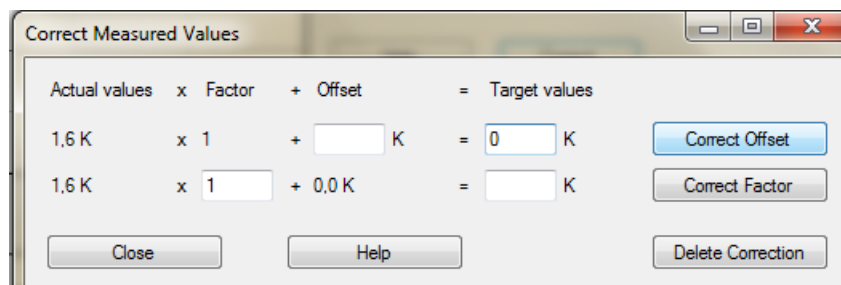
Obrázek 6.15: Korekce teplotních sond

8. Zaškrtnutím políčka Differential temperature zvolíte zobrazování rozdílu teplot mezi sondami (obrázek 6.16).



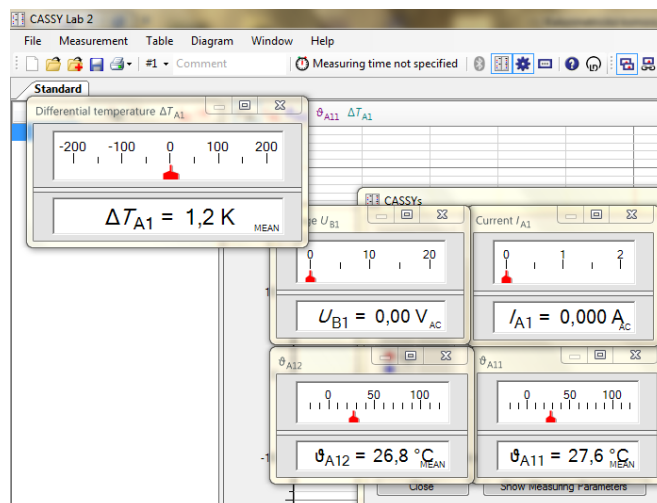
Obrázek 6.16: Volba zobrazování rozdílu teplot

9. V oblasti nastavení zvolte Correct a hodnotu změňte na 0 K stejným postupem, jakým jste nastavovali teplotní čidlo.




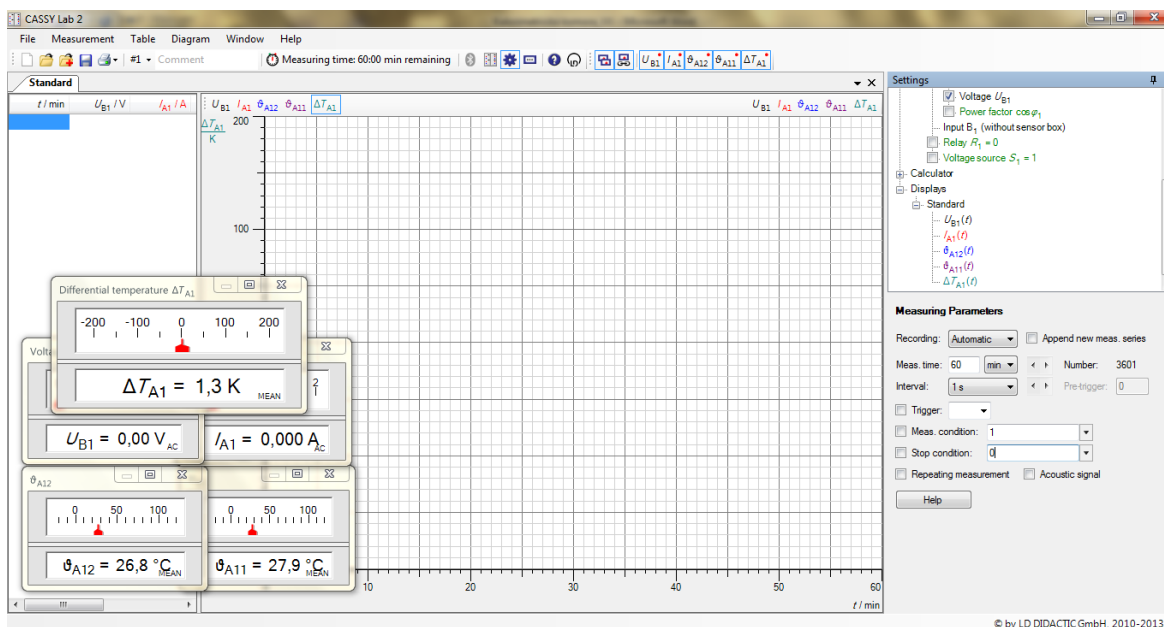
Obrázek 6.17: Korekce rozdílu teplot

10. V tuto chvíli byste měli mít pět různých měřených (či počítaných) veličin – tedy pět oken, viz obrázek 6.18.




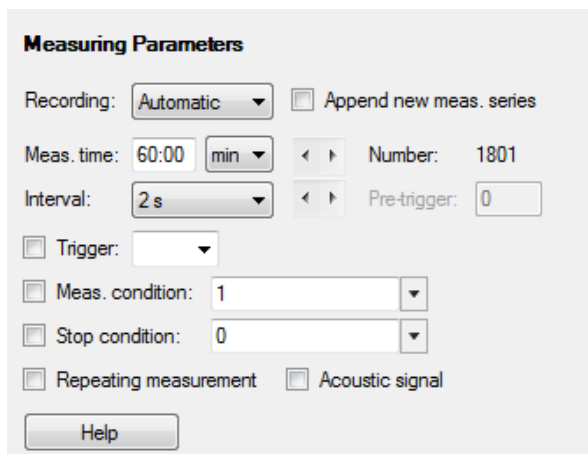
Obrázek 6.18: Okna s měřenými veličinami

