

Měření specifické hmotnosti nepravidelných těles

The Specific Weight Measurement of Irregular Bodies

Pavel Rössler

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel RÖSSLER**
Osobní číslo: **A10239**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření specifické hmotnosti nepravidelných těles**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami stanovení specifické hmotnosti látek a formou literární rešerše je popište.
2. Navrhněte a realizujte vhodnou měřicí metodu pro stanovení specifické hmotnosti nepravidelných těles.
3. Vyberte vhodný typ vzorků pro ověření navržené metody a určete nejistoty měření.
4. Proveďte měření problematických vzorků, zpracujte a vyhodnoťte výsledky měření.
5. Navrhněte a vytvořte laboratorní úlohu do předmětu Instrumentace a měření včetně vzorového protokolu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **LOWELL, S a S LOWELL.** Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size, and density. Boston: Springer, c2006, xiv, 347 p. Particle technology series Kluwer Academic Publishers, 16. ISBN 978-140-2023-026.
2. **DAVID SUITS, L, TC SHEAHAN, S TAMARI a RI LOPEZ-HERNANDEZ.** Optimum Design of the Comparative Gas Pycnometer for Determining the Volume of Solid Particles. Geotechnical Testing Journal. 2006, roč. 29, č. 1, s. 12667-. ISSN 01496115. DOI: 10.1520/GTJ12667. Dostupné z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?GTJ12667>
3. **PRAKASH, K., A. SRIDHARAN, H. K. THEJAS a H. M. SWAROOP.** A Simplified Approach of Determining the Specific Gravity of Soil Solids. Geotechnical and Geological Engineering. 2012, roč. 30, č. 4, s. 1063-1067. ISSN 0960-3182. DOI: 10.1007/s10706-012-9521-6. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10706-012-9521-6>.
4. Designation D 5550-94, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. In Annual Book of Standards, Vol. 04.08, ASTM, Philadelphia, 1994, pp. 376?379.
5. **BROŽ, Jaromír.** Základy fyzikálních měření I. 1. vyd. Praha: SPN, 1967, 523 s.
6. **NĚMEČEK, Pavel.** Nejistoty měření. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008, 96 s. ISBN 978-80-02-02089-9.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce pojednává o metodách měření specifické hmotnosti nepravidelných těles (např. sypkých materiálů), dále pak o provedení několika referenčních měření, stanovení nejistot měření u jednotlivých metod, návrhu a realizaci vhodné měřicí metody pro stanovení specifické hmotnosti, následně o porovnání získaných výsledků s výsledky referenčních měření a také pojednává o změření specifické hmotnosti nepravidelného tělesa navrhanou metodou. Výstupem bakalářské práce je také návrh a vytvoření laboratorní úlohy do předmětu Instrumentace a měření včetně vzorového protokolu.

Klíčová slova: specifická hmotnost, hustota, hustota nepravidelných těles, metody měření hustoty, pyknometr, oscilační hustoměry, hydrostatické vážení

ABSTRACT

The work deals about methods of measuring the specific gravity of irregular bodies (eg solids), then about implementation of several reference measurements, determination of measurement uncertainty in individual methods, design and realization of appropriate measuring method for determining the specific gravity, then the comparison of obtained results with results of reference measurement and also discusses the measurement of specific gravity of irregular body proposed method. The output of this work is also a proposal and creation of a laboratory work into the subject Instrumentation and measurement including sample protocol.

Keywords: specific weight, density, density of irregular objects, methods of density measurement, pycnometer, oscillation-type density meters, hydrostatic weighing

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D., za odborné vedení, rady, věcné připomínky a pomůcky, které mi poskytoval během tvorby mé bakalářské práce, dále také doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za poskytnutí potřebných materiálů k návrhu a přeměření navrhované metody a hlavně své rodině, která mi umožnila studium a která mě během celého studia plně podporovala.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZÁKLADY FYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ	12
1.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	12
1.2 METODY MĚŘENÍ.....	13
1.2.1 Metody přímé a nepřímé	13
1.2.2 Metody absolutní a relativní.....	13
1.2.3 Metody statické a dynamické.....	13
1.2.4 Metoda substituční	14
1.2.5 Metoda kompenzační	14
1.2.6 Metoda interpolační	14
1.2.7 Metoda postupných měření	15
1.3 DRUHY CHYB MĚŘENÍ	15
1.3.1 Systematické chyby.....	15
1.3.1.1 Chyby, jejichž zdrojem je použitá metoda.....	15
1.3.1.2 Chyby, jejichž zdrojem je použitý přístroj.....	15
1.3.1.3 Chyby, jejichž zdrojem je pozorovatel.....	16
1.3.2 Náhodné chyby.....	16
1.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	16
1.4.1 Nejistota typu A	17
1.4.2 Nejistota typu B.....	17
1.4.3 Celková nejistota typu B	17
1.4.4 Kombinovaná standartní nejistota.....	18
2 METODY MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELNÝCH TĚLES	19
2.1 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK HYDROSTATICKÝM VÁŽENÍM	19
2.2 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK POMOCÍ PYKNOMETRU	20
2.3 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK METODOU STEJNÝCH HUSTOT	21
2.4 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK METODOU PŘÍMOU	21
2.5 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI POMOCÍ OSCILAČNÍCH HUSTOMĚRŮ	22
2.5.1 Princip činnosti oscilačních hustoměrů.....	22
2.5.2 Kalibrace oscilačních hustoměrů	24
3 NÁVRH METODY PRO MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELNÝCH TĚLES	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	28

4.1	MIKROMETR MITUTOYO QUANTUMIKE 293-140, 0-25 MM	28
4.2	VÁHA KERN PLT 2000-3DM	28
4.3	SADA PRO STANOVENÍ HUSTOTY KERN PLS-A01	29
4.4	LABORATORNÍ SÍŤOVÝ ZDROJ AGILENT E3631A	30
4.5	MULTIMETR AGILENT 34410A.....	31
4.6	SNÍMAČ DIFERENČNÍHO TLAKU BD SENSORS DPS+	32
4.7	DIGITÁLNÍ MANOMETR KELLER LEO 3	33
5	REFERENČNÍ MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI OCELOVÉ KULIČKY	34
5.1	MĚŘENÍ POMOCÍ PŘÍMÉ METODY	34
5.1.1	Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky	35
5.2	MĚŘENÍ POMOCÍ METODY HYDROSTATICKÉHO VÁŽENÍ	36
5.2.1	Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky	37
5.3	MĚŘENÍ POMOCÍ PYKNOMETRU	39
5.3.1	Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky	40
5.4	MĚŘENÍ NAVRHOVANOU METODOU.....	41
5.4.1	Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky	43
6	MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELNÉHO TĚLESA.....	47
6.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY, VÝPOČTY A VÝSLEDKY	47
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	50
	ZÁVĚR	52
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM TABULEK.....	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

Pod pojmem specifická hmotnost si mnoho lidí, kteří takové označení veličiny či vlastnosti vidí a slyší poprvé, představí veličinu se složitou definicí a výpočty. Opak je v tomto případě však pravdou. Pojmenováním specifická hmotnost je označována jednoduchá hustota daného tělesa či látky. Hustota také bývá označována jako objemová hustota. Většina lidí, kteří dávali během svých školních let pozor při hodinách fyziky, si vzpomene na definici specifické hmotnosti, která říká, že specifická hmotnost je fyzikální veličina, která vyjadřuje poměr mezi hmotností měřené látky, ať už ve formě plynné, kapalné či pevné, a objemem této látky. Specifická hmotnost je závislá na změnách teploty a také na znečištění této látky různými příměsemi. Hodnoty specifické hmotnosti látek můžeme zjistit z matematických, fyzikálních a chemických tabulek (zkráceně MFCH tabulek), určených pro střední školy. Zde jsou však uvedené jen hodnoty některých látek, tudíž pokud zde nenalezneme hodnotu pro námi měřenou či zkoumanou látku nebo těleso, jsme nuceni si tuto hodnotu opatřit jiným způsobem. Pokud máme dostačující prostředky, není problém, abychom si tuto hodnotu změřili a vypočítali za pomoci jedné z mnoha metod určování specifické hmotnosti látek či těles. Výhodou použití některých metod je jejich nenáročnost jak z hlediska početního, z hlediska finančního i z hlediska časového.

Pokud bychom chtěli provádět měření specifické hmotnosti na profesionálnější úrovni, nejen pro ověření pro domácí účely, měli bychom dodržovat určité všeobecné základy pro fyzikální měření. S těmito základy se stručně seznámíme ze začátku teoretické části mé bakalářské práce. Pojďme zde o přípravě měření, správném umístění přístrojů atd. Poté se seznámíme s rozdělením obecných metod měření a nakonec se ještě seznámíme s chybami a nejistotami měření. V dalším úseku teoretické části si rozebereme pár vhodných měřicích metod pro stanovení hustoty, neboli specifické hmotnosti, pevných těles. Nalezneme zde metodu hydrostatického vážení, pyknometrickou metodu nebo např. metodu přímou. V závěru provedeme návrh vhodné měřicí metody pro stanovení specifické hmotnosti nepravidelných těles.

V praktické části se seznámíme s přístroji, které budeme používat při referenčních měření jednotlivými metodami. Účelem těchto měření bude ověření, zdali je navrhovaná měřicí metoda vhodná pro stanovení specifické hmotnosti těles. Provedeme měření referenčního tělesa známé specifické hmotnosti pomocí metody přímé, metody hydrostatického vážení a metody měření za pomoci pyknometru. Naměřené hodnoty uvedeme do tabulek, pomocí

těchto hodnot vypočítáme specifickou hmotnost referenčního tělesa a jeho objem. Zjistíme nejistoty měření a poté provedeme měření referenčního tělesa navrhanou metodou. Posledním měřením pak bude měření vhodného vzorku, v našem případě vzorku cukru, navrhanou metodou. Na závěr zhodnotíme výsledky referenčních měření a měření vhodného vzorku, toto zhodnocení provedeme v diskuzi. Do příloh této práce umístíme návrh laboratorní úlohy včetně vzorového protokolu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADY FYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ

1.1 Příprava měření

Fyzikální měření jsou v mnoha případech složena ze tří etap, které po sobě následují. První etapa je příprava měření, jako další je měření a nakonec zpracování výsledků měření. Příprava měření je první etapou, do níž patří všechny pracovní činnosti, které nespádají do samotného měření. Tyto činnosti nám zajišťují zisk co možná nejpříznivějších výsledků. Všimněme si některých zásad přípravy, které jsou zvláště důležité z hlediska dosažení dokonalých výsledků.

Na prvním místě je podrobné seznámení pozorovatele se všemi úkoly měření, jež bude v rámci měření provádět, a musí ovládat problematiku oboru, do kterého měření spadá.

Dále je nezbytné stanovit, jaké přístroje bude pozorovatel používat, stanovit jejich měřicí rozsahy a určit způsob uspořádání přístrojů. U elektrických měření se jedná o schéma zapojení.

Před měřením také musíme uvážit, jaké okolní vlivy mohou na přístroje působit a do jaké míry jsou schopny pozměnit údaje měřících přístrojů. Jedná se o vlivy jako tlak a vlhkost vzduchu, různé druhy záření, teplota, přítomnost magnetických polí a další okolnosti. Jejich účinek na měření a měřicí přístroje je odlišný a řídí se hlavně druhem měření. Také mechanické otřesy jako je chvění podlah laboratoře při chůzi nebo otřesy celých budov mají negativní vliv na přesnost měření.

Také umístění přístrojů souvisí s vnějšími vlivy. Jako příklad si uvedeme měření magnetometrem. Ten vhodně orientujeme vůči zemskému magnetickému poli a umístíme jej co možná nejdále od železných těles či elektrického vedení, čímž zabráníme vlivu rušivých magnetických polí.

Taktéž je nutné provést rozbor přesnosti měření. Pokud známe přesnost, která je požadována na konečném výsledku měření, musíme stanovit přípustné chyby jednotlivých měřených veličin.

S přípravou měření je také spjata příprava vzorků. Jedná se ovšem o pojem velmi široký. Obecně může znamenat souhrn různorodých prací, nejen technologických, ale i prací spojených se zpracováním vzorků. [1]

1.2 Metody měření

Měřicí metoda je způsob, jakým můžeme měřit fyzikální veličiny. Jelikož lze stejnou veličinu měřit různými způsoby, existují pro měření různé metody. Tyto metody závisí na povaze a druhu měřené veličiny, na vztazích, ze kterých vyjdeme, a také na tom, jaké přístroje a jejich uspořádání k měření použijeme. [1]

1.2.1 Metody přímé a nepřímé

Metodou přímou rozumíme tu metodu, při které měříme veličinu na základě její definice. Všechny ostatní metody, které při měření vychází z jiných vztahů než definičních, nazýváme metodami nepřímými. Pro představu specifickou hmotnost ρ tělesa určíme přímou metodou tak, že vážením určíme jeho hmotnost m a zvláštním měřením jeho objem V . Podílem obou naměřených veličin (podle definice $\rho = m/V$) vypočítáme požadovanou specifickou hmotnost. Nepřímou metodou můžeme specifickou hmotnost změřit za pomoci Archimédova zákona ze síly, kterou je těleso nadlehčováno ve známé kapalině a z hmotnosti tělesa ve vzduchu. [1]

1.2.2 Metody absolutní a relativní

Výše zmíněné metody mohou být buďto absolutní, nebo relativní. Absolutní metody jsou takové, které poskytují absolutní hodnotu námi hledané veličiny vyjádřenou v definovaných jednotkách, např. elektrický proud v ampérech apod.

