



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## STUDIUM REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

STUDY OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ALTERNATIVE ELECTRO INSULATING FLUIDS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Simona Botlová**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Martin Frk, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Bc. Simona Botlová

**ID:** 137246

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Studium reologických vlastností alternativních elektroizolačních kapalin

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte literární rešerši pojednávající o současném stavu výzkumu v oblasti využití a diagnostiky vlastností alternativních elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů v elektrotechnice. Prostudujte podstatu reologických vlastností kapalin a z fyzikálních jevů odehrávajících se v dielektrických kapalinách se zaměřte na elektrickou vodivost. Seznamte se s fyzikální podstatou metod pro měření dynamické viskozity.

Na vybraných vzorcích elektroizolačních kapalin, rostlinných olejů a zejména jejich jednotlivých složek v podobě vyšších mastných kyselin a esterů, proměřte teplotní závislosti dynamické viskozity a hustoty.

Výsledné průběhy matematicky aproximujte a výsledky doplňte o fyzikální interpretaci. V průběhu experimentu analyzujte a kvantifikujte vliv činitelů podílejících se na výsledné přesnosti realizovaných měření. Získané hodnoty vybraných materiálových veličin u alternativních kapalin a jejich složek porovnejte s hodnotami obvyklými pro minerální oleje.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 26.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Frk, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

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

# Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá klasifikáciou elektroizolačných kvapalín a analýzou ich reologických vlastností. Teoretická časť tejto práce popisuje viskozitu a možnosti jej merania, elektrické a neelektrické vlastnosti elektroizolačných kvapalín a samotné elektroizolačné kvapaliny. V praktickej časti prebehlo meranie hustoty a viskozity vybraných rastlinných olejov, ich zložiek a transformátorových olejov v širokom teplotnom rozsahu. V závere je prevedená analýza výsledkov merania.

## Kľúčové slová

Viskozita, viskozimetria, hustota, elektroizolačné kvapaliny, rastlinné oleje, masné kyseliny, minerálne oleje

## Abstract

This master thesis deals with clasification of electrical insulating liquids and analysis their reological properties. Theoretical part describes viscosity and possibilities of its measurement, electrical and non-electricl properties of electrical insulating liquids and themselves electrical insulating liquids. Practical part describes measurement of viscosity and density of chosen vegetable oils, their components and transformer oils in wide temperature range. At the conclusion of the thesis, analysis of measurement results is done.

## Key words

Viscosity, viscosimetry, density, electrical insulating liquids, vegetable oils, fatty acids, mineral oils

## Citácia

BOTLOVÁ, S.: *Studium reologických vlastností alternatívnych elektroizolačných kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2016. 67 s.  
Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D..

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že diplomová práca na tému *Studium reologických vlastností alternatívnych elektroizolačných kapalin* som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry na konci práce.

Ako autor uvedeného semestrálneho projektu prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušila autorské práva tretích osôb, nezasiahla som nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/lebo majetkových a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorských a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa.....

.....

podpis

## POĎAKOVANIE

Touto cestou by som rada poďakovala vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnú metodickú pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní diplomovej práce.

# Obsah

Zoznam obrázkov.....	7
<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI A VISKOZIMETRIA</b> .....	10
1.1 Viskozita kvapalín.....	10
1.2 Metódy merania viskozity .....	14
1.2.1 Kapilárny viskozimeter.....	14
1.2.2 Výtokový viskozimeter.....	15
1.2.3 Vysokoteplotný viskozimeter s vysokou šmykovou rýchlosťou .....	15
1.2.4 Rotačný viskozimeter.....	16
1.2.5 Gulôčkový viskozimeter.....	17
1.2.6 Vibračný viskozimeter .....	18
1.2.7 Ultrazvukový viskozimeter.....	21
<b>2. ELEKTROIZOLAČNÉ KVAPALINY A ICH VLASTNOSTI</b> .....	22
2.1 Vlastnosti elektroizolačných materiálov .....	22
2.1.1 Elektrická vodivosť.....	22
2.1.2 Polarizácia dielektrík .....	25
2.1.3 Permitivita.....	25
2.1.4 Dielektrické straty .....	26
2.1.5 Elektrická pevnosť .....	26
2.1.6 Neelektrické vlastnosti.....	27
2.2 Elektroizolačné kvapaliny .....	28
2.2.1 Minerálne oleje .....	28
2.2.2 Rastlinné oleje a ich zložky .....	29
2.2.3 Syntetické kvapalné izolanty .....	33