11. Upravte velikost oken a seřadte je tak, aby byla co nejlíže u sebe, a vy jste dobře viděli všechny hodnoty. Po seřazení okna sepněte dohromady kliknutím na ikonku , která se nachází na liště voleb. Okna přesuňte tak, abyste dobře viděli na graf, který se bude vykreslovat na mřížce (obrázek 6.19).



Obrázek 6.19: Náhled programu Cassy lab 2 připraveného na spuštění měření

12. Zavřete úvodní okno se schématem multimetru kliknutím na křížek v pravém horním rohu.
13. Pravým tlačítkem myši klikněte na tlačítko  **Measuring time not specified**, které se nachází na liště voleb.
14. V oblasti nastavení parametrů (vpravo, kde jste nastavovali napětí a proud) zvolte Measurement time **60 min** a Interval **2s** (obrázek 6.20).



Obrázek 6.20: Nastavení Measurement time

15. Pro spuštění měření klikněte levým tlačítkem na  Measuring time: 60:00 min remaining

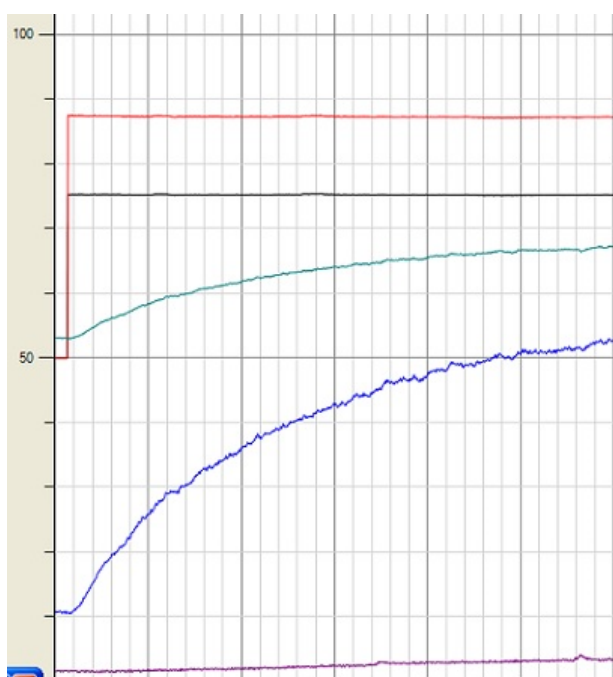
Nastavený čas se odpočítává, vidíte tedy, kolik času zbývá do konce měření.

16. Pokračujte bodem 9 v předchozím návodu.

## 6.5 Kontrolní měření

Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty (Cassy lab 2)

Materiál	Napětí $U$ (V)	Proud $I$ (A)	Teplota na první sondě $\vartheta_{A11}$ (°C)	Teplota na druhé sondě $\vartheta_{A12}$ (°C)	Rozdíl teplot $\Delta T$ (K)	Vypočtená hodnota součinitele teplotní vodivosti $\lambda$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
Polystyren	10,84	1,60	54,40	3,50	50,90	0,15



Obrázek 6.21: Programem Cassy lab 2 vykreslený graf popisující časový průběh měřených veličin - napětí (černě), proud (červeně), teplota na první sondě (modře), teplota na druhé sondě (fialově), rozdíl teplot (zeleně)

## 6.6 Poznámky pro vyučujícího

Minimálně jeden den před plánovaným měřením je nutné připravit do mrazáku formy na led. Připravte jednak ledové kostky, jedna běžná forma stačí, jednak ledové desky. Ledové desky vytvoříte použitím vyrobených forem. Vodu nejprve nalijte do sáčku vhodného do mrazáku, poté vložte do formy a upravte tak, aby sáček kopíroval vnitřní tvar formy. Pro jedno měření stačí jedna ledová deska, pro jistotu však můžete do mrazáku připravit obě formy.

Vzhledem k tomu, že v komoře je topné těleso, kterým prochází proud, apelujte na studenty, aby byli při zacházení s ledem opatrní a pečlivě hlídali, zda voda z tajícího ledu nevniká do komory.

## 7 Studium funkce solárního kolektoru

---

### 7.1 Teoretický základ

---

V dnešní době stále více zesiluje tlak na využití obnovitelných zdrojů tepla. K těmto zdrojům patří i Slunce.