Relativní metody udávají poměr dvou veličin stejného druhu, přičemž jednu veličinu můžeme vyjádřit v libovolných jednotkách. Jsou tedy metodami srovnávacími. Tyto nám umožňují porovnávat hodnoty veličiny měřené se známými hodnotami stejného druhu. Známé hodnoty jsou realizovány přesnými vzory, označovanými jako etalony, normály, či standardy. Etalony jsou udány s nejvyšší možnou přesností, normály a standardy mají přesnost podle účelu použití. [1]

1.2.3 Metody statické a dynamické

Tyto metody se dělí z hlediska časových změn měřených veličin. Při statických metodách je měřená veličina stálá, jejíž velikost se určuje z klidové polohy ukazatele použitého měřicího přístroje. U dynamických metod se velikost měřené veličiny určuje z periodického pohybu měřicího systému, např. určení tíhového zrychlení g reverzním kyvadlem. Také musíme rozlišovat měření statické a měření stacionární (za ustáleného

stavu). Za ustáleného stavu zůstávají všechny měřené veličiny konstantní po dostatečně dlouhou dobu. Pokud tato podmínka není splněna, měření probíhá za stavu neustáleného. [1]

1.2.4 Metoda substituční

Jedná se o metodu měření, kdy předmět o neznámé hodnotě měřené veličiny nahradíme tzv. normály, jejichž hodnoty veličiny stejného druhu jsou známé a odstupňované. Při této metodě hledáme hodnotu normálu stejnou nebo co možná nejbližší hodnotě měřené veličiny. Rovnost těchto veličin zjistíme z rovnosti výchylek na měřicím přístroji, zvoleném podle typu měřené veličiny. Výchylky vytvoříme nejdříve za pomoci měřeného předmětu, poté za pomoci vhodně zvoleného normálu. Při rovnosti výchylek udáváme hodnotu normálu za hodnotu měřené veličiny. Normály jsou tvořeny závažími, kuličkovými reostaty či kapacitní dekádami aj. Tyto normály jsou v sadách uspořádány tak, aby bylo možné kombinací sestavit libovolnou číselnou hodnotu. [1]

1.2.5 Metoda kompenzační

Také je nazývána metodou vyrovnávací. Princip metody spočívá ve vyrovnání účinku měřené veličiny stejně velkým, avšak opačným účinkem veličiny stejného druhu. Jako příklad můžeme uvést vážení na rovníramenných vahách, kdy předmět položený na jednu misku působí svou vahou otáčivým momentem na rameno, tento moment je vyrovnáván stejně velkým, ale opačným momentem závaží na misce druhé. [1]

1.2.6 Metoda interpolační

U výše zmíněné metody substituční a kompenzační není možné zvolit a nastavit takovou hodnotu veličiny nahrazovací, či vyrovnávací, která by přesně odpovídala hodnotě měřené veličiny. Proto je vhodné použití interpolační metody. Podstata interpolační metody spočívá v provedení dvou měření, z nichž jedno pro hodnotu co nejbližší nižší (y_1) a druhé pro hodnotu nejbližší vyšší (y_2) než je hodnota y_0 , která přesně odpovídá měřené veličině. Hodnotu měřené veličiny poté získáme početní interpolací pomocí vzorce (1), kde hodnoty x_0 , x_1 a x_2 představují výchylky od hodnot y_0 , y_1 a y_2 . [1]

$$y_0 = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x_0 - x_1) \quad (1)$$

1.2.7 Metoda postupných měření

Základem metody je soubor měření navazujících těsně na sebe a vyznačujících se tím, že koncový bod jednoho měření je zároveň počátečním bodem měření následujícího. Tato metoda je ve fyzice používána velmi často, je vhodná hlavně pro měření periodických dějů, jako jsou doby kmitu, otáčky atd. Také je používána pro měření odlehlosti bodů, které tvoří pravidelnou řadu, pro určování plochy pomocí planimetru, pro kalibraci pružinových vah či pipety aj. [1]

1.3 Druhy chyb měření

Pokud opakujeme měření stejné veličiny za stejných podmínek několikrát po sobě, získáváme většinou rozdílné hodnoty. Veličina, kterou měříme, má ovšem jen jednu správnou hodnotu. Chybou obecně nazýváme jakoukoliv odchylku naměřené hodnoty od správné hodnoty měřené veličiny. [1]

1.3.1 Systematické chyby

Tyto chyby zkreslují výsledek zcela určitým způsobem a také s určitou pravidelností. Projevují se zpravidla hodnotami, které jsou buďto trvale vyšší, anebo trvale nižší než hodnota správná. Systematické chyby nejčastěji způsobují použité metody a měřicí přístroje, nebo také samotný pozorovatel. U některých případů není možné přesně určit příčinu systematické chyby, a proto se pro zjištění a vyloučení chyby používá jiná metoda pro měření hledané veličiny. [1]

1.3.1.1 Chyby, jejichž zdrojem je použitá metoda

Vznik těchto chyb je zapříčiněn nepřesností, nedokonalostí či nevhodností použitého způsobu měření. Použitá metoda často odpovídá určité definici měřené veličiny, avšak k požadovanému měření ji nelze respektovat. Tyto metodické chyby je možné odstranit jednak zpřesněním měřicí metody, nebo také vyloučením chyby výpočtem. [1]

1.3.1.2 Chyby, jejichž zdrojem je použitý přístroj

Chyby zaviněné přístrojem nebo jiným měřicím přístrojem jsou další příčinou systematických chyb a jejich původ se nachází v nedokonalém a nepřesném provedení přístrojů. Typická je nedokonalé a nepřesné propracování stupnic, ať už u přístrojů pro měření délek a úhlů, či u elektrických přístrojů. Za zdroj chyb můžeme též považovat i

kapiláru o nestejném průřezu, závaží s nepřesnou vahou, nebo rychleji jdoucí stopky. Odstranění těchto chyb se provádí opravami pomocí korekčních tabulek. Bohužel však tyto chyby nelze odstranit beze zbytku. [1]

1.3.1.3 Chyby, jejichž zdrojem je pozorovatel

Nejčastějším výskytem chyb s tímto zdrojem je měření časových a délkových veličin. Pozorovatelé se ve svých odhadech při měření časových veličin odlišují většinou o několik desetin sekundy, v závislosti na jejich experimentálních zkušenostech. Také při odečítání ze stupnic přístrojů někteří pozorovatelé zaokrouhlují nahoru, někteří dolů. Možností, jak tuto chybu odstranit, je umožnit několika různým pozorovatelům provést měření stejné veličiny za stejných podmínek. Další příčinou těchto chyb bývá únava nebo zmenšená pozornost pozorovatelů. Také bývají způsobeny nevhodnými vnějšími podmínkami k měření. [1]

1.3.2 Náhodné chyby

Jestliže opakujeme měření stejné veličiny za stejných podmínek několikrát za sebou, získáváme odlišné výsledky, u kterých nedokážeme určit příčinu těchto odchylek. Působí zde například změna polohy oka, kolísání teploty přístroje či vnější teploty, a také nekonstantní magnetické pole v místě měření a jeho okolí. Vlivů však existuje velmi mnoho, z toho důvodu lze původ těchto chyb považovat skutečně za náhodný. Elementárními chybami lze nazvat chyby zaviněné jednotlivými vlivy. Náhodná chyba je pak určena součtem jednotlivých elementárních chyb. [1]

1.4 Nejistoty měření

Nejistota měření nám specifikuje rozptyl hodnot, které bychom mohli důvodně prisuzovat k měřené veličině s určitou pravděpodobností a které bychom mohly pokládat za hodnotu veličiny, kterou měříme. Obsahem nejistoty měření bývá zpravidla více prvků, které můžeme zjistit buďto experimentálně, což znamená provedení více měření, nebo podle předpokladů a úsudku. [2]

1.4.1 Nejistota typu A

Tuto nejistotu zjišťujeme experimentálně opakovaným měřením. Nejistota typu A nám představuje rozptyl hodnot opakovaných měření. Mírou nejistoty je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru $s_{\bar{x}}$ podle vztahů (2) a (3). [2]

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

1.4.2 Nejistota typu B

Nejistotu typu B určujeme odlišným způsobem než je opakované měření. Určujeme její velikost z kvalifikace možných zdrojů, které mohou být původcem této nejistoty. Zdroje nejistoty mají různý původ, mohou to být vlivy použitých přístrojů, vlivy okolního prostředí a změny těchto vlivů, dále to může být vliv metody, vlivy nás jakožto pozorovatelů nebo některé další neznámé a hůře specifikovatelné vlivy. [2]

Výpočet nejistoty typu B musíme provést pro každý zdroj nejistot zvlášť podle vzorce (4), ve kterém D_{\max} je hodnota, kterou získáme z technické dokumentace přístroje nebo ji určíme odhadem ze zkušeností. V udaném intervalu $\pm D_{\max}$ se s největší pravděpodobností nachází měřená veličina x_m . [2]

$$u_{BZ}(x) = \frac{D_{\max}}{\chi} \quad (4)$$

Koeficient χ zvolíme podle typu rozdělení veličiny, který odpovídá jejímu výskytu nejlépe. Pro normální rozdělení je hodnota koeficientu χ rovna 2 a pro rovnoměrné rozdělení je hodnota koeficientu χ rovna druhé odmocnině ze tří. [2]

1.4.3 Celková nejistota typu B

Získáme ji geometrickým součtem nejistot zjištěných u jednotlivých zdrojů podle vztahu:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{Z=1}^n u_{BZ}(x)^2} \quad (5)$$

1.4.4 Kombinovaná standardní nejistota

Podle vzorce (6) získáme geometrickým součtem standardních nejistot typu A a typu B kombinovanou standardní nejistotu $u_C(x)$. [2]

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (6)$$

Pro normální rozložení je pravděpodobnost faktu, že skutečná hodnota měřené veličiny leží v intervalu určeném standardní kombinovanou nejistotou rovna 68%, pro rozdělení rovnoměrné je pravděpodobnost rovna 58%. [2]

2 METODY MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELNÝCH TĚLES

Specifickou hmotnost ρ homogenní látky můžeme definovat jako poměr hmotnosti m měřené látky a objemu V , který měřená látka zaujímá.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

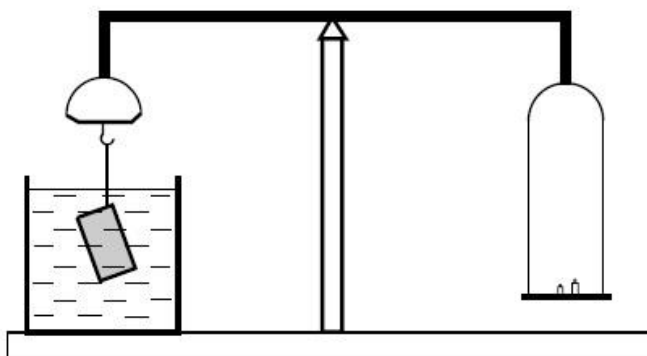
Jako jednotka specifické hmotnosti je v mezinárodní soustavě jednotek (SI) uveden kg/m^3 . Lze také pro vyjádření této veličiny použít jednotku ze soustavy CGS, a to g/cm^3 , přitom se 1 g/cm^3 rovná 1000 kg/m^3 . Pro stanovení specifické hmotnosti používáme vztah (7), do kterého vkládáme zjištěnou hmotnost a objem daného vzorku látky. [3]

2.1 Měření specifické hmotnosti pevných látek hydrostatickým vážením

Tato metoda je vhodná pro měření specifické hmotnosti těles nepravidelných tvarů. Je založena na dvojím vážení tělesa, u něhož specifickou hmotnost hledáme. Měření provádíme pomocí speciálně upravených vah, tzv. hydrostatických vah. Při prvním vážení zjišťujeme hmotnost tělesa (m_1) ve vzduchu, při druhém vážení zjišťujeme hmotnost tělesa (m_2) ponořeného do kapaliny, u níž známe její specifickou hmotnost (ρ_k). Pro výpočet specifické hmotnosti tělesa musíme znát ještě specifickou hmotnost vzduchu (ρ_{vz}).

$$\rho = \frac{m_1(\rho_k - \rho_{vz})}{m_1 - m_2} + \rho_{vz} \quad (8)$$

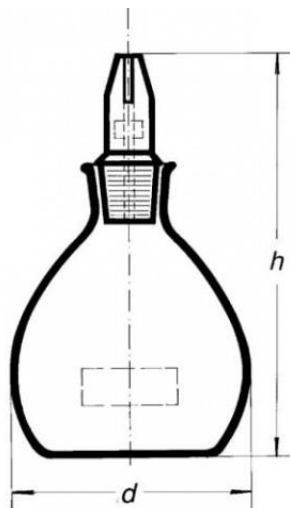
Specifickou hmotnost měřeného tělesa získáme dosazením naměřených hodnot hmotností a všeobecně známých hodnot specifické hmotnosti kapalin a vzduchu do vzorce (8). [11]



Obrázek 1 Hydrostatické váhy pro měření specifické hmotnosti [11]

2.2 Měření specifické hmotnosti pevných látek pomocí pyknometru

Pyknometr je skleněná nádobka se zabroušenou zátkou, u které známe její objem. V zátkě je kapilára, kterou po naplnění kapalinou unikne její přebytek. Pyknometry se vyrábějí pro objemy 25 až 100 cm³.