<b>3. PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....	35
3.1 Meranie hustoty.....	37
3.2 Meranie viskozity.....	43
<b>4. ZÁVER</b> .....	52
Zoznam použitej literatúry .....	54
Prílohy.....	58
Príloha B .....	59

# Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Tok kvpaliny medzi dvoma paralelnými doskami [19] .....	11
Obrázok 2: Ostwaldov viskozimeter [1] .....	15
Obrázok 3: Základné usporiadanie koaxiálneho valcového viskozimetra [1] .....	16
Obrázok 4: Usporiadanie guľičkového viskozimetru[1] .....	17
Obrázok 5: Usporiadanie oscilačného telieska pre vytvorenie riadenej amplitúdy v kvapaline [1] .....	19
Obrázok 6: Konštrukčné usporiadanie vibračného viskozimetru s oscilačným telieskom [25] ...	20
Obrázok 7: Usporidanie ultrazvukového viskozimetru [1].....	21
Obrázok 8: Merané rastlinné oleje, ich zložky a minerálny olej TRAF0 CZ-A.....	36
Obrázok 9: Analytické váhy OHAUS a termostat MEDINGEN.....	38
Obrázok 10: Závislosť hustoty meraných kvaplín na teplote .....	42
Obrázok 11: Viskozimeter SV-10.....	43
Obrázok 12: Závislosť dynamickej viskozity meraných kvapalín na teplote.....	46
Obrázok 13: Závislosť dynamickej viskozity rastlinných olejov na teplote.....	47
Obrázok 14: Závislosť dynamickej viskozity masných kyselín na teplote .....	48
Obrázok 15: Závislosť dynamickej viskozity oleja TRAF0 CZ-A a oleja MEŘO na teplote .....	49
Obrázok 16: Závislosť logaritmu dynamickej viskozity na reciprokej teplote.....	51
Obrázok 17: Závislosť hustoty na teplote pre slnečnicový olej.....	59
Obrázok 18: Závislosť viskozity na teplote pre slnečnicový olej.....	59
Obrázok 19: Závislosť hustoty na teplote pre olivový olej.....	60
Obrázok 20: Závislosť viskozity na teplote pre olivový olej.....	60
Obrázok 21: Závislosť hustoty na teplote pre ryžový olej.....	61
Obrázok 22: Závislosť viskozity na teplote pre ryžový olej.....	61
Obrázok 23: Závislosť hustoty na teplote pre kukuričný olej.....	62

Obrázok 24: Závislosť viskozity na teplote pre kukuričný olej.....	62
Obrázok 25: Závislosť hustoty na teplote pre kyselinu olejovú .....	63
Obrázok 26: Závislosť viskozity na teplote pre kyselinu olejovú .....	63
Obrázok 27: Závislosť hustoty na teplote pre kyselinu linolovú .....	64
Obrázok 28: Závislosť viskozity na teplote pre kyselinu linolovú .....	64
Obrázok 29: Závislosť hustoty na teplote pre ethyl oleát .....	65
Obrázok 30: Závislosť viskozity na teplote pre ethyl oleát .....	65
Obrázok 31: Závislosť hustoty na teplote pre TRAFO CZ-A .....	66
Obrázok 32: Závislosť viskozity na teplote pre TRAFO CZ-A .....	66
Obrázok 33: Závislosť hustoty na teplote pre MEŘO .....	67
Obrázok 34: Závislosť viskozity na teplote pre MEŘO .....	67