Energii ze slunce, neboli sluneční (solární) energii, lze využívat jednak pasivně a jednak aktivně. Pasivním využitím solární energie je myšlena interakce mezi slunečním zářením a předměty či budovami, kdy se k přenosu energie nevyžaduje žádná aktivní součást. Oproti tomu při aktivním využití solární energie je potřeba systému dodávat další, externí energii, pomocí níž se solární energie přenáší a rozvádí. Aktivními prvky, které využíváme, jsou solární kolektory na ohřev teplé vody (termosolární systémy) a solární panely na výrobu elektrické energie (fotovoltaika). Aktivní i pasivní využití solární energie využívá infračervenou část slunečních paprsků.

Solární kolektor přeměňuje sluneční energii na teplo. To se pak pomocí teplotnosné látky přivádí do solárního zásobníku (tepelného výměníku), kde se akumuluje. Tepelný výměník předává teplo užitkové vodě a ta je pak pomocí oběhových čerpadel rozváděna po objektu.

Solární energii chápeme jako množství energie elektromagnetického záření Slunce, která dopadne za určitý čas na jednotku plochy. Solárním výkonem rozumíme množství slunečního záření ve Watech na jednotku plochy. Globální (celkové) sluneční záření, které zahrnuje přímé a nepřímé (difuzní) záření je maximálně  $1000 \frac{W}{m^2}$ , tato hodnota závisí na sklonu dopadu záření a součiniteli znečištění atmosféry. Záření také kolísá podle lokality, roční doby, denní doby a podle počasí. Letní obloha s jednotlivými mraky, které slunce prozáří, má záření v úrovni  $800 \frac{W}{m^2}$ , oblačnost se slunečním prosvětlením  $300 \frac{W}{m^2}$ , kalný zimní den  $100 \frac{W}{m^2}$ . Z těchto hodnot má solární kolektor účinnost 80 – 50 % a panel fotovoltaiky má účinnost pod 20 %. V praxi se nejčastěji používá solární výkon uvažovaný na delší období, roční výkon se pohybuje od  $900 \frac{kWh}{m^2}$  do  $1300 \frac{kWh}{m^2}$ . V průměru můžeme počítat s výkonem  $1100 \frac{kWh}{m^2}$ .

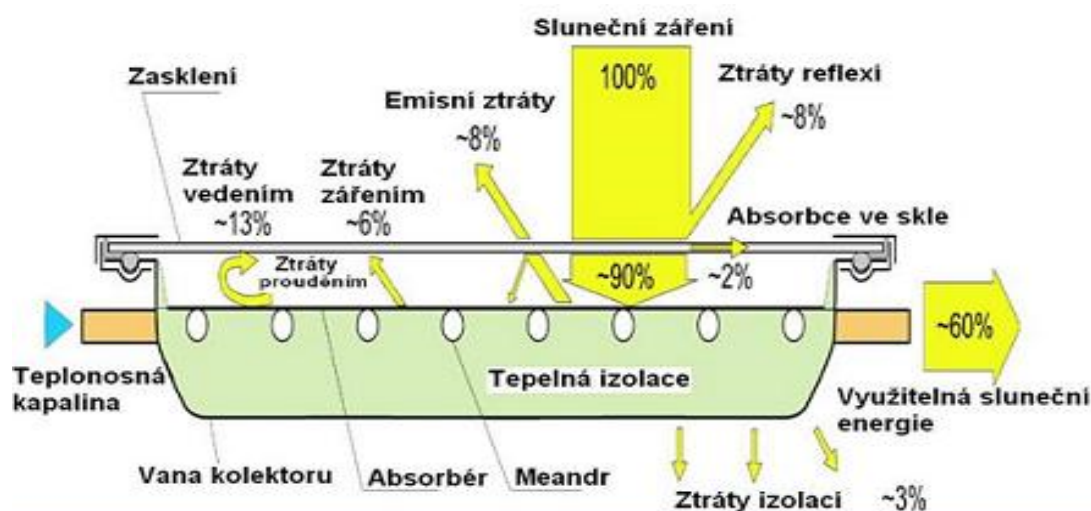
Dříve než odvodím účinnost solárního kolektoru, popíši, jak solární kolektor pracuje. Sluneční kolektor pracuje na principu skleníkového efektu. Teplo se zachytává pod skleněným (nebo jiným průsvitným) krytem v absorbéru, který se ohřívá a odevzdává

teplo teplonosnému médiu, kterým může být voda, vzduch, olej, apod. Tmavá barva absorberu odráží asi pouze 10 % dopadajícího slunečního záření. Některé kolektory bývají pokryty tzv. selektivním nátěrem, který zvyšuje absorpci tepla v kolektoru (snižuje úniky) a je trvanlivější než běžná černá barva. Má také malou emisivitu v oblasti infračerveného záření. Absorbéry jsou obvykle vyráběny z mědi anebo hliníku. Jako izolace se většinou používá skleněná vata nebo také vakuum. Rám absorberu nebo celá vana je z hliníku, plastu, železa.

Z obrázku 7.1 lze vyčíst, k jakým tepelným a optickým ztrátám dochází v solárních kolektorech. Celkovou energii systému lze popsat vztahem

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}_S - \dot{Q}_{z,o} - \dot{Q}_{z,t} - \dot{Q}_k, \quad (7.1)$$

kde  $\dot{Q}_S$  je dopadající výkon slunečního záření,  $\dot{Q}_{z,o}$  jsou optické ztráty,  $\dot{Q}_{z,t}$  jsou tepelné ztráty a  $\dot{Q}_k$  je tepelný výkon kolektoru.