Obrázek 2 Pyknometr [10]

Metoda měření pomocí pyknometru je ve většině případů používána pro stanovení specifické hmotnosti malých, drobných tělísek. Rozměry těchto tělísek jsou závislé na průměru hrdla pyknometru. Měřené vzorky nejdříve zvážíme pomocí laboratorních vah na vzduchu, tím zjistíme jejich hmotnost (m). Poté zvážíme čistý, suchý a prázdný pyknometr, i se zátkou (m_1). V dalším kroku naplníme pyknometr kapalinou, uzavřeme jej zátkou. Naplněný pyknometr opět zvážíme (m_2). Rozdíl hodnot hmotností m_2 a m_1 nám udává objem pyknometru V_p v cm³. Do pyknometru naplněného kapalinou nasypeme měřené vzorky, pyknometr uzavřeme zátkou a přebytečnou kapalinu vytekou skrze kapilární otvor důkladně osušíme. Nakonec takto naplněný a uzavřený pyknometr zvážíme a získáme hmotnost (m_3). Z navážených hodnot hmotností vypočítáme objem vzorku ze vzorce (9) a následně po dosazení hodnoty objemu vzorku a jeho hmotnosti do vzorce (7) vypočítáme hledanou specifickou hmotnost. [9] [10]

$$V = (m_2 - m_1) - \{m_3 - (m_1 + m)\} \quad (9)$$

2.3 Měření specifické hmotnosti pevných látek metodou stejných hustot

Metodu stejných hustot používáme pro stanovení specifické hmotnosti velmi drobných tělísek. Spočívá ve vznášení tělíska v kapalině, která má stejnou specifickou hmotnost. Takovouto kapalinu získáme mísením jedné kapaliny se specifickou hmotností větší než je specifická hmotnost tělíska a druhé kapaliny se specifickou hmotností menší než je specifická hmotnost měřeného tělíska. Jakmile docílíme stavu, kdy se tělíska vznášejí v kapalině, změříme specifickou hmotnost této kapaliny např. použitím metody í specifické hmotnosti kapalin pyknometrem. Tímto zjistíme hodnotu specifické hmotnosti námi měřených tělísek. Pro docílení okamžiku vznášení tělíska můžeme měnit specifickou hmotnost kapaliny také změnou teploty kapaliny. V tabulce 1 jsou uvedené vhodné kapaliny pro měření touto metodou. [1]

Tabulka 1 Kapaliny vhodné pro měření metodou stejných hustot [1]

Látka	Hustota [kg/m ³]	Látka	Hustota [kg/m ³]
Acetylentetrabromid	3 000	Chloroform	1 490
Bromoform	2 892	Benzen	881
Bromnaftalen	1 483	Toluen	890
Metylenjodid	2 270	Xylen	870
Vodný roztok jodidu draselnortuňného nebo barnortuňného	až 3 200	Vodný roztok chloridu sodného nebo dusičnanu sodného	1 148 - 1 420

Vzhledem k tomu, že je specifická hmotnost kapalin závislá na teplotě, je nutné u všech měření měřit také teplotu a hodnoty známých specifických hmotností z tabulek dosazovat pro dané teploty. Dále je třeba zajistit, aby při ponořování těles neulpěly vzduchové bublinky na jejich povrchu. Tyto bublinky by mohly zapříčinit chybný výsledek, zvláště pak u měření drobných tělísek. Jelikož je předpoklad, že látky, u kterých měříme specifickou hmotnost, se ponořením do kapaliny nemění, tak volíme vždy takovou kapalinu, ve které se měřená látka nerozpouští, či chemicky nereaguje.

2.4 Měření specifické hmotnosti pevných látek metodou přímou

Přímá metoda měření specifické hmotnosti spadá do metod naprosto nenáročných na laboratorní vybavení a finanční prostředky. Je vhodná především pro zjišťování specifických hmotností pevných těles s pravidelnými geometrickými tvary. Pro

uskutečnění této metody je zapotřebí pouze laboratorních vah a buďto mikrometru, posuvného měřítka či pravítka. Při použití pravítka se nám však zvyšuje nejistota měření díky nepřesnosti odečtení hodnot rozměrů. Měřené těleso si nejprve pomocí laboratorních vah zvážíme, čímž dostaneme hodnotu hmotnosti. Poté si přeměříme rozměry zkoumaného tělesa uvedenými měřidly a vypočteme pomocí geometrických vztahů uvedených v MFCH tabulkách jeho objem. Následně si dosadíme hodnoty získané vážením a výpočtem objemu do klasického vztahu pro výpočet specifické hmotnosti tělesa (7) uvedeného v MFCH tabulkách.

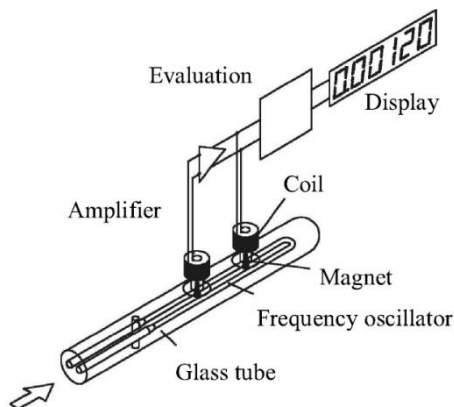
2.5 Měření specifické hmotnosti pomocí oscilačních hustoměrů

Tato metoda měření specifické hmotnosti látek je vhodná spíše pro vzorky kapalně, či vzorky pevné, nepravidelných tvarů, které jsou rozpustné v kapalinách.

2.5.1 Princip činnosti oscilačních hustoměrů

Princip činnosti oscilačních hustoměrů je založen na zákonu harmonického kmitání, ve kterém je trubice tvaru U zcela naplněna analyzovaným vzorkem a podrobena elektromagnetické síle. Měření frekvence a trvání vibrací trubice naplněné vzorkem umožňuje stanovení hodnoty specifické hmotnosti vzorku. [6]

Měřicí buňka se skládá z oscilátoru tvořeného trubicí ve tvaru písmene U z borosilikátového skla, která obsahuje asi 0,7 ml vzorku. Tato trubice má dvojité stěny a prostor mezi nimi je vyplněn plynem s vysokým koeficientem tepelné vodivosti. V tomto prostoru je také umístěn platinový odporový teploměr, který umožňuje měření teploty kapaliny během měření specifické hmotnosti. Zbývající přístrojové vybavení se skládá ze systému elektronického vybuzení a elektrických komponentů, které poskytují periodický přenos signálu do procesorové jednotky bez rušení. [5]



Obrázek 3 Měřicí ústrojí oscilačního hustoměru [6]

Trubice ve tvaru U osciluje na svém základním kmitočtu, který je funkcí hmoty systému. Předpokládáme-li, že objem vzorku uvnitř buňky je konstantní, je možné vidět, že oscilační kmitočet je tedy funkcí specifické hmotnosti vzorku. Perioda oscilace T je dána vztahem (10).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\rho V + m}{c}} \quad (10)$$

Kde ρ je specifická hmotnost vzorku, V objem buňky, m hmotnost buňky a C tuhost pružiny. Umocněním této rovnice a nahrazením G (11) a H (12) dostaneme rovnici (13):

$$G = \frac{4\pi^2 V}{c} \quad (11)$$

$$H = \frac{4\pi^2 m}{c} \quad (12)$$

$$\rho = \frac{(\tau^2 - H)}{G} \quad (13)$$

V průběhu oscilací U-trubice vzorek způsobuje tlumení kmitání. Toto tlumení je funkcí viskozity vzorku. Viskozita vzorku bude mít za následek také nepatrné pohyby oscilačních uzlů, čímž se zvyšuje zdánlivý objem buňky. Kombinací těchto dvou účinků je chyba k v kg/m^3 v řádu $k \approx 0,05\sqrt{\eta}$, kde η je viskozita v $\text{mPa} \cdot \text{s}$.

Měřicí buňka osciluje na několika frekvencích ve dvou režimech. To umožňuje, aby byl vzorek změřen správně se správnou korekcí. Je-li měřítko kalibrováno, pak je specifická hmotnost funkcí oscilační periody τ a tlumení. [5]

Software přístroje obsahuje předpoklad rovnice (14), že:

$$\rho = A\tau^2(1 + D.tlumení + E.tlumení^2) - B + C\tau^4 \quad (14)$$

kde A, B, C a D jsou koeficienty stanovené kalibrací přístroje pomocí dvou látek se známou specifickou hmotností, typickými látkami jsou vzduch a voda. Studie provedená v několika přístrojích stejného typu používajícího širokou škálu CRM a vody odhalila, že výše uvedená rovnice s interakcí mezi délkou a tlumením je zbytečně složitá. Pro vzorky o specifické hmotnosti mezi 690 a 1620 kg/m³ a viskozitě nad 600 mPa * s, je rovnice (15) vhodnější. Pro kapaliny se stejným rozsahem specifických hmotností, ale s viskozitou nižší než 30 mPa * s, lépe popisuje chování buněk uvedená rovnice (16). [5]

$$\rho = A + B\tau^2 + C.tlumení \quad (15)$$

$$\rho = A + B\tau^2 + \frac{C}{tlumení} \quad (16)$$

2.5.2 Kalibrace oscilačních hustoměrů

Kalibrace oscilačních hustoměrů jsou prováděny na teplotu 20°C, pomocí srovnávací metody, která používá vodné roztoky k měření specifické hmotnosti v intervalu 500 až 2000 kg/m³. Postup využívaný pro kalibraci je uveden v dokumentu ČSN EN ISO 15212-1 z roku 2000. Specifická hmotnost připravených vzorků se měří standardním hustoměrem a oscilačním hustoměrem pracujících současně, což zajišťuje řešení ve stejných podmínkách. Certifikace specifické hmotnosti kapalných vzorků se provádí podle postupu založeného taktéž na ČSN EN ISO 15212-1. Výsledky získané při kalibraci jsou uvedeny v osvědčení o kalibraci, popisující vlastnosti kalibrovaného přístroje, podmínky pokusu, chyby a rozšířenou nejistotu spojenou s každou hodnotou specifické hmotnosti testovaného vzorku.[8]

3 NÁVRH METODY PRO MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELÝCH TĚLES

Při návrhu vhodné metody pro měření specifické hmotnosti nepravidelných těles jsme vycházeli ze stavové rovnice ideálního plynu (17), uvedené v matematicko-fyzikálních a chemických tabulkách. Levou stranu této rovnice jsme si rozepsali (18). Předpokládali jsme, že jde o izotermický děj, proto jsme změny teploty během stlačování neuvažovali. Taktéž látkové množství n a molární plynová konstanta R se nemění. Z toho vyplynulo, že celá pravá strana stavové rovnice je konstantní, tudíž jsme mohli předpokládat jednoduchou rovnici (19).