# ÚVOD

V súčasnosti stále narastá potreba využívania ekologických prostriedkov v rôznych technických a technologických oblastiach. Neustále sa hľadajú spôsoby náhrady najrozšírenejších elektroizolačných kvapalín v podobe minerálnych olejov za kvapaliny ekologicky šetrnejšie, avšak so zodpovedajúcimi elektrickými a chemickými vlastnosťami. Vhodnú alternatívu minerálnych olejov, ktoré sú vyrábané z ropy a okrem iného aj toxické, predstavujú rastlinné oleje. Rastlinné oleje sú vyrábané lisovaním semien rôznych rastlín a sú tvorené mstnými kyselinami. Tie udávajú aj ich vlastnosti. Vlastnosti alternatívnych elektroizolačných kvapalín by mali byť čo najpodobnejšie bežným elektroizolačným kvapalinám, preto je v rámci výskumu potrebné skúmať ich vlastnosti. Jednou z významných vlastností je viskozita, ktorá je závislá jednak na druhu kvapaliny a taktiež i na teplote.

Táto práca sa venuje práve analýze reologických vlastností alternatívnych elektroizolačných kvapalín, konkrétne sledovaniu zmien viskozity so zmenou teploty u rastlinných olejov a ich zložiek. Prvá časť práce sa zaoberá popisom viskozity a možnosťami jej merania. V druhej časti práce sú popísané elektroizolačné kvapaliny v podobe minerálnych olejov, rastlinných olejov a syntetických kvapalín. Ďalšia časť sa venuje popisu praktickej časti diplomovej práce a vyhodnoteniu nameraných výsledkov viskozity a hustoty.

# 1. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI A VISKOZIMETRIA

Na základe mechanických vlastností sa materiály rozdeľujú do troch hlavných skupenstiev – plynné, kvapalné a pevné. Pre každé skupenstvo je charakteristický určitý matematický model pre popis ich mechanických vlastností, čím sa zaoberá veda nazývaná reológia.

Reológia sa zaoberá štúdiom deformácie hmoty. Jedná sa o náuku o pohybe vazkých kvapalín a pretvárania hmoty, ktoré nie sú dokonale pružné a vyskytujú sa u nich kombinácie vlastností ako tvárnosti či vláčnosti. Jej hlavnou úlohou je nájsť vzťahy medzi napätím, deformáciou a jej rýchlosťou, čoho výsledkom je vytvorenie reologických modelov, ktoré sa snažia vystihnúť chovanie rôznych typov látok [1] [2].

Vazká kvapalina je charakteristická tým, že sa od pružného materiálu odlišuje niekoľkými vlastnosťami a to [2]:

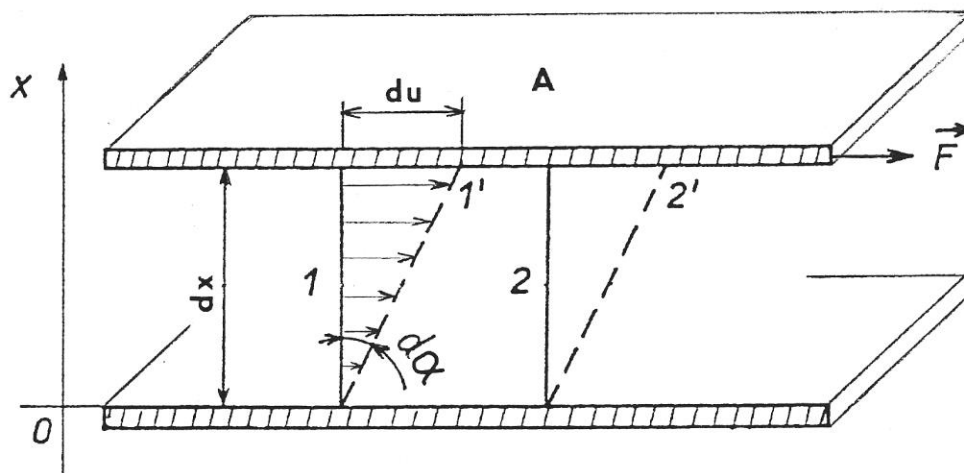
- Pri šmykovom namáhaní nedochádza ku koncovej deformácii ale k toku kvapaliny.
- Po uvoľnení pôsobiacej sily sa kvapalina nevracia do pôvodného stavu, na základe čoho sa jedná o izotropnú a nestlačiteľnú látku.