Obrázek 7.1: Princip solárního kolektoru

Při ustálených podmínkách systému platí  $\frac{dQ}{dt} = 0$  a tedy

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_S - \dot{Q}_{z,o} - \dot{Q}_{z,t}. \quad (7.2)$$

V následujícím experimentu na základě námi naměřených hodnot můžeme tepelný zisk kolektoru vypočítat ze vztahu

$$\dot{Q}_k = c \cdot M \cdot \frac{\Delta T}{t}, \quad (7.3)$$



kde  $c$  je měrná tepelná kapacita teplotnosné kapaliny (v našem případě je teplotnosnou kapalinou voda) a  $\frac{\Delta T}{t}$  je rozdíl teploty za jednotku času, tuto veličinu zjistíme sestavením grafu závislosti teploty v nádrži na čase a odvozením rovnice přímky.

Na kolektor budeme svítit halogenovou lampou o výkonu 1000 W. Pro dodanou energii (dopadající záření) pak platí

$$\dot{Q}_s < 1000 \text{ W}$$

Účinnost je definována jako poměr mezi energií získanou (tepelný zisk,  $\dot{Q}_k$ ) a energií dodanou (dopadající sluneční záření,  $\dot{Q}_s$ ), lze psát

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_s} \quad (7.4)$$

Po dosažení vztahu 7.3 do vztahu 7.4 můžeme odhadnout účinnost použitého solárního kolektoru:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_s} > \frac{c \cdot M \cdot \frac{\Delta T}{t}}{1000}. \quad (7.5)$$

## 7.2 Způsoby měření

---

Jelikož je otázka využití solární energie poměrně čerstvým tématem, není studium funkce solárního kolektoru popsáno v žádné literatuře o fyzikálních praktikách. Dají se však nalézt online materiály, např. [7], ve kterých je uveden princip popsany dále v kapitole 7.3.1.

## 7.3 Zakoupená sestava

---

Zakoupili jsme solární kolektor s čerpadlem a halogenovou lampu (viz obrázek 7.2) od firmy Helago.

### 7.3.1 Princip měření

---

Měřicí sestava obsahuje solární kolektor s čerpadlem, plastové spojovací trubičky, expanzní nádobu, halogenovou lampu, dva digitální teploměry, multimetr s teplotní sondou, voltmetr a zdroj stejnosměrného napětí.

Postup měření experimentu je následující. Po sestavení obvodu, který obsahuje solární kolektor, expanzní nádobu a dva teploměry, se do obvodu vpustí voda z vodovodu o známé teplotě a známém objemu. Do expanzní nádoby je zavedeno teplotní čidlo multimetru. Poté je spuštěno čerpadlo, které udržuje proud vody v obvodu při konstantní rychlosti závislé na velikosti napětí na zdroji. Zapnutím halogenové lampy, jejím umístěním přibližně 50 cm od plochy kolektoru a nasměrováním záření kolmo na plochu kolektoru se začne zahřívat voda v obvodu. Hodnoty teplot na vstupu a výstupu solárního kolektoru jsou odčítány každé dvě minuty, teplota z teplotního čidla umístěného v expanzní nádobě je odčítána každou minutu, vše po dobu 10 minut pro dané nastavení.

Měření experimentu se provádí pro tři různé rychlosti průtoku vody obvodem. Naměřená data se použijí k výpočtu účinnosti solárního kolektoru a vykreslení grafů závislostí teploty na čase pro různé rychlosti průtoku.

### 7.3.2 Problémy měření

---

Funkčním problémem se projevilo čerpadlo, které se začalo při třetím měření velmi zahřívat. V průběhu měření studenty v letním semestru 2013/2014 se nakonec čerpadlo přehřálo zcela a přestalo fungovat.

### 7.3.3 Aplikované úpravy měření

---

Problém jsme vyřešili reklamací. Po několika týdnech nám Helago zaslalo čerpadlo stejného typu. Zdá se však, že i v letošním semestru (LS 2014/2015) budou s čerpadlem problémy, jelikož se stále velmi zahřívá. Pokud tato situace nastane, čerpadlo budeme opět reklamovat s tím, že požadujeme čerpadlo jiného typu.

## 7.4 Návod

---

### Úkol:

1. Zaznamenejte průběh teploty vody v oběhu se solárním panelem v závislosti na čase. Průběh sledujte pro tři různé hodnoty průtoku vody oběhem a odhadněte účinnost solárního panelu.