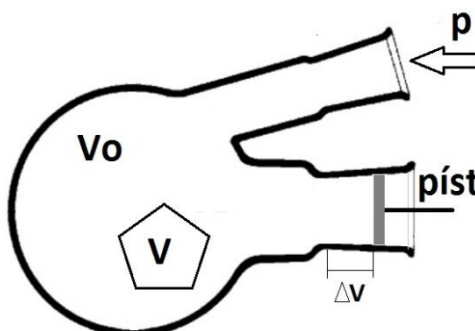
$$p_0V_0 = nRT \quad (17)$$

$$(p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V) = nRT \quad (18)$$

$$p_0V_0 = (p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V) \quad (19)$$

V dalším postupu jsme si naměřili hodnotu počátečního tlaku p_0 , hodnotu o kterou jsme tlak změnili Δp a hodnotu o kterou jsme změnili objem ΔV . Pro naměření těchto hodnot jsme použili skleněnou baňku se dvěma vývody, jeden sloužící pro změnu objemu v baňce pomocí pístu a druhý pro změření změny tlaku, na který byl napojen přístroj pro měření změny tlaku v soustavě. Schéma je vyobrazeno na obrázku 4. Z naměřených hodnot jsme vypočítali hodnotu objemu měřicí soustavy V_0 z rovnice (20), kterou jsme získali z výše zmíněné rovnice (19) roznásobením pravé strany a následnou úpravou.

$$p_0V_0 = (p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V) \Rightarrow \Delta pV_0 = p_0\Delta V + \Delta p\Delta V \Rightarrow V_0 = \frac{(p_0 + \Delta p)\Delta V}{\Delta p} \quad (20)$$



Obrázek 4 Skleněná baňka pro měření specifické hmotnosti

Po výpočtu objemu V_0 jsme si do baňky vložili vzorek o objemu V , který je nestlačitelný v dané hodnotě změny tlaku Δp . Poté jsme opět naměřili hodnoty tlaku p a Δp a objemu ΔV . Při tomto měření bylo však nutné měnit objem ΔV pomalu. Počáteční stavovou rovnici jsme si museli upravit do tvaru (21), ve kterém byl zahrnut i objem měřeného vzorku, vloženého do měřicí soustavy. I v tomto měření byla pravá strana rovna konstantě, tudíž jsme mohli sestavit rovnici (22) z níž jsme po dalších matematických úpravách dostali rovnici (23) pro výpočet objemu měřeného vzorku vloženého do skleněné baňky.

$$p_0(V_0 - V) = nRT \quad (21)$$

$$p_0(V_0 - V) = (p_0 + \Delta p)(V_0 - V - \Delta V) \quad (22)$$

$$\Delta p V = \Delta p V_0 - p_0 \Delta V - \Delta p \Delta V \Rightarrow V = V_0 - \left(\frac{p_0}{\Delta p} - 1 \right) \Delta V \quad (23)$$

Po výpočtu objemu vzorku pomocí rovnice (23), do které jsme dosadili dříve vypočítaný objem soustavy V_0 , jsme měřený vzorek vyjmuli ze skleněné baňky a na laboratorních vahách jsme změřili jeho hmotnost. Ze získaných hodnot hmotnosti vzorku m a objemu vzorku V jsme dosazením do známého vzorečku (7) uvedeného v matematicko-fyzikálních tabulkách vypočítali specifickou hmotnost měřeného vzorku.

Navrhovaná metoda není nejvhodnější pro měření specifické hmotnosti nerozpustných vzorků, lepší by bylo použití pyknometru. Pokud jsou však měřené vzorky rozpustné v obvyklých kapalinách, nebo si tímto nejsme jisti, tak je navrhovaná metoda pro měření specifické hmotnosti vhodná. Také pokud je specifická hmotnost měřených vzorků menší než specifická hmotnost kapaliny, je vhodné použít navrhovanou metodu měření. [3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

4.1 Mikrometr MITUTOYO QuantuMike 293-140, 0-25 mm

Třmenový digitální mikrometr Mitutoyo QuantuMike, zařazený do série 293, s rozsahem měření od 0 do 25 milimetrů s číslicovým krokem 0,001 milimetru a mezní chybou 2 mikrometry. Tento mikrometr disponuje odolností vůči vniknutí cizího předmětu a kapalin IP 65. [13]

Tabulka 2 Technické parametry mikrometru MITUTOYO [13]

Číslicový krok	0,001 mm
Mezní chyba	0,002 mm
Měřicí rozsah	0 - 25 mm
Hmotnost	265 g



Obrázek 5 Mikrometr MITUTOYO QuantuMike 293-140, 0-25 mm

4.2 Váha KERN PLT 2000-3DM

Přesná multifunkční laboratorní váha KERN PLT 2000-3DM s grafickým displejem a adjustací za pomoci vnitřního závaží. Disponuje 4000 paměťovými registry pro průběžné ukládání naměřených hodnot. Obsahuje i skleněnou proti průvanovou skříňku. [14]

Tabulka 3 Technické parametry váhy KERN PLT 20003DM [14]

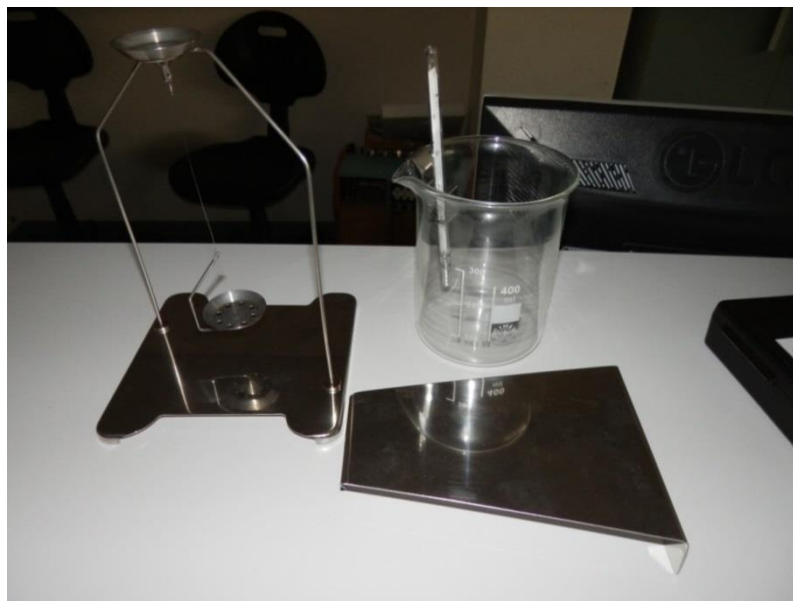
Citlivost d	0,001 g/0,01 g		
Rozsah vážení Max	200/2000 g		
Min. hmotnost kusu	1 mg		
Vážicí miska	128 x 128 mm		
Ověřovací dílek	0,01/0,1 g	DKD certifikát 963-127	lze
Minimální zatížení	0,02/0,5 g	Ověření 950-116	lze
Reprodukovatelnost	0,001/0,01 g	Adjustační závaží	nelze
Linearita	± 0,002/0,02 g	DKD Adjustační závaží	nelze



Obrázek 6 Váha KERN PLT 2000-3DM

4.3 Sada pro stanovení hustoty KERN PLS-A01

Jedná se o dokoupitelnou sadu pro stanovení hustoty, vhodnou pro použití v kombinaci s váhou KERN PLT 2000-3DM, která dokáže na displeji zobrazit již vypočítanou hodnotu hustoty na základě postupného měření. [7]



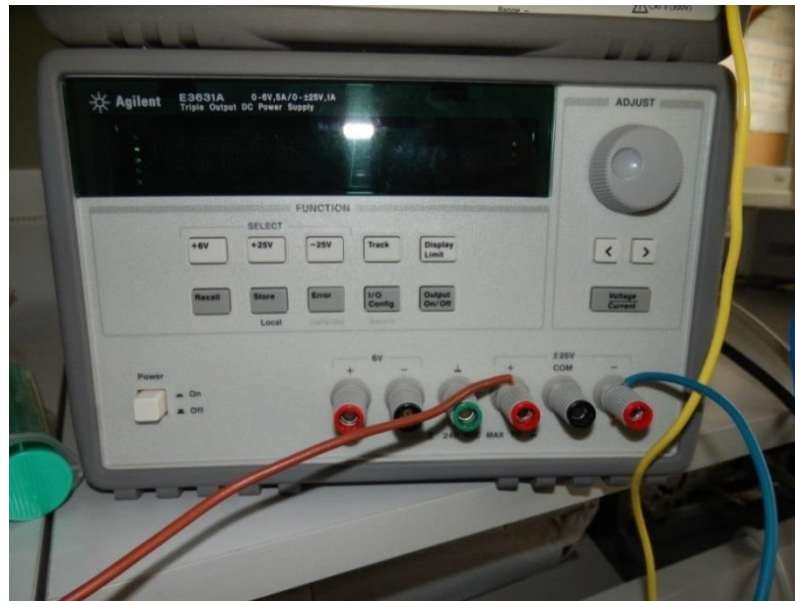
Obrázek 7 Sada pro stanovení hustoty KERN PLS-A01

4.4 Laboratorní síťový zdroj AGILENT E3631A

Programovatelná laboratorní jednotka napájení, u které je možno vybírat mezi výstupním napětím v rozsahu 0 – 6 VDC a výstupním proudem v rozsahu 0 – 5 A. Díky otočnému převodníku je možné plynule nastavit požadovanou hodnotu napětí i proudu. Nastavené údaje lze odčítat na multifunkčním LCD displeji. Disponuje také tlačítkem pro vypnutí nebo zapnutí výstupu a energeticky nezávislou pamětí pro tři nastavení. [15]

Tabulka 4 Technické parametry zdroje AGILENT [15]

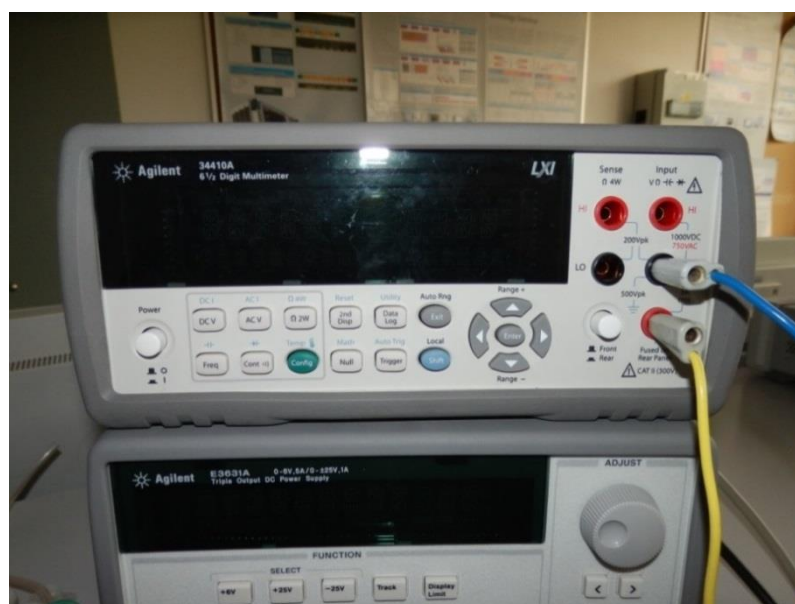
Výstupní napětí 1	0 - 6 VDC
Výstupní proud 1	0 - 5 A
Výstupy	3
Rozhraní	RS232, GPIB
Výstupní napětí 2	0 - 25 VDC
Výstupní proud 2	0 - 1 A
Rozlišení, proud	0,5 mA
Rozlišení, napětí	1 mV
Zbytkové zvlnění	< 350 μ Vrms
Verze konektoru	DE
Vstupní napětí	230 V stř. při 50 Hz
Displej	Fluorescenční indikátor
Rozměry d x š x v	348 x 213 x 133 mm
RoHS	RoHS komp.