Pre charakteristiku vlastností materiálov je potrebná znalosť základných reologických veličín, ako je viskozita, medze toku či modul pružnosti. Matematickým vyjadrením tokových vlastností kvapalín sú stavové rovnice, ktoré vyjadrujú vzťah medzi deformačným šmykovým napätím a deformáciou kvapaliny [2].

## 1.1 Viskozita kvapalín

Viskozita je fyzikálna veličina, ktorá udáva pomer medzi šmykovým napätím a zmenou rýchlosti v závislosti na vzdialenosti medzi susednými vrstvami pri prúdení skutočných kvapalín. Charakterizuje vnútorné trenie častíc a jednotlivých vrstiev kvapaliny pri jej pohybe. Ideálna kvapalina má nulovú viskozitu. Kvapaliny s nenulovou viskozitou vykazujú vnútorné trenie, teda vlastnosti reálnych kvapalín. Vnútorné trenie závisí na teplote, tlaku a na chemickom zložení kvapaliny [1].

V reálnych kvapalinách dochádza k snahe rýchlejšej vrstvy strhnúť pomalšiu susednú vrstvu, resp. pomalšia vrstva brzdí pohyb rýchlejšej vrstvy. Silovým pôsobením jednotlivých vrstiev kvapaliny sa zaoberal I. Newton, ktorého poznatky sú zobrazené na obrázku 1 [19].



Obrázok 1: Tok kvapaliny medzi dvoma paralelnými doskami [19]

Podieľ šmykovej sily a veľkosti styčnej plochy, teda šmykové napätie, je nenulové. Šmykové napätie je kompenzované premennou rýchlosťou kvapaliny a zmenou rýchlosti od vstvy k vrstve vzrastá. Pri postupe vrstvy kolmo k smeru prúdenia je možné pozorovať zmenu rýchlosti, ktorá je charakterizovaná podielom „ $du/dx$ “ nazývaným šmyková rýchlosť v smere prúdenia. V tomto smere dochádza k súbežnému prebiehaniu prúdových vlákien a nedochádza k premiešaniu kvapaliny.

Viskózne kvapaliny sú charakterizované viskozitou, teda mierou vnútorného odporu pri ich toku. Ak uvažujeme ideálne viskózne materiál, klasický Newtonov zákon je pre šmykové napätie vyjadrený vzťahom [1] [2]:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D, \quad (1)$$

pričom  $\tau$  je šmykové napätie,  $\eta$  predstavuje dynamickú viskozitu charakterizujúcu vnútorné trenie kvapaliny a pomer  $du/dx$  predstavuje rýchlostný gradient  $D$ , ktorý charakterizuje tvarové zmeny v prúdajúcej tekutine.

Fyzikálny rozmer dynamickej viskozity je daný rovnicou 1 a je vyjadrený nasledovne [2]:

$$[\eta] = Pa \cdot S = N \cdot s \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = 10 \cdot g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} = 10P \text{ (Poise)} \quad (2)$$

Dynamická viskozita sa líši u rôznych druhov kvapalín a predstavuje koeficient vnútorného trenia. Je určená vzťahom [1]:

$$\eta = C \cdot e^{\frac{E_A}{k \cdot T}}, \quad (3)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita,  $E_A$  je aktivačná energia viskózneho toku, ktorú je nutné dodať molekule kvapaliny, aby sa mohla presunúť z jednej rovnovážnej polohy do inej,  $k$  je Boltzmanova konštanta,  $T$  je termodynamická teplota a  $C$  je konštanta. Zlinearizovaním rovnice 3 dostaneme tvar [1]:

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T}, \quad (4)$$

pričom  $T$  je termodynamická teplota a  $A$  a  $B$  sú materiálové konštanty.