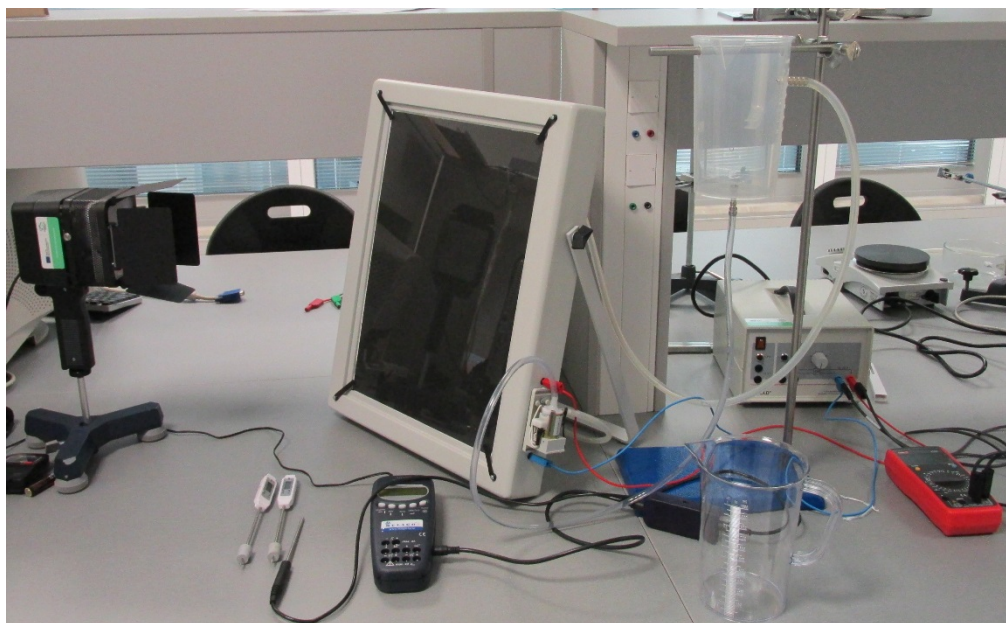
#### **Bezpečnostní pokyny:**

- Před spuštěním pumpy zkontrolujte, zda je obvod uzavřený.
- Dbejte na to, aby se kapalina nedostala k elektrickým spotřebičům.
- Nenastavujte vyšší napětí, než je 10 V, jinak se čerpadlo zničí.

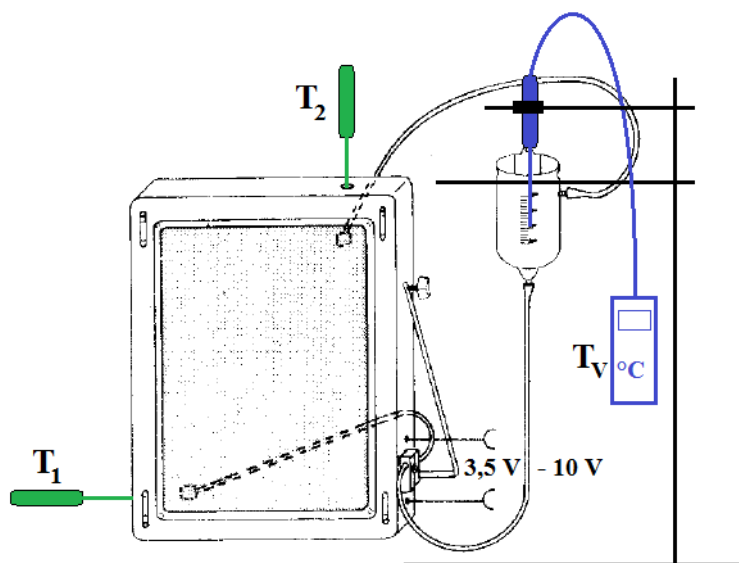
- Halogenová lampa se zahřívá na velmi vysoké teploty, proto nesahejte na zahřáté části lampy, ani ji nezakrývejte žádnými předměty.
- Nedívejte se přímo do zdroje záření halogenové lampy.
- Nemiřte zapnutou halogenovou lampou na jiné osoby.

### **Pomůcky:**

sestava na zkoumání funkce solárního panelu (viz obr. 7.2) obsahující solární panel, čerpadlo, spojovací hadičky, expanzní nádobu o objemu 1000 ml, stojan, svorku, dva digitální teploměry, teplotní sondu s multimetrem, odměrku o objemu 1000 ml, propojovací dráty, voltmetr, zdroj jednosměrného napětí, vodováha, stopky, halogenová lampa o výkonu 1000 W



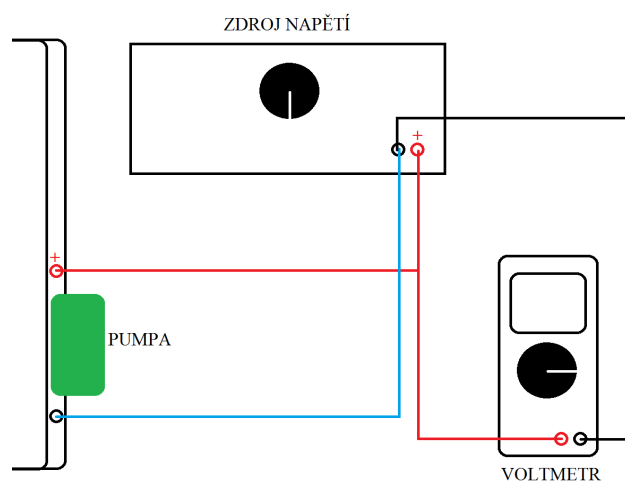
Obrázek 7.2: Měřicí sestava pro studium funkce solárního kolektoru



Obrázek 7.3: Schéma připojení teploměrů a teplotní sondy do obvodu

**Postup:**

- 1) Zkontrolujte, zda máte všechny součásti sady pro studium funkce solárního kolektoru, zapojte sestavu podle obrázku 7.3. Ujistěte se, že obvod v místech vstupů teploměrů  $T_1$  a  $T_2$  dostatečně těsní.
- 2) Zkontrolujte zapojení elektrického obvodu podle obrázku 7.4. Nezapínejte zdroj napětí, dokud vám nebude řečeno a vyučující nekontroluje jak zapojení obvodu s vodou, tak zapojení obvodu elektrického!