Obrázek 8 Laboratorní síťový zdroj AGILENT E3631A

4.5 Multimetr AGILENT 34410A

Multimetr Agilent umožňující měření napětí stejnosměrné až do hodnoty 750 V, střídavé až do hodnoty 1000 V, dále proud do 3 A stejnosměrných i střídavých, kmitočku a periody v rozsahu 3 Hz – 300 kHz, kapacity až do 10 μF , odporu až do 1 G Ω a také teploty pomocí termistoru RTD. Jeho určení je pro velmi přesná měření a také k ověřování digitálních multimetrů. Je také možné jej připojit do měřicího řetězce a tím realizovat plně automatizované měření. Disponuje také pamětí až pro 50 000 hodnot. [16]



Obrázek 9 Multimetr AGILENT 34410A

4.6 Snímač diferenčního tlaku BD SENSORS DPS+

Snímač tlaku DPS+ je vhodný pro měření tlaku, vakua a diferenčního tlaku plynů. Základním prvkem DPS + je teplotně kompenzovaný piezoelektrický tlakový senzor. Funguje bez opotřebení a zajišťuje bezúdržbový provoz. Integrovaná elektronika poskytuje elektrický výstupní signál, který je úměrný měřenému tlaku (proud 0 (4) - 20 mA nebo napětí 0 - 10 V). Disponuje funkcí tlumení pro případ silně střídavých tlakových špiček. Díky své robustní konstrukci je snímač možné použít v laboratořích i v průmyslovém prostředí. Tlakový snímač DPS+ nabízí dobrou dlouhodobou stabilitu, linearitu a opakovatelnost. [17]

Tabulka 5 Technické parametry snímače tlaku DPS+ [17]

Rozsah	0 - 60 000 Pa
Výstup	0 - 10 V/3-vod.
Napájecí napětí	12 - 31 VDC
Zapojení vývodů:	
U_{b+}	2
U_{b-}	4
U_{s+}	3



Obrázek 10 Snímač diferenčního tlaku DPS+

4.7 Digitální manometr KELLER LEO 3

Jedná se o tzv. inteligentní manometr, čímž máme na mysli, že digitální manometr je opatřen dalšími vestavěnými funkcemi a digitálním výstupem. Je teplotně kompenzován a je schopen změřeni a zobrazení aktuální hodnoty tlaku, minimální nebo maximální hodnoty za určitý časový interval. Výstupní signál je v proudovém rozsahu od 4 do 20 mA. [18]

Tabulka 6 Technické parametry manometru KELLER LEO 3 [18]

Rozsah	0 - 700 bar
Přesnost	0,1%
Procesní připojení	G 1/4
Výstupní signál	4 - 20 mA
Zobrazení	bar, mbar, hPa, kPa, Mpa, PSI, kp/cm ²
Stupeň krytí	IP 65



Obrázek 11 Digitální manometr KELLER LEO 3

5 REFERENČNÍ MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI OCELOVÉ KULIČKY

Referenční měření nám pomůže ověřit, zda je navržená metoda měření specifické hmotnosti funkční a dostatečně přesná. Pro referenční měření jsme tedy zvolili za měřený předmět ocelovou kuličku z kuličkového ložiska, u které je známa její hodnota specifické hmotnosti materiálu, ze kterého je vyrobena. Hodnota udána v matematicko – fyzikálních a chemických tabulkách se pohybuje v rozmezí od 7 400 do 8 000 kg/m³. Na ložiskové kuličky se běžně používá ocel kalená, jejíž specifická hmotnost je 7 830 kg/m³. Dále jsme si pomocí teploměru změřili teplotu v laboratoři, jejíž hodnota byla konstantní, konkrétně 21°C. Pro měření dle návrhu metody jsme ještě museli změřit hodnotu atmosférického tlaku pomocí digitálního manometru. [3] [4]

5.1 Měření pomocí přímé metody

V tomto měření jsme nejprve provedli deset po sobě jdoucích měření průměru ocelové kuličky za pomoci mikrometru MITUTOYO. Střední hodnota průměru kuličky vyšla 11,919 milimetrů. Poté jsme kuličku zvážili laboratorní váhou KERN, taktéž v sérii deseti měření jdoucích po sobě. Ze získané hodnoty průměru jsme použitím známého vzorečku pro výpočet objemu koule (24) vypočítali objem ocelové kuličky, a ten pak dosadili do rovnice pro výpočet specifické hmotnosti materiálu (7). Po dosazení průměrné hmotnosti kuličky do rovnice (7) jsme získali výsledky, které jsou uvedeny v tabulce níže. [3]

$$V = \frac{1}{6}\pi d^3 \quad (24)$$

5.1.1 Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky

Tabulka 7 Naměřené hodnoty přímou metodou

Měření průměru kuličky		Vážení kuličky	
	Průměr kuličky [mm]		Hmotnost kuličky [g]
1.	11,918	1.	6,864
2.	11,920	2.	6,865
3.	11,919	3.	6,865
4.	11,919	4.	6,865
5.	11,919	5.	6,865
6.	11,919	6.	6,866
7.	11,919	7.	6,864
8.	11,920	8.	6,865
9.	11,919	9.	6,865
10.	11,919	10.	6,863
Průměr	11,919	Průměr	6,865
Nejistota typu A	0,001	Nejistota typu A	0,001
		Objem kuličky [cm ³]	0,8866
		Hustota kuličky [kg/m ³]	7742,897

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3 = \frac{1}{6} \pi * 1,1919^3 = 0,8866 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6,865}{0,887} = 7,742 \text{ g/cm}^3 = 7742,90 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot pro vážení, měření průměru, výpočet objemu a výpočet specifické hmotnosti:

$$m = 6,865 \pm 0,001 \text{ g}$$

$$d = 11,919 \pm 0,001 \text{ mm}$$

$$V = 0,8866 \pm u_v$$

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{1}{6} 3\pi d^2 u_d\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \pi 11,919^2 * 0,001\right)^2} = 0,223 \text{ mm}^3 = 0,0002 \text{ cm}^3$$

$$\rho = 7743 \pm u_\rho$$

$$u_\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V}u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2}u_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,887} * 0,001\right)^2 + \left(-\frac{6,865}{0,887^2} * 0,0002\right)^2}$$

$$= 0,002 \text{ g/cm}^3 = 2 \text{ kg/m}^3$$



Obrázek 12 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení

5.2 Měření pomocí metody hydrostatického vážení

V tomto referenčním měření kuličky jsme použili laboratorní váhu KERN PLT 2000-3DM a k ní dokoupenou sadu pro měření hustoty KERN PLS-A01. Váhu jsme po zapnutí nechali provést interní kalibraci, poté jsme z ní sejmuli větrný kryt a desku váhy, kterou jsme nahradili stojanem a poté jsme sestavili aparaturu pro měření specifické hmotnosti. Jako kapalinu jsme použili vodu. Po sestavení jsme váhu vynulovali, abychom mohli měřit samotnou váhu kuličky, a poté jsme tak, jako v měření pomocí mikrometru a vah, provedli deset, po sobě jdoucích, měření hmotnosti kuličky ve vzduchu. Naměřené hodnoty jsme zapsali do sloupečku pod označením m_1 v tabulce uvedené níže. Následně jsme provedli deset měření váhy kuličky ponořené do kapaliny (v našem případě do vody). Hodnoty odečtené z displeje váhy jsme zapsali do sloupečku m_2 . Díky znalosti hodnoty specifické hmotnosti kapaliny ($\rho_0 = 998 \text{ kg/m}^3$ udané v matematicko – fyzikálních tabulkách) při teplotě 21°C , do které jsme kuličku ponořili, jsme byli schopni vypočítat specifickou

$$\rho = 7\,755 \pm u_\rho$$

$$u_\rho = \sqrt{(\rho_0 u_m)^2 + \left(\frac{m_1}{m_1 - m_2} * u_{\rho_0}\right)^2}$$
$$= \sqrt{(998 * 0,000001)^2 + \left(\frac{0,006863}{0,006863 - 0,005980} * 0,5\right)^2} = 4 \text{ kg/m}^3$$



Obrázek 13 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení ve vzduchu



Obrázek 14 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení v kapalině

5.3 Měření pomocí pyknometru

Měření jsme provedli za použití pyknometru o objemu 50 ml. Ten jsme i se zátkou suchý a prázdný zvážili pomocí již zmíněné váhy KERN PLT 2000-3DM, taktéž v sérii 10 měření (m_1). Pak jsme pyknometr naplnili vodou až po okraj, uzavřeli jej zátkou a přebytečnou vodu vytečenou ven osušili a opět jej 10krát zvážili (m_2). Po zvážení pyknometru jsme na váze zvážili i měřený vzorek (ocelovou kuličku), což nám dalo hodnotu m . Nakonec jsme do pyknometru naplněného vodou vložili měřenou kuličku a celý zvážili (m_3). Z takto získaných hodnot hmotností jsme poté lehce za pomoci rovnice (26) vypočítali objem měřené ocelové kuličky. Z takto získané hodnoty objemu jsme vypočítali pomocí vzorce pro výpočet specifické hmotnosti (7) výslednou hodnotu specifické hmotnosti ocelové kuličky. [12]

$$V = (m_2 - m_1) - \{m_3 - (m_1 + m)\} \quad (26)$$

5.3.1 Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky

Tabulka 9 Naměřené hodnoty pomocí pyknometru

Měření kuličky pomocí pyknometru				
	m [g]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]
1.	1,397	21,249	71,673	72,891
2.	1,397	21,248	71,670	72,886
3.	1,398	21,249	71,671	72,886
4.	1,398	21,249	71,668	72,887
5.	1,398	21,250	71,669	72,886
6.	1,399	21,249	71,671	72,885
7.	1,398	21,248	71,670	72,885
8.	1,397	21,250	71,669	72,886
9.	1,398	21,248	71,667	72,886
10.	1,397	21,249	71,666	72,883
Průměr	1,398	21,249	71,669	72,886
Nejistota typu A	0,001	0,001	0,002	0,002
Objem kuličky [cm ³]			0,181	
Spec. hmotnost kuličky [g/cm ³]			7,722	

m – hmotnost kuličky

m_1 – hmotnost prázdného suchého pyknometru

m_2 – hmotnost naplněného pyknometru kapalinou

m_3 – hmotnost naplněného pyknometru kapalinou a měřeným vzorkem

$$V = (m_2 - m_1) - \{m_3 - (m_1 + m)\}$$
$$= (71,669 - 21,249) - \{72,886 - (21,249 + 1,398)\} = 0,181 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,398}{0,181} = 7,722 \text{ g/cm}^3 = 7\,722 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot pro vážení, výpočet objemu a výpočet specifické hmotnosti:

$$m = 1,398 \pm 0,001 \text{ g}$$

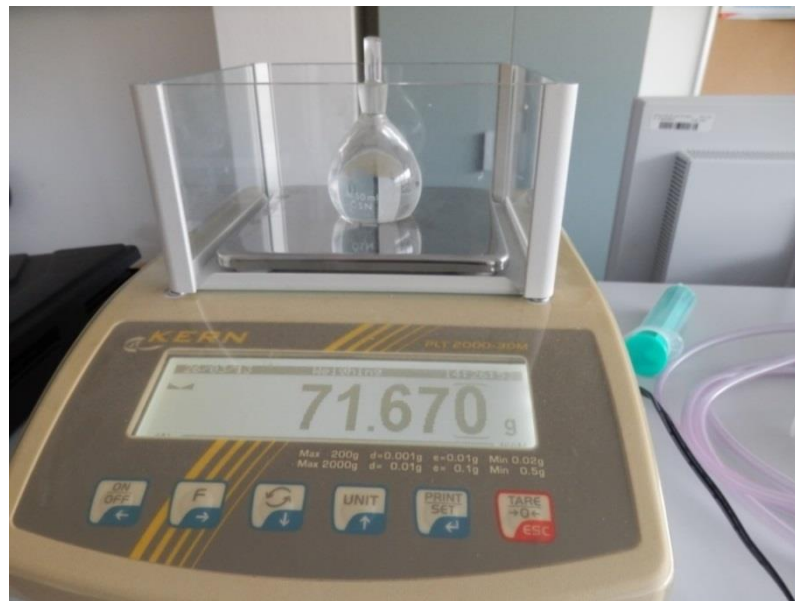
$$V = 0,181 \pm u_V$$

$$u_V = \sqrt{u_m^2 + u_m^2 + (-u_m)^2} = \sqrt{0,001^2 + 0,001^2 + (-0,001)^2} = 0,002 \text{ cm}^3$$

$$\rho = 7\,722 \pm u_\rho$$

$$u_\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V}u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2}u_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,181} * 0,001\right)^2 + \left(-\frac{1,398}{0,181^2} * 0,002\right)^2}$$

$$= 0,09 \text{ g/cm}^3 = 90 \text{ kg/m}^3$$



Obrázek 15 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení pyknometru

5.4 Měření navrhovanou metodou

V referenčním ověření navrhované metody jsme použili snímač tlaku DPS+, dále váhy KERN pro zvažení ocelové kuličky, laboratorní síťový zdroj AGILENT a multimetr téhož výrobce. Pro měření jsme museli ještě sestavit nádobu s větším objemem a náustky pro připojení hadiček. To jsme realizovali pomocí dvou 20 ml injekčních stříkaček, ze kterých jsme vyjmuli písty a vzniklými otvory je slepili k sobě. Na vyrobenou nádobu jsme z jedné strany připojili hadičku jdoucí od injekční stříkačky, kterou měníme tlak a objem v soustavě, a z druhé strany jsme připojili hadičku vedoucí na vstup snímače tlaku DPS+. Snímač tlaku jsme podle zapojení uváděného výrobcem postupně propojili s napájecím zdrojem a multimetrem.

Nejprve jsme si změřili počáteční tlak p_0 , který jsme získali přepočítáním napětí, odečteného z displeje multimetru a k němu přičetli hodnotu atmosférického tlaku. Poté jsme pomocí pístu injekční stříkačky velmi pomalu měnili objem celé soustavy o ΔV , čímž nám narostl tlak o Δp . Změnu objemu ΔV jsme odečetly ze stupnice injekční stříkačky a

změnu tlaku Δp jsme získali přepočtem napětí, změřeného po změně objemu, na tlak p_2 a této hodnoty tlaku p_2 od hodnoty tlaku p_0 . K oběma získaným hodnotám tlaku (p_0 , p_2) jsme ještě museli přičíst hodnotu tlaku atmosférického získaného digitálním manometrem KELLER. Ze získaných hodnot změny objemu, tlaku a počátečního tlaku jsme za použití vzorce (20) vypočítali objem soustavy V_0 . Měření jsme provedli desetkrát, díky čemuž jsme získali deset hodnot objemu V_0 , ze kterých jsme posléze získaly průměrnou hodnotu a nejistotu měření typu A.