Dynamická viskozita je silno závislá na teplote a vyjadruje silu potrebnú k tomu, aby s vrstva pohybovala o jednotkovej ploche vo vnútri kvapaliny voči rovnobežnej vrstve vzdialenej 1 m.

V prípade, že ná látku pôsobia iba zotrvačné, trecie a gravitačné sily, je vhodné látku charakterizovať kinematickou viskozitou, ktorú predstavuje vzťah [2]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (5)$$

kde  $\eta$  predstavuje opäť dynamickú viskozitu a  $\rho$  predstavuje hustotu kvapaliny a jej jednotkou je  $m^2/s$ .

Hustota je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje pomer hmotnosti elementárnej častice tekutiny  $dm$  k jej elementárnemu objemu  $dV$ :

$$\rho = \frac{dm}{dV}. \quad (6)$$

Hustota je daná zložením látky a nezáleží na mieste merania, ale na fyzikálnych podmienkach. Závisí na tlaku a teplote. Kvapaliny oplývajú schopnosťou znižovať svoj objem pri zvyšovaní tlaku a je možné definovať ich objemovú stlačiteľnosť. Prevrátenou hodnotou hustoty dostávame merný objem  $v'$ , ktorého jednotkou je  $\text{m}^3/\text{kg}$  [2]:

$$v' = \frac{1}{\rho} = \frac{dV}{dm}. \quad (7)$$

Kinematickú viskozitu je vhodné používať aj u dejov, ktoré sú závislé na viskozite a hustote. Tekutiny, ktoré sa riadia Newtonovým zákonom, sú označované ako *newtonovské* a predstaviteľmi sú zvyčajne nízkomolekulárne látky alebo zriedené roztoky. Jedná sa o lineárnu závislosť napätia alebo viskozity na šmykovej rýchlosti. Ako už bolo spomenuté, viskozita je významne závislá na teplote a s rastúcou teplotou klesá [2].

Mimo newtonovských kvapalín existujú aj reologicky zložitejšie látky, ktoré sa Newtonovým zákonom neriadia. Vykazujú nelineárnu závislosť šmykového napätia  $\tau$  a šmykovej rýchlosti  $D$  a sú označované ako *neneutronovské* kvapaliny. Platí pre ne obdobná rovnica ako vzťah č. 1,  $\eta$  však predstavuje tzv. zdanlivú viskozitu. Zdanlivá viskozita nie je látkovou konštantou, ale je závislá na rýchlosti deformácie alebo na šmykovom napätí.

Neneutronovské správanie môžeme odvodiť z reologického modelu, ktorý je funkčnou závislosťou medzi šmykovou rýchlosťou a šmykovým napätím. Najjednoduchším reologickým modelom pre viskózne látky je tzv. mocninový model, ktorý obsahuje iba dva parametre, ktoré je možné určiť experimentálnym spôsobom. Predstaviteľmi neneutronovských kvapalín sú [2]:

- *Pseudoplastické kvapaliny*: takáto kvapalina je charakteristická tým, že s rastúcou šmykovou rýchlosťou sa jej zdanlivá viskozita znižuje. Jedná sa o látky polymérnej povahy, detergenty a suspenzie.
- *Dilatantné kvapaliny*: vykazujú zriedkavé správanie, kedy zdanlivá viskozita s rastúcou šmykovou rýchlosťou vzrastá. Toto správanie sa vyskytuje u vysokokonzentrovaných suspenzií, pričom dochádza ku komplikácii technologických procesov.
- *Binghamské kvapaliny*: dochádza u nich k toku až po prekročení prahového šmykového napätia. Predstaviteľmi sú napríklad kašovitá suspenzia, krieda alebo vápno.
- *Tixotropné látky*: zdanlivá viskozita u nich klesá s dobou pôsobenia napätia.
- *Reopexné látky*: počas šmykového namáhania dochádza k rastu zdanlivej viskozity, pričom charakteristickým zástupcom sú betónové zmesi.