Obrázek 7.4: Schéma zapojení elektrického obvodu s pumpou a voltmetrem

- 3) Naplňte obvod se solárním panelem vodou následujícím způsobem:

- a. Expanzní nádobu sundejte z držáku a dejte ji do polohy, kdy bude níže než celý solární panel (tzn. pod úroveň pracovní desky).
  - b. Do expanzní nádoby nalijte pomocí odměrné nádoby přibližně 0,5 litru chladné vody z vodovodu.
  - c. Expanzní nádobu pomalu zvedejte nad úroveň pracovní desky. Tím voda začne rovnoměrně a bez bublin zaplňovat vnitřní prostory solárního panelu.
  - d. Expanzní nádobu dolijte dalším 0,5 litrem vody a umístěte ji zpět na držák.
  - e. Celý obvod by nyní měl být naplněn vodou. Pokud se někde vyskytne větší množství bublin či prázdné místo, snižte expanzní nádobu pod úroveň pracovní desky a naplňte solární panel znovu podle návodu v bodě 3 c a d.
- 4) Zapněte zdroj napětí a voltmetr:
    - a. Nezapomeňte mít při zapínání zdroje nastavené co nejmenší napětí (tzn. 0 V)!
    - b. Nezapomeňte nastavit na voltmetru správný rozsah pro měření jednosměrného napětí!
  - 5) Na zdroji napětí navolte 8 V, tím se spustí čerpadlo, které způsobí cirkulaci vody v obvodu. Díky vysoké rychlosti proudění se z obvodu dostanou bubliny vzduchu. Nenastavujte napětí vyšší, než 10 V jinak čerpadlo zničíte! Po 2 minutách snižte napětí na 0 V.
  - 6) Zapněte oba teploměry a multimetr s teplotní sondou.
  - 7) Zapojte halogenovou lampu do sítě. Tím se automaticky spustí chlazení lampy.
  - 8) Umístěte lampu před solární panel tak, aby vzdálenost mezi těmito dvěma předměty byla 50 cm a halogenová lampa aby směřovala kolmo doprostřed solárního panelu.
  - 9) Zvyšte napětí na zdroji na 3,5 V – pomalá rychlost cirkulace.
  - 10) Do tabulky 7.1 запиšte teplotu v expanzní nádobě  $T_V$ .
  - 11) Tlačítkem na zadní straně lampy zapněte světelné záření, spusťte stopky.
  - 12) Po jedné minutě запиšte teplotu  $T_V$  v expanzní nádobě. Každou minutu po následujících 10 minut запиšte hodnotu teploty  $T_V$  v expanzní nádobě do tabulky 7.1.
  - 13) Každé dvě minuty запиšte teploty na teploměrech  $T_1$  a  $T_2$  do tabulky 7.2.
  - 14) Po 10 minutách vypněte světelné záření halogenové lampy (tlačítkem, ne ze sítě, aby se lampa mohla ochladit), odečtěte poslední hodnoty měřených teplot a zdroj napětí pohánějící čerpadlo snižte na 0 V.
  - 15) Zvyšte napětí na zdroji na 5 V – střední rychlost cirkulace.
  - 16) Po přibližně 30 vteřinách odečtěte teplotu  $T_V$  v expanzní nádobě.

- 17) Zapněte halogenovou lampu a opakujte body 12 až 15.
- 18) Pozor! Teplota vody v solárním panelu nesmí dosáhnout vyšších teplot než 60 °C! Proto je třeba zvážit, zda před třetím měřením vyměnit vodu. Vyměňte ji, pokud konečná teplota po druhém měření v expanzní nádobě je větší než 45 °C.
- Vypněte zdroj napětí, vytáhněte jej ze zásuvky.
  - Sejměte expanzní nádobu z držáku.
  - Opatrně, aby voda nevytekla otvory pro držák, přelijte vodu z expanzní nádoby do odměrky.
  - Expanzní nádobu umístěte pod úroveň pracovní desky a počkejte, dokud z obvodu nevyteče zbylá voda. Tu vylijte do odměrky, poté do odpadu.
  - Postupem podle bodu 3 naplňte obvod novou chladnou vodou z vodovodu.
  - Až bude solární panel opět naplněný, spusťte zdroj napětí. Zvolte napětí cca 6 V a počkejte, dokud se teplota vody v obvodu neustanoví (přibližně 3 minuty).
- 19) Pro třetí měření zvolte napětí 8 V – vysoká rychlost cirkulace. Opakujte body 12 až 15.
- 20) Po posledním měření vypněte halogenovou lampu tlačítkem, vypněte zdroj napětí i voltmetr.
- 21) Vylijte vodu z obvodu postupem z bodu 18.
- 22) Vytáhněte halogenovou lampu ze sítě.
- 23) Vytvořte protokol popisující průběh vašeho měření, který bude obsahovat vámi naměřená data a výpočty. Pro všechny tři průtoky sestrojte graf, který bude znázorňovat závislost teploty na čase a uveďte rovnici přímky ve tvaru  $T_i = A_i \cdot t + B_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ).
- 24) Odhadněte účinnost solárního kolektoru pro všechny tři průtoky ze vztahu (7.5), za veličinu  $\frac{\Delta T}{t}$  dosad'te hodnotu  $A_i$  odvozenou z rovnice přímky.
- 25) Na závěr shrňte výsledky svého snažení a diskutujte možné chyby měření.