Následně jsme do injekční stříkačky uzavřeli ocelovou kuličku. Opět jsme provedli deset měření hodnot počátečního tlaku p_0 , změny tlaku Δp a objemu ΔV , a vypočítali rovnici objemu soustavy V_0 (20), tentokrát s kuličkou uvnitř (V_{0s}).

Výsledný objem kuličky jsme mohli získat dvěma způsoby. V tom prvním za použití rovnice (23) uvedené v návrhu měřicí metody, ve druhém případě jednoduchým odečtením naměřených hodnot objemů soustavy od sebe (27).

$$V = V_0 - V_{0s} \quad (27)$$

Specifickou hmotnost kuličky jsme vypočítali již několikrát zmíněnou rovnicí (7) dosazením naměřené hmotnosti kuličky (viz. 5.1 Měření pomocí mikrometru a vah) a vypočítaného objemu kuličky V .

5.4.1 Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky

Tabulka 10 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu V_0 bez kuličky

Měření hodnot pro výpočet V_0				
	p_0 [Pa]	Δp [Pa]	ΔV [ml]	V_0 [ml]
1.	105 152,00	9 432,00	6	72,89
2.	105 062,00	9 498,00	6	72,37
3.	105 044,00	9 528,00	6	72,15
4.	105 008,00	9 540,00	6	72,04
5.	105 002,00	9 570,00	6	71,83
6.	104 990,00	9 564,00	6	71,87
7.	104 990,00	9 582,00	6	71,74
8.	104 972,00	9 570,00	6	71,81
9.	104 972,00	9 564,00	6	71,85
10.	104 948,00	9 558,00	6	71,88
Průměr				72,04
Nejistota typu A				0,34

Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu V_{0s} s kuličkou

Měření vzorku o objemu V				
	p_0 [Pa]	Δp [Pa]	ΔV [ml]	V_{0s} [ml]
1.	105 476,00	9 648,00	6	71,59
2.	105 440,00	9 642,00	6	71,61
3.	105 416,00	9 648,00	6	71,56
4.	105 404,00	9 648,00	6	71,55
5.	105 374,00	9 678,00	6	71,33
6.	105 350,00	9 684,00	6	71,27
7.	105 350,00	9 678,00	6	71,31
8.	105 356,00	9 678,00	6	71,32
9.	105 350,00	9 666,00	6	71,39
10.	105 350,00	9 666,00	6	71,39
Průměr				71,43
Nejistota typu A				0,13

$$V_0 = \frac{(p_0 + \Delta p)\Delta V}{\Delta p} = \frac{p_0\Delta V}{\Delta p} + \Delta V = \frac{105152 * 6}{9432} + 6 = 72,89 \text{ ml}$$

$$V_{0s} = \frac{(p_0 + \Delta p)\Delta V}{\Delta p} = \frac{p_0\Delta V}{\Delta p} + \Delta V = \frac{105476 * 6}{9648} + 6 = 71,59 \text{ ml}$$

$$V = V_0 - V_{0s} = 72,04 - 71,43 = 0,61 \text{ ml}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6,865}{0,611} = 11,244 \text{ g/cm}^3 = 11\,244 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot

Kombinovaná nejistota hmotnosti:

$$m = 6,865 \pm 0,001 \text{ g}$$

Kombinovaná nejistota měřeného tlaku:

$$p_0 = 105\,476 \pm 600 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 9\,648 \pm 600 \text{ Pa}$$

Kombinovaná nejistota změny objemu:

$$\Delta V = 6,00 \pm 0,25 \text{ ml}$$

Nejistota typu B pro výpočet objemu V_0 :

$$\begin{aligned} u_{V_0B} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{\Delta p} u_{p_0}\right)^2 + \left(-\frac{p_0\Delta V}{\Delta p^2} u_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{p_0 + 1}{\Delta p} u_{\Delta V}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{6}{9432} * 600\right)^2 + \left(-\frac{105152 * 6}{9432^2} * 600\right)^2 + \left(\frac{105152 + 1}{9432} * 0,25\right)^2} \\ &= 5 \text{ ml} \end{aligned}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet objemu V_0 :

$$V_0 = 72 \pm u_{V_0}$$

$$u_{V_0} = \sqrt{(u_{V_0A})^2 + (u_{V_0B})^2} = \sqrt{0,34^2 + 5,1^2} = 5 \text{ ml}$$

Nejistota typu B pro výpočet objemu V_{0s} :

$$\begin{aligned} u_{V_{0s}B} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{\Delta p} u_{p_0}\right)^2 + \left(-\frac{p_0 \Delta V}{\Delta p^2} u_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{p_0 + 1}{\Delta p} u_{\Delta V}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{6}{9648} * 600\right)^2 + \left(-\frac{105476 * 6}{9648^2} * 600\right)^2 + \left(\frac{105476 + 1}{9648} * 0,25\right)^2} \\ &= 5 \text{ ml} \end{aligned}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet objemu V_{0s} :

$$V_{0s} = 71 \pm u_{V_{0s}}$$

$$u_{V_{0s}} = \sqrt{(u_{V_{0s}A})^2 + (u_{V_{0s}B})^2} = \sqrt{0,13^2 + 4,93^2} = 5 \text{ ml}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet objemu V :

$$V = 0,6 \pm u_V$$

$$u_V = \sqrt{u_{V_0}^2 + (-u_{V_{0s}})^2} = \sqrt{5,12^2 + (-4,94)^2} = 7 \text{ ml}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet specifické hmotnosti ρ :

$$\rho = 11\,244 \pm u_\rho$$

$$\begin{aligned} u_\rho &= \sqrt{\left(\frac{1}{V} u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2} u_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,611} * 0,001\right)^2 + \left(-\frac{6,865}{0,611^2} * 7,12\right)^2} \\ &= 130,930 \text{ g/cm}^3 = 130\,930 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$



Obrázek 16 Referenční měření specifické hmotnosti: Měření objemu kuličky navrhouanou metodou

6 MĚŘENÍ SPECIFICKÉ HMOTNOSTI NEPRAVIDELNÉHO TĚLESA

Do aparatury sestavené při referenčním měření jsme vložili vzorek nepravidelných tvarů, v našem případě jsme použili cukr krystal s hmotností 5,481 g. Kvůli zamezení změny hmotnosti měřeného vzorku jsme jej vážili již v injekční stříkačce, kterou jsme si předem zvážili prázdnou, čistou a suchou. Odečtením hmotnosti prázdné injekční stříkačky od získané hodnoty hmotnosti injekční stříkačky s cukrem jsme získali hmotnost měřeného vzorku. Stejně tak, jako v referenčním měření, jsme provedli deset změn objemu a tím jsme i desetkrát změnili tlak v soustavě. Získané hodnoty jsme zapsali do tabulky a poté vypočítali objem V_{0s} dle vzorce (20). Z výsledných hodnot objemu jsme vypočítali průměr a stanovili nejistotu typu A. Dále jsme za použití výsledku objemu V_0 z měření objemu soustavy bez kuličky v referenčním měření vypočítali podle vzorce (27) rozdíl hodnot objemu V_{0s} s cukrem a V_0 bez kuličky, čímž jsme získali hodnotu objemu měřeného vzorku. Nakonec jsme provedli výpočet specifické hmotnosti (7) vzorku ze získaných hodnot hmotnosti a objemu a vypočítali nejistoty typu B.

6.1 Naměřené hodnoty, výpočty a výsledky

Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu vzorku

Měření vzorku o objemu V				
	p_0 [Pa]	Δp [Pa]	ΔV [ml]	V_{0s} [ml]
1.	105 332,00	10 152,00	6	68,253
2.	105 356,00	10 134,00	6	68,378
3.	105 320,00	10 152,00	6	68,246
4.	105 326,00	10 140,00	6	68,323
5.	105 326,00	10 146,00	6	68,286
6.	105 332,00	10 152,00	6	68,253
7.	105 308,00	10 152,00	6	68,239
8.	105 308,00	10 158,00	6	68,202
9.	105 296,00	10 158,00	6	68,195
10.	105 284,00	10 164,00	6	68,151
Průměr				68,253
Nejistota typu A				0,062

$$V_{0s} = \frac{(p_0 + \Delta p)\Delta V}{\Delta p} = \frac{p_0\Delta V}{\Delta p} + \Delta V = \frac{105332 * 6}{10152} + 6 = 68,253 \text{ ml}$$

$$V = V_0 - V_{0s} = 72,044 - 68,253 = 3,791 \text{ ml}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{5,481}{3,791} = 1,446 \text{ g/cm}^3 = 1\,446 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot

Kombinovaná nejistota hmotnosti:

$$m = 5,481 \pm 0,001 \text{ g}$$

Kombinovaná nejistota měřeného tlaku:

$$p_0 = 105\,332 \pm 600 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 10\,152 \pm 600 \text{ Pa}$$

Kombinovaná nejistota změny objemu:

$$\Delta V = 6 \pm 0,25 \text{ ml}$$

Nejistota typu B pro výpočet objemu V_{0s} :

$$\begin{aligned} u_{V_{0s}B} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{\Delta p} u_{p_0}\right)^2 + \left(-\frac{p_0 \Delta V}{\Delta p^2} u_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{p_0 + 1}{\Delta p} u_{\Delta V}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{6}{10152} * 600\right)^2 + \left(-\frac{105332 * 6}{10152^2} * 600\right)^2 + \left(\frac{105332 + 1}{10152} * 0,25\right)^2} \\ &= 4,52 \text{ ml} \end{aligned}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet objemu V_{0s} :

$$V_{0s} = 68 \pm u_{V_{0s}}$$

$$u_{V_{0s}} = \sqrt{(u_{V_{0s}A})^2 + (u_{V_{0s}B})^2} = \sqrt{0,062^2 + 4,52^2} = 5 \text{ ml}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet objemu V :

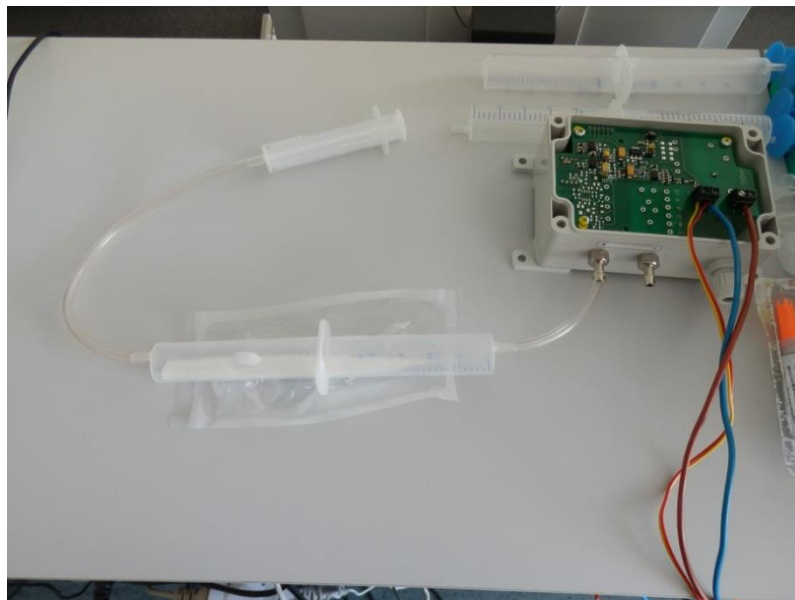
$$V = 3 \pm u_V$$

$$u_V = \sqrt{u_{V_0}^2 + (-u_{V_{0s}})^2} = \sqrt{5,12^2 + (-4,52)^2} = 7 \text{ ml}$$

Kombinovaná nejistota pro výpočet specifické hmotnosti ρ :

$$\rho = 1\,446 \pm u_\rho$$

$$u_\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V}u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2}u_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3,791} * 0,001\right)^2 + \left(-\frac{5,481}{3,791^2} * 6,82\right)^2} = 3 \text{ g/cm}^3$$
$$= 3\,000 \text{ kg/m}^3$$



Obrázek 17 Měření specifické hmotnosti nepravidelného tělesa

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této části provedeme zhodnocení výsledků získaných měření a přesností jednotlivých měření.

Hodnota specifické hmotnosti ρ při referenčním měření ocelové kuličky přímou metodou nám vyšla $(7\,743 \pm 2) \text{ kg/m}^3$. Tato nejistota byla způsobena nejistotou výpočtu objemu V kuličky, který měl velikost $(0,8866 \pm 0,0002) \text{ cm}^3$ a také skutečností, že použité přístroje měly svá omezení v rozlišovacích schopnostech, jejichž hodnoty byly rovny u mikrometru 0,001 mm a u laboratorních vah 0,001 g.