Pre meranie vlastností neneutronových kvapalín je potrebné používať prístroje, ktoré umožnia realizovať kinematické podmienky šmykového toku, stanoviť šmykovú rýchlosť a napätie z primárnych dát experimentu.

## 1.2 Metódy merania viskozity

Pri výskume ako aj v praxi je meranie viskozity veľmi dôležité. Presná znalosť hodnoty viskozity je nevyhnutná a preto boli vyvinuté rôzne druhy meracích zariadení, teda viskozimetrov.

Viskozimetry rozlišujeme [1] [2] [4] [18] [19]:

- Kapilárne viskozimetre
- Výtokové viskozimetre
- Vysokoteplotné viskozimetre s vysokou šmykovou rýchlosťou
- Rotačné viskozimetre
- Gulôčkový viskozimeter
- Vibračný viskozimeter
- Ultrazvukový viskozimeter

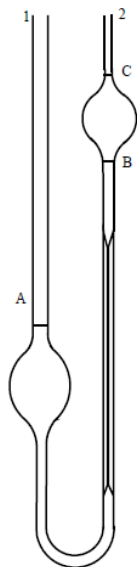
### 1.2.1 Kapilárny viskozimeter

Jedná sa o viskozimetre, ktoré sa najviac využívajú pre meranie viskozity newtonovských kvapalín. Ich použitie je jednoduché, vyžadujú malé množstvo vzorky kvapaliny a regulácia teploty je jednoduchá. Objemový prietok tekutiny kapilárou je meraný tak, že sa zaznamená čas za ktorý sa dostane kvapalina určitého objemu z jedného vyznačeného bodu do bodu druhého. Kvapalina môže prechádzať kapilárou aj za pôsobenia gravitačnej alebo inej externej sily.

Kapilárne viskozimetre umožňujú priamy výpočet viskozity z prietoku, tlaku a rôznych rozmerov nástrojov, avšak tieto nástroje musí byť kalibrované pre jeden alebo viac druhov kvapalín, aby bolo možné získať konštanty pre určitý viskozimeter.

Kapilárny viskozimeter je tvorený rezervoárom kvapaliny, kapilárou známeho rozmeru, zabezpečením merania a riadenia aplikovaného tlaku, prostriedkami pre meranie prietoku a termostatom pre udržiavanie požadovanej teploty.

Konkrétnymi zástupcami kapilárnych viskozimetrov sú napríklad modifikovaný Ostwaldov viskozimeter alebo viskozimeter so spätným tokom.



Obrázok 2: Ostwaldov viskozimeter [1]

Na obrázku 2 je zobrazený *Ostwaldov viskozimeter*, ktorý predstavuje najčastejšie používaný typ gravitačného viskozimetru s trubicou tvaru U [1][2].

### 1.2.2 Výtokový viskozimeter

Tento druh viskozimetrov je využívaný najmä u olejov na základe ich jednoduchej obsluhy. Tieto viskozimetre pozostávajú zo zásobníka, otvoru a plniaceho ramena. Dĺžka otvoru nepresahuje desaťnásobok jeho priemeru.

Meria sa čas, za ktorý prejde presné množstvo vzorky otvorom a čas toku sa berie ako miera viskozity. Na určenie resp. porovnanie výsledku sa používajú tabuľky alebo konverzné vzorce, výsledok však nie je presný. Tento typ meracích zariadení neumožňuje presné určenie viskozity a rovnako nemôžu byť použité pre stanovenie viskozity newtonovských kvapalín.

Používané sú napríklad Redwoodov viskozimeter, Englerov alebo Sayboltov viskozimeter[1] [2].