Tabulka 7.1: Tabulka pro zapisování naměřených hodnot v expanzní nádobě pro tři různá nastavení rychlosti cirkulace

	Rychlost cirkulace		
	Pomalá	Střední	Vysoká
Čas	Teplota v expanzní nádobě		
$t$ (min)	$T_{V1}$ (°C)	$T_{V2}$ (°C)	$T_{V3}$ (°C)
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Tabulka 7.2: Tabulka pro zapisování hodnot teplot na teploměrech  $T_1$  a  $T_2$  v čase

	Rychlost cirkulace								
	Pomalá			Střední			Rychlá		
Čas	Teploty		Rozdíl	Teploty		Rozdíl	Teploty		Rozdíl
$t$ (min)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_P$	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_S$	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_R$
2									
4									
6									
8									
10									
průměrná hodnota									

## 7.5 Kontrolní měření

Tabulka 7.3: Tabulka naměřených hodnot v expanzní nádobě pro tři nastavení rychlosti cirkulace

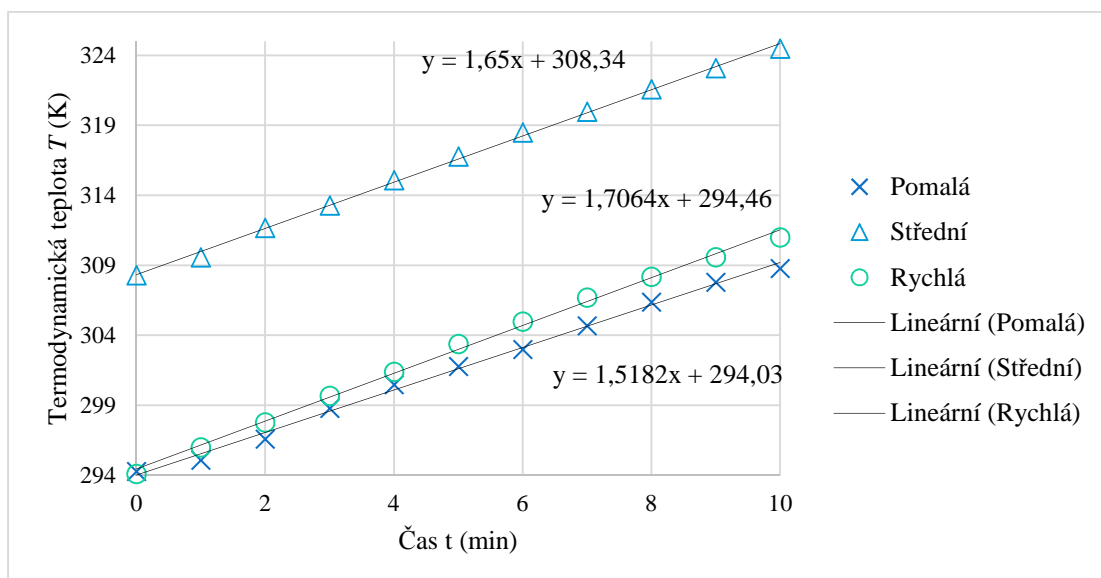
Čas	Rychlost cirkulace		
	Pomalá	Střední	Vysoká
$t$ (min)	$T_{V1}$ (°C)	$T_{V2}$ (°C)	$T_{V3}$ (°C)
0	21,2	35,2	21,0
1	22,0	36,5	22,9
2	23,5	38,6	24,7
3	25,7	40,2	26,6
4	27,4	42,0	28,3
5	28,7	43,7	30,3
6	29,9	45,4	31,9
7	31,6	46,9	33,6
8	33,3	48,5	35,1
9	34,7	50,0	36,5
10	35,7	51,4	37,9

Tabulka 7.4: Hodnoty teplot na teploměrech  $T_1$  a  $T_2$  v čase

Čas	Rychlost cirkulace									
	Pomalá			Střední			Rychlá			
	Teploty		Rozdíl	Teploty		Rozdíl	Teploty		Rozdíl	
$t$ (min)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_P$	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_S$	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\Delta T_R$	
2	24,8	26,7	1,90	30,70	31,70	1,00	35,10	35,80	0,70	
4	26,5	27,9	1,40	31,80	32,90	1,00	35,90	36,70	0,80	
6	27,3	30,10	2,80	32,90	34,20	1,30	36,80	37,80	1,00	
8	28,00	32,10	4,10	33,90	35,20	1,30	37,80	38,70	0,90	
10	29,00	36,30	7,30	35,00	36,40	1,40	38,80	39,60	0,80	
průměrná hodnota			3,50				1,22			



Graf 7.1: Závislost teplot vody v expanzní nádobě na rychlosti průtoků v čase



	Rychlost cirkulace		
	Pomalá	Střední	Vysoká
Směrnice spojnice (-)	1,52	1,65	1,71
Účinnost $\eta$ (%)	10,64	11,55	11,97

## 7.6 Poznámky pro vyučujícího

Dbejte na to, aby studenti dodržovali bezpečnostní pokyny. Jelikož má halogenová lampa velký výkon, je nutné zajistit, aby lampa nesměřovala na studenty pracující na jiných experimentech. Je tedy vhodné stanoviště s měřením buď umístit ke zdi a nasměrovat záření halogenové lampy tímto směrem, nebo stanoviště odstínit umístěním zástěny za a okolo solárního kolektoru.

Před spuštěním čerpadla zkontrolujte studentům nejen jeho správné zapojení ke zdroji napětí a nastavení tohoto zdroje a multimetru, ale také se ujistěte, že obvod s vodou je správně utěsněn a voda se tak nemůže dostat k elektrickým spotřebičům či zásuvkám.

V blízkosti pracoviště by měl být k dispozici hadr, či papírové ubrousky.

## Závěr

---

Cílem diplomové práce bylo jednak popsat základní znalosti potřebné pro měření a zpracování navržených úloh, jednak samotné úlohy sestavit, proměřit a vytvořit podrobný návod pro tvorbu a zpracování protokolů.

Tato práce obsahuje teorii k šesti vybraným měřením, a to v rozšířené formě, kdy jsou probrány i další možnosti a způsoby měření daného jevu, a podrobné návody pro studenty. Tyto návody jsou již využívány studenty předmětu Fyzikální praktikum I, neboli Fyzikální praktikum z mechaniky a termiky. Návody budou studentům v dalších letech zpřístupněny online na portálu Moodle vždy na začátku letního semestru.

Velkým přínosem mé práce bylo zpracování daných úloh z pohledu učitele. Všechny popsané úlohy jsem sestavila, prostudovala a ve třech případech i výrazně upravila předtím, než na nich bylo možné dané jevy měřit. Jednalo se o úlohy Měření povrchového napětí kapalin, Ověření stavové rovnice ideálního plynu a Měření tepelné vodivosti pevných látek. Tato část práce byla časově nejnáročnější a vyžadovala důkladnou analýzu dané úlohy.

Jelikož jsem se v letním semestru 2013/2014 zapojila i do vyučování Fyzikálního praktika I, mohla jsem úlohy a příslušné návody upravovat na základě zpětné vazby od studentů. Návody obsažené v této diplomové práci jsou již vyzkoušené a navržené tak, aby práce s nimi byla efektivní a pro studenty maximálně přínosná.

Pro ostatní učitele jsem do závěru každé kapitoly připojila sekci s názvem Poznámky pro vyučujícího, ve které vypisuji důležité kroky přípravy před zahájením výuky i kroky vhodné při výuce, které je třeba dodržet, aby měření probíhalo plynule a bez problémů.

Tato práce je zaměřená na šest z celkového počtu dvanácti vyučovaných měření. V budoucnu je proto možné tuto práci doplnit o dalších šest úloh, případně o anglický překlad, který by využívali zahraniční studenti Přírodovědecké fakulty.

## Použitá literatura

---

- [1] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983, 669 s.
- [2] TÖLG, Tomáš a Marcel BENDA. *Fyzikální praktikum*. 6. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009, 184 s. ISBN 978-80-7043-829-9.
- [3] HOLUBOVÁ, Renata a Marcel BENDA. *Fyzikální praktikum*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2009, 184 s. ISBN 80-244-0264-5.
- [4] STACH, Vojtěch a František ŠPULÁK. *Fyzikální praktikum I*. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Pedagogická fakulta, 2002, 59 s. ISBN 80-704-0543-0.
- [5] JANALÍK, Jaroslav, *Viskozita kapalin a její měření*, V Ostravě: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010
- [6] JANUŠ, P. *Studium viskozity kapalných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 48 s.
- [7] HORÁKOVÁ, I. a LUPTÁK, L., *Úspory energií a nové technologie v rozvodech technického zabezpečení budov*, [online], [citováno 7. 4. 2015] Dostupné z: <http://www.jilova.cz/Projekty/projekty-rozvoj-studijniMaterial.pdf>
- [8] SVOBODA, M. a kol., *Praktikum školních pokusů*. 1. vyd. Praha: Univerzita Karlova, 1993, 99 s. ISBN 80-7066-802-4.
- [9] BENEŠ, V., *Stavová rovnice ideálního plynu*, [online], [citováno 11. 4. 2015] Dostupné z: <http://www.vernier.cz/experimenty/gml/fyzika/f24.pdf>
- [10] *Helago® cz*, [online], [citováno 12. 4. 2015] Dostupné z: <http://www.helago-cz.cz>

## Přílohy

---

Přílohou k diplomové práci je jedno vložené CD.

- CD obsahuje návody na jednotlivé úlohy upravené pro tisk ve formátu pdf a ve formátu docx pro možné úpravy.
- Dále je na CD uložena celá diplomová práce ve formátu pdf.