Při použití metody hydrostatického vážení pro získání hodnoty specifické hmotnosti ocelové kuličky nám tato hodnota vyšla $(7\,755 \pm 4) \text{ kg/m}^3$. Velikost nejistoty byla způsobena především neznalostí nejistoty vzniklé při stanovení specifické hmotnosti kapaliny (v našem případě vody), jelikož jsme hodnotu specifické hmotnosti kapaliny ρ_v získali z matematických, fyzikálních a chemických tabulek. Proto jsme uvažovali hodnotu ρ_v jako konstantu. Také v tomto případě se nám do nejistoty měření specifické hmotnosti promítla i nejistota použitého přístroje, čili laboratorních vah, s hodnotou 0,001 g.

Při měření ocelové kuličky pyknometrem jsme zvolili kuličku o průměru menším, než v předchozích případech z důvodu omezení rozměrů hrdlem pyknometru, avšak ze stejného materiálu. Měření nám stanovilo hodnotu specifické hmotnosti tohoto tělesa rovnou $(7\,722 \pm 90) \text{ kg/m}^3$. Nejistota byla ovlivněna i nejistotou při výpočtu objemu kuličky, který nám vyšel $(0,181 \pm 0,002) \text{ cm}^3$. Také nejistota použitých přístrojů, v této metodě také pouze laboratorních vah, s hodnotou 0,001 g nám ovlivnila nejistotu měření specifické hmotnosti.

Měření navrhovanou metodou jsme získali hodnotu specifické hmotnosti ocelové kuličky naprosto mimo rozmezí, udávané v MFCH tabulkách pro ocel, konkrétně jsme získali hodnotu $11\,244 \text{ kg/m}^3$. Při měření nepravidelného tělesa navrhovanou metodou jsme použili jako vzorek cukr krystal, který má dle tabulek specifickou hmotnost $1\,600 \text{ kg/m}^3$. Měření a výpočtem nám vyšla hodnota specifické hmotnosti $(1\,446 \pm 3\,000) \text{ kg/m}^3$. Chybné výsledky specifické hmotnosti byly ovlivněny především nejistotou vzniklou při zjišťování objemu V měřeného tělesa. Tento objem jsme získali z rozdílu hodnot objemů prázdné soustavy V_0 a soustavy s kuličkou V_{0s} , popřípadě s cukrem V_{0sc} . Nejistota, vzniklá při měření a výpočtu objemu soustavy V_0 , byla rovna 6 cm^3 , což při objemu $V_0 = 72 \text{ cm}^3$

představuje relativní chybu 7%. Objem soustavy s ocelovou kuličkou V_{0s} jsme vypočítali $(71 \pm 5) \text{ cm}^3$. Tato nejistota představuje také 7% relativní chybu. Tyto chyby jsou však v mezích. Jakmile jsme ale vypočítávali objem V měřeného tělesa pomocí rozdílu hodnot V_0 a V_{0s} , vyšla nám nejistota rovna 7 cm^3 , což při námi zjištěném objemu tělesa $V = 0,6 \text{ cm}^3$ představuje relativní chybu ve výši 1 167%. Tato chyba je obrovská. V soustavě s cukrem jsme stanovili objem soustavy V_{0sc} roven $(68 \pm 5) \text{ cm}^3$, což také odpovídá relativní chybě 7%. Objem cukru v soustavě jsme vypočítali s hodnotou $(3 \pm 6) \text{ cm}^3$. Zde se nám relativní chyba rovnala 179,7%. Z výsledků tedy vyplývá, že námi měřené vzorky měly nedostatečně velký objem, což nám způsobilo výše uvedené chyby, a tudíž pro využití této metody ke stanovení specifické hmotnosti nepravidelných těles musíme použít zkoumané vzorky o podstatně větším objemu. Abychom se dostali do reálných mezí, za které můžeme považovat relativní chybu měření do 10 %, potřebovali bychom vzorek o objemu přesahující $71,2 \text{ cm}^3$. Pro tělesa menších objemů je tato metoda při dané konfiguraci nevhodná.

Nejpřesnější metodou pro měření specifické hmotnosti pevných těles byla metoda přímá, avšak při této metodě není jednoduché změřit rozměry nepravidelného tělesa. Druhou nejpřesnější metodou byla metoda hydrostatická. Metoda měření pomocí pyknometru se nám projevila jako třetí nejpřesnější. Tato je však omezena průměrem hrdla pyknometru. Pro větší rozměry je proto vhodné použít metodu hydrostatického vážení, kterou jsme stanovili jako nejpřesnější. Při použití metody pyknometrické a hydrostatické však musíme použít měřené vzorky takové, které nejsou rozpustné v běžných kapalinách. Podle získaných výsledků měření pomocí navrhované metody jsme došli k závěru, že tato metoda není vhodná pro měření specifické hmotnosti nepravidelných těles o objemu menším, než $71,2 \text{ cm}^3$.

Tabulka 13 Srovnání výsledků získaných jednotlivými metodami

Použitá metoda	Specifická hmotnost [kg/m^3]	Kombinovaná nejistota [kg/m^3]
Přímá	7 743	2
Hydrostatická	7 755	4
Pyknometrická	7 722	90
Navrhovaná - ocelová kulička	11 244	130 930
Navrhovaná - cukr	1 446	3 000

ZÁVĚR

V úvodu této bakalářské práce jsme si objasnili, nebo spíše připomněli, co to vlastně specifická hmotnost neboli hustota je a objasnili si správnou definici této fyzikální veličiny, která udává, že hustota je vyjádřena poměrem hmotnosti měřené látky, ať už plynné, kapalně či pevné, a objemem této látky. Dále jsme si uvedli, že hodnoty specifické hmotnosti některých látek můžeme najít ve středoškolských MFCH tabulkách. Zmínili jsme i faktory jako jsou teplota a znečištění látky, na kterých je specifická hmotnost závislá.

Na začátku teoretické části jsme pojednali o všeobecných základech měření, které bychom měli při zjišťování hodnot určitých veličin dodržovat a řídit se jimi. Mezi tyto základy patří příprava měření, metody měření, druhy chyb měření a nejistoty měření. Metody měření jsme si rozdělili na metody přímé a nepřímé, absolutní a relativní, statické a dynamické. Dalšími metodami pak byly metoda substituční, kompenzační, interpolační a metoda postupných měření. Každou metodu jsme si zvlášť popsali. Mezi druhy chyb jsme zařadili náhodné chyby a systematické, které jsme dále rozepsali. Stejným způsobem jsme zpracovali i nejistoty měření.

V další části jsme si rozebrali jednotlivé měřicí metody, vhodné pro měření specifické hmotnosti pevných těles, i metodu oscilačních hustoměrů, které se spíše používá pro měření vzorků kapalných. Měřicí metody pyknometrické, hydrostatické a přímé jsme využili v praktické části, kde jsme referenčním měřením zjišťovali hustotu ocelové kuličky, abychom mohli ověřit navrženou měřicí metodu.

Při měření hustoty metodou přímou jsme zjistili, že tato metoda je vhodná pro měření specifické hmotnosti pevných látek a dokonce je i nejpřesnější. Pokud se však jedná o nepravidelná tělesa, tak by bylo náročné změřit jejich rozměry. Jako nejvhodnější metodu pro měření specifické hmotnosti nepravidelných těles jsme určili metodu hydrostatickou, která nám dovoluje použít k měření i vzorky větších rozměrů. Metoda pyknometrická již není tolik vhodná pro stanovení specifické hmotnosti nepravidelných těles z důvodu větší nejistoty a nutnosti použít měřené vzorky menších rozměrů z důvodu průchodnosti hrdlem pyknometru. Tyto vzorky však musí být v obou metodách nerozpustné v běžných kapalinách.

Dále jsme ověřením zjistili, že navrhovaná metoda je vhodná pro měření specifické hmotnosti nepravidelných těles, avšak je třeba použít měřené vzorky o objemu minimálně $71,2 \text{ cm}^3$. Pro vzorky menších objemů je tato metoda nevhodná z důvodu nejistoty měření, vzniklé při zjišťování objemu vzorku výpočtem.

Výstupem této práce je i návrh laboratorní úlohy včetně vzorového protokolu. Tuto úlohu společně se vzorovým protokolem jsme uvedli v přílohách.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

At the beginning of this work we have explained, or rather reminded, what it actually specific gravity or density is, and clarify the correct definition of physical quantity which indicates that the density is expressed as the ratio of the weight of measured substance, whether gaseous, liquid, or solid, and the volume of the substance. Further, we stated that the values of the specific gravity of certain substances we can find in MFCH tables of high schools. We mentioned factors such as temperature and pollution substances, on which is specific gravity dependent.

At the beginning of the theoretical part, we discussed about the general basics of measurement that we should observe in determining the values of certain variables to and abide by them. These general basics include the preparation, measurement methods, types of measurement errors and measurement uncertainty. Methods of measurement we have divided to methods of direct and indirect, absolute and relative, static and dynamic. Other methods were substitution method, compensation, interpolation and method of gradual measurement. Each method we described separately. Among the types of errors we included random and systematic errors, which are further expanding them. In the same way we processed also measurement uncertainties.

In the next section we dismantled each measurement methods suitable for measuring specific weight of solids, also the method of oscillating hydrometers that rather use for the measurement of liquid samples. Measuring methods by pycnometer, hydrostatic weighing and direct we used in the practical part, where we investigated density steel ball by the reference measurement to verify the proposed measuring method.

In measurement of density by direct method, we found that this method is suitable for measuring the specific weight of solids and even also most accurate. If the measured solids have irregular body, it would be difficult to measure their dimensions. The most suitable method for measuring the specific gravity of irregular elements we determined a hydrostatic method, which allows us to use also samples of larger dimensions for measurement. Pycnometer method is not so suitable for determining the specific gravity of irregular bodies due bigger uncertainty and urgency to use measured samples of smaller size due to patency of neck pycnometer. These samples must be insoluble in both methods in ordinary liquids. These samples must be insoluble in ordinary liquids in both methods.

Further, we found by verification, that the proposed method is suitable for measuring the specific gravity of irregular bodies, but it is necessary to use the measured samples of volume least 71.2 cm³. For samples of smaller volumes, this method is unsuitable because of uncertainty, incurred in finding volume of sample by calculation.

The outcome of this work is the design laboratory task including sample protocol. This task, together with the model protocol we stated in the Annexes.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1967, 523 s.
- [2] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008, 96 s. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [3] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007, 206 s. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [4] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011, xiv, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [5] STABINGER, Hans. *Density Measurement using modern oscillating transducers*. Scheffield, 1994.
- [6] Measurement of density using oscillation-type density meters. *Instituto Portugues da Qualidade* [online]. 2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.ipq.pt/backfiles/MesureMasseVolumique.pdf>
- [7] KERN & SOHN GMBH. *Instrukce obsluhy: Sada ke stanovení hustoty KERN ALS/PLS-A01*. Balingen, 2008.