### 1.2.3 Vysokoteplotný viskozimeter s vysokou šmykovou rýchlosťou

Používajú sa pre meranie viskozity vyššej ako 1000 poise a predstaviteľom je valcovopiestový viskozimeter. Tento merací nástroj má valec ako zásobník kvapaliny a tekutina je premiestňovaná pomocou mechanicky riadeného piestu. Mechanizmus, ktorý aktivuje piest, môže

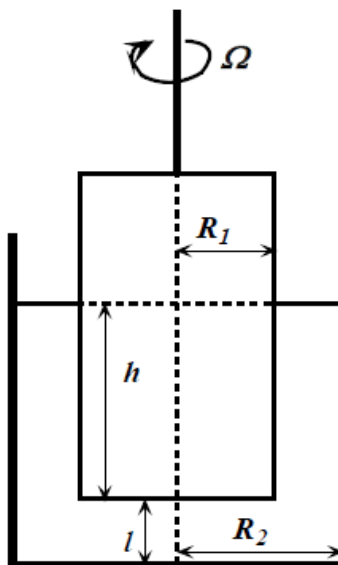
byť vlastnej váhy, pneumatické zariadenie a hydraulický tlak alebo mechanické zariadenie. Toto zariadenie je vhodné aj pre neneutronovské kvapaliny.

Bol zostrojený viacčlánkový kapilárny viskozimeter pre vysokú teplotu a vysokú šmykovú rýchlosť, ktorý je schopný merať viskozitu motorového oleja pri 150°C. Pri tejto metóde urýchľuje tlak plynu stály objem cez sklenenú kapiláru malého priemeru. Šmyková rýchlosť sa môže meniť až na 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>. Táto viskozita sa nazýva *vysokoteplotná viskozita s vysokou šmykovou rýchlosťou* a meria sa pri 150°C a 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>[1].

#### 1.2.4 Rotačný viskozimeter

Rotačné viskozimetre pracujú na princípe merania rýchlosti otáčania pevného telieska určitého tvaru vo viskóznom médiu počas pôsobenia známej sily alebo točivého momentu na rotáciu pevného telieska za presnej uhlovej rýchlosti. Rotačné viskozimetre sú prepracovanejšie ako kapilárne viskozimetre a často sú menej presné pre newtonovské kvapaliny, majú niekoľko výhod pre skúmanie vlastností neneutronovských kvapalín. Výhodami sú napríklad možnosť merania pred ustálením stavu, možnosť viacnásobného merania s tou istou vzorkou pri rôznych šmykových rýchlostiach, kontinuálne meranie u materiálov, ktorých vlastnosti môžu byť funkciou teploty a u vzoriek s takmer konstantnou šmykovou rýchlosťou.

Rotačné viskozimetry sa všeobecne rozdeľujú na viskozimetry typu *valec-valec*, *doska-doska* a *kužel-doska* [1].



Obrázok 3: Základné usporiadanie koaxiálneho valcového viskozimetra [1]



### 1.2.5 Gul'ôčkový viskozimeter

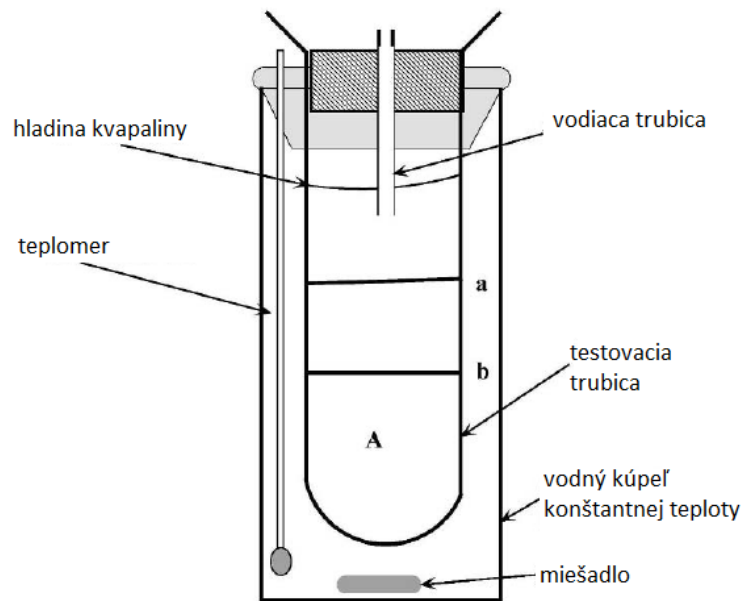
Bežným zastupiteľom gul'ôčkových viskozimetrov je *Höpplerov viskozimeter*. Viskozita sa zisťuje Stokesovou metódou, kedy sa určuje z rýchlosti pádu gul'ôčky v mernej trubici.

Stokesov zákon je vyjadrený ako:

$$6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\sigma - \rho) \cdot g, \quad (8)$$

kde  $\eta$  je viskozita kvapaliny,  $\rho$  je hustota kvapaliny,  $\sigma$  predstavuje hustotu guľičky,  $r$  polomer guľičky a  $g$  je gravitačné zrýchlenie. Po úprave vzťahu č. 8 je možné vypočítať dynamickú viskozitu kvapaliny.

Trubica je naplnená skúmanou tekutinou a je udržiavaná termostatom v požadovanej teplote. Gul'ôčku volíme na základe toho, aby bol jej pohyb v kvapaline rovnomerný, kedy na ňu pôsobia tiažová, vztlaková a odporová sila [1] [2].



Obrázok 4: Usporiadanie guľičkového viskozimetru[1]

### **1.2.6 Vibračný viskozimeter**

Tento typ viskozimetru je vhodný pre meranie viskozity v reálnom čase a princíp merania spočíva v tlmenom kmitaní telesa umiestneného v kvapaline. Vyznačuje sa mnohými kladnými vlastnosťami ako napríklad tým, že pre meranie viskozity postačí malé množstvo vzorky kvapaliny, viskozimeter je vysoko citlivý, má jednoduché ovládanie, kontinuálne meranie, široký rozsah, možnosť toku cez meranú kvapalinu a následne jednoduché vyčistenie.

Vibračné viskozimetre merajú tlmenie oscilujúceho elektromechanického rezonátoru ponoreného v testovanej kvapaline. Rezonátor môže byť konzolový nosník, oscilačný kruh alebo ladička, ktorá osciluje krúživo alebo priečne v meranej kvapaline. Tlmenie rezonátora môže byť merané niekoľkými metódami:

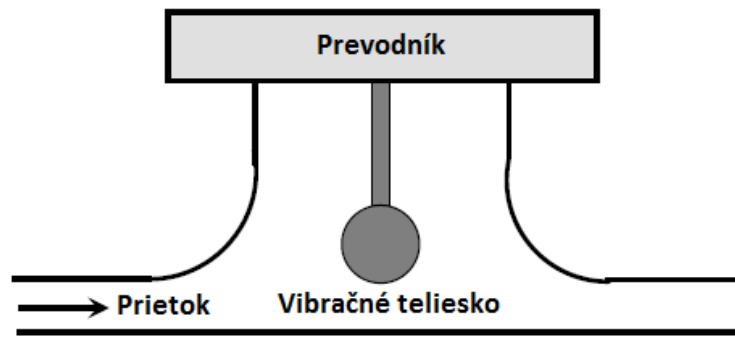
- Pre udržanie konštantného vibrovania oscilátora je potrebné napájanie. Čím je viskozita vyššia, tým viac energie je potrebnej pre udržanie amplitúdy oscilácie. Vibračná sonda urýchľuje kvapalinu a príkon je úmerný výsledku viskozity a hustoty.
- Vibrácia rezonátoru je zastavená a je meraný čas slabnutia oscilácie k jej zastaveniu. Čím je viskozita vyššia, tým rýchlejšie upadá signál.
- Je meraná frekvencia rezonátoru ako funkcia fázového uhlu medzi budením a vlnovou odozvou. Čím vyššia viskozita, tým väčšia je zmena frekvencie pre danú fázovú zmenu [1] [2].

#### **1.2.6.1 Metóda ladičky**

Touto metódou je možné merať viskozitu kvapaliny a zároveň aj jej hustotu presne a nezávisle. Je vytvorená pre hydrokarbóny a vyznačuje sa kontinuálnym meraním v reálnom čase určením šírky pásma a