NORMY A PŘEDPISY

- [8] ČSN EN ISO 15212-1. *Oscilační hustoměry - Část 1: Laboratorní přístroje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [9] Pyknometr. *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. 2009-2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/fchlab/Pyknometr.htm>
- [10] Stanovení hustoty pyknometrem. *Sweb.cz* [online]. 2001 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: pohunka.sweb.cz/5.doc
- [11] Kapitola 9: Stanovení hustoty pevných a kapalných látek. *Mendelova zemědělská a lesnická univerzita: Zahradnická fakulta* [online]. 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: tilia.zf.mendelu.cz/~pavlacka/af/download/c09.pdf
- [12] Stanovení hustoty pevné látky pyknometrem. *Univerzita Karlova v Praze: Pedagogická fakulta* [online]. 2006 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://userweb.pedf.cuni.cz/wp/kch/files/2010/10/LATECHNavody.pdf>

- [13] Třmenový mikrometr digitální MITUTOYO QuantuMike, IP-65, serie 293, 293-140, 0-25 mm. *M & V* [online]. 2004-2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://katalog.mav.cz/detail.php?id=70937&lang=0>
- [14] PLT Přesná váha: Multifunkční laboratorní váhy s moderním grafickým displejem. *Kern* [online]. 2007 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.kern-vahy.cz/cz/partnershop/catalogue-122.html>
- [15] Laboratorní jednotka napájení, programovatelná DE. *DISTRELEC* [online]. 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/laboratorn%C3%AD-jednotka-nap%C3%A1jen%C3%AD-programovateln%C3%A1-de/agilent/e3631a/924019>
- [16] Agilent 34410A/11A 6 1/2místný digitální multimetr: Návod k obsluze. *Htest* [online]. 2005-2006 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.htest.cz/download/34410A.pdf>
- [17] DPS+: Pressure Transmitter for Differential Pressure. *Flow Sensor* [online]. 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.flowsensor.com.tw/driver/drivers/datasheet_dps_00011e.pdf
- [18] Digitální manometry LEO 3 s výstupem 4 až 20 mA. *JSP: Měření a regulace* [online]. 2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/digitalni_manometry/digitalni-manometry-vystupem-4-az-20-ma-leo-3.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MFCH Matematické, fyzikální a chemické tabulky

CRM Certifikované referenční materiály

SI Mezinárodní soustava jednotek

CGS Absolutní systém jednotek

RTD Resistance temperature detector

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Hydrostatické váhy pro měření specifické hmotnosti [11]	19
Obrázek 2 Pyknometr [10].....	20
Obrázek 3 Měřicí ústrojí oscilačního hustoměru [6]	23
Obrázek 4 Skleněná baňka pro měření specifické hmotnosti	25
Obrázek 5 Mikrometr MITUTOYO QuantuMike 293-140, 0-25 mm	28
Obrázek 6 Váha KERN PLT 2000-3DM.....	29
Obrázek 7 Sada pro stanovení hustoty KERN PLS-A01.....	30
Obrázek 8 Laboratorní síťový zdroj AGILENT E3631A.....	31
Obrázek 9 Multimetr AGILENT 34410A	31
Obrázek 10 Snímač diferenčního tlaku DPS+	32
Obrázek 11 Digitální manometr KELLER LEO 3	33
Obrázek 12 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení.....	36
Obrázek 13 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení ve vzduchu	38
Obrázek 14 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení v kapalině	39
Obrázek 15 Referenční měření specifické hmotnosti: Vážení pyknometru	41
Obrázek 16 Referenční měření specifické hmotnosti: Měření objemu kuličky navrhovanou metodou	46
Obrázek 17 Měření specifické hmotnosti nepravidelného tělesa	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Kapaliny vhodné pro měření metodou stejných hustot [1].....	21
Tabulka 2 Technické parametry mikrometru MITUTOYO [13].....	28
Tabulka 3 Technické parametry váhy KERN PLT 20003DM [14].....	29
Tabulka 4 Technické parametry zdroje AGILENT [15]	30
Tabulka 5 Technické parametry snímače tlaku DPS+ [17]	32
Tabulka 6 Technické parametry manometru KELLER LEO 3 [18]	33
Tabulka 7 Naměřené hodnoty přímou metodou	35
Tabulka 8 Naměřené hodnoty hydrostatickou metodou	37
Tabulka 9 Naměřené hodnoty pomocí pyknometru	40
Tabulka 10 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu V_0 bez kuličky	43
Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu V_{0s} s kuličkou	43
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro výpočet objemu vzorku.....	47
Tabulka 13 Srovnání výsledků získaných jednotlivými metodami	51

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Laboratorní úloha.....62

Příloha 2: Vzorový protokol.....63

PŘÍLOHA 1: LABORATORNÍ ÚLOHA

- 1) Určete specifickou hmotnost ocelové kuličky za použití hydrostatické metody
- 2) Určete specifickou hmotnost ocelové kuličky za použití pyknometrické metody
- 3) Měření podle bodu 1 a 2 opakujte desetkrát pro ocelovou kuličku
- 4) Z výsledků měření podle bodu 1 a 2 vypočítejte aritmetické průměry jednotlivých hodnot pro každou metodu zvlášť a také nejistoty měření
- 5) Z výsledků podle bodu 4 vypočítejte specifickou hmotnost ocelové kuličky.
- 6) V závěru protokolu porovnejte pomocí tabulky naměřené a vypočtené hodnoty podle bodu 1 a 2 tohoto zadání.

PŘÍLOHA 2: VZOROVÝ PROTOKOL

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky			
Ústav elektroniky a měření			
Jméno a příjmení		Ročník/Skupina	
Předmět	Laboratorní úloha z předmětu Instrumentace a měření	Datum měření	
		Datum odevzdání	
Název úlohy	Měření specifické hmotnosti ocelové kuličky	Hodnocení	

Obsah

Úkol měření.....	2
Teoretická část.....	2
Praktická část.....	3
Použité přístroje a pomůcky.....	3
Naměřená data.....	4
Výpočty, výsledky a diskuze.....	5
Závěr.....	6
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
Seznam obrázků.....	8

Úkol měření

- Určete specifickou hmotnost ocelové kuličky za použití hydrostatické metody
- Určete specifickou hmotnost ocelové kuličky za použití pyknometrické metody
- Měření podle bodu 1 a 2 opakujte desetkrát pro ocelovou kuličku
- Z výsledků měření podle bodu 1 a 2 vypočítejte aritmetické průměry jednotlivých hodnot pro každou metodu zvlášť a také nejistoty měření
- Z výsledků podle bodu 4 vypočítejte specifickou hmotnost ocelové kuličky
- V závěru protokolu porovnejte naměřené a vypočtené hodnoty podle bodu 1 a 2 tohoto zadání.

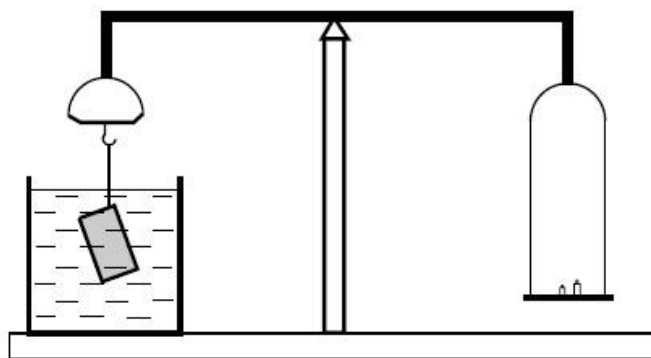
Teoretická část

Specifická hmotnost neboli hustota, je fyzikální veličina, která vyjadřuje poměr mezi hmotností měřené látky, ať už ve formě plynné, kapalně či pevné, a objemem této látky. Specifická hmotnost látek je závislá na změnách teploty a také na znečištění této látky různými příměsemi.

Hydrostatická metoda je vhodná pro měření specifické hmotnosti těles nepravidelných tvarů. Je založena na dvojím vážení tělesa, u něhož specifickou hmotnost hledáme. Měření provádíme pomocí speciálně upravených vah, tzv. hydrostatických vah. Při prvním vážení zjišťujeme hmotnost tělesa (m_1) ve vzduchu, při druhém vážení zjišťujeme hmotnost tělesa (m_2) ponořeného do kapaliny, u níž známe její specifickou hmotnost (ρ_k). Pro výpočet specifické hmotnosti tělesa musíme znát ještě specifickou hmotnost vzduchu (ρ_{vz}).

$$\rho = \frac{m_1(\rho_k - \rho_{vz})}{m_1 - m_2} + \rho_{vz} \quad (1)$$

Specifickou hmotnost měřeného tělesa získáme dosazením naměřených hodnot hmotností a všeobecně známých hodnot specifické hmotnosti kapalin a vzduchu do vzorce (1).



Obrázek 1 Hydrostatické váhy pro měření hustoty

Metoda měření pomocí pyknometru je ve většině případů používána pro stanovení specifické hmotnosti malých, drobných tělísek. Rozměry těchto tělísek jsou závislé na průměru hrdla pyknometru. Měřené vzorky nejdříve zvážíme pomocí laboratorních vah na vzduchu, tím zjistíme jejich hmotnost (m). Poté zvážíme čistý, suchý a prázdný pyknometr, i se zátkou (m_1). V dalším kroku naplníme pyknometr kapalinou, uzavřeme jej zátkou. Naplněný pyknometr opět zvážíme (m_2). Rozdíl hodnot hmotností m_2 a m_1 nám udává objem pyknometru V_p v cm^3 . Do pyknometru naplněného kapalinou nasypeme měřené vzorky, pyknometr uzavřeme zátkou a přebytečnou kapalinu vyteklou skrze kapilární otvor důkladně osušíme. Nakonec takto naplněný a uzavřený pyknometr zvážíme a získáme hmotnost (m_3). Z navážených hodnot hmotností vypočítáme objem vzorku ze vzorce (2) a následně po dosazení hodnoty objemu vzorku a jeho hmotnosti do vzorce (3) vypočítáme hledanou specifickou hmotnost.

$$V = (m_2 - m_1) - \{m_3 - (m_1 + m)\} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Praktická část

Použité přístroje a pomůcky

Laboratorní váhy KERN PLT 2000-3DM, sada pro stanovení hustoty KERN PLS-A01, mikrometr Mitutoyo QuantuMike 293-140, pyknometr

Naměřená data

Hydrostatická metoda

Měření kuličky

Měření hmotnosti kuličky		
	m_1 [g]	m_2 [g]
1.	6,860	5,984
2.	6,863	5,983
3.	6,864	5,981
4.	6,865	5,983
5.	6,864	5,980
6.	6,863	5,979
7.	6,863	5,979
8.	6,864	5,980
9.	6,862	5,975
10.	6,865	5,976
Průměr	6,863	5,980
Nejistota typu A	0,001	0,003
Hustota vody ρ_0 [kg/m³]		998
Spec. hmotnost kuličky [kg/m³]		7754,527

Pyknometrická metoda

Měření kuličky

Měření kuličky pomocí pyknometru				
	m [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]
1.	1,397	21,249	71,673	72,891
2.	1,397	21,248	71,670	72,886
3.	1,398	21,249	71,671	72,886
4.	1,398	21,249	71,668	72,887
5.	1,398	21,250	71,669	72,886
6.	1,399	21,249	71,671	72,885
7.	1,398	21,248	71,670	72,885
8.	1,397	21,250	71,669	72,886
9.	1,398	21,248	71,667	72,886
10.	1,397	21,249	71,666	72,883
Průměr	1,398	21,249	71,669	72,886
Nejistota typu A	0,001	0,001	0,002	0,002

Výpočty, výsledky a diskuze

Hydrostatická metoda

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0 = \frac{6,863}{6,863 - 5,980} * 998 = 7\,754,53 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot pro vážení a výpočet specifické hmotnosti:

$$m = 6,863 \pm 0,001 \text{ g}$$

$$\rho = 7\,754,527 \pm u_\rho$$

$$u_\rho = \sqrt{(\rho_0 u_m)^2} = \sqrt{(998 * 0,000001)^2} = 0,001 \text{ kg/m}^3$$

Pyknometrická metoda

$$\begin{aligned} V &= (m_2 - m_1) - \{m_3 - (m_1 + m)\} \\ &= (71,669 - 21,249) - \{72,886 - (21,249 + 1,398)\} = 0,181 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,398}{0,181} = 7,722 \text{ g/cm}^3 = 7\,722 \text{ kg/m}^3$$

Stanovení nejistot pro vážení, výpočet objemu a výpočet specifické hmotnosti:

$$m = 1,398 \pm 0,001 \text{ g}$$

$$V = 0,181 \pm u_V$$

$$u_V = \sqrt{u_m^2 + u_m^2 + (-u_m)^2} = \sqrt{0,001^2 + 0,001^2 + (-0,001)^2} = 0,002 \text{ cm}^3$$

$$\rho = 7\,722 \pm u_\rho$$

$$\begin{aligned} u_\rho &= \sqrt{\left(\frac{1}{V} u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2} u_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,181} * 0,001\right)^2 + \left(-\frac{1,398}{0,181^2} * 0,002\right)^2} \\ &= 0,085 \text{ g/cm}^3 = 85 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Tabulky výsledků

Hydrostatická metoda	
Specifická hmotnost kuličky [kg/m ³]	7754,527
Nejistota měření [kg/m ³]	0,001

Pyknometrická metoda	
Specifická hmotnost kuličky [kg/m ³]	7722,099
Nejistota měření [kg/m ³]	85,524

Závěr

Měření proběhlo podle zadání. Při plnění zadání jsme si vyzkoušeli dvě metody měření specifické hmotnosti, z naměřených dat jsme vypočítaly hodnoty specifické hmotnosti a nejistot měření a ty jsme vyhodnotily do tabulek. Došli jsme k závěru, že přesnější metodou v našem případě je metoda hydrostatická, výsledná hodnota specifické hmotnosti nám vyšla $(7\,754,527 \pm 0,001)$ kg/m³. Při měření pyknometrickou metodou byla hodnota specifické hmotnosti stanovena na $(7\,722 \pm 90)$ kg/m³.

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Význam
m	g	hmotnost
V	cm ³	čas
ρ	kg/m ³	specifická hmotnost
u_V	ml	nejistota měření objemu
u_ρ	kg/m ³	nejistota měření specifické hmotnosti
u_m	g	nejistota měření hmotnosti

Seznam obrázků

Obrázek 1 Hydrostatické váhy pro měření specifické hmotnosti.....	3
---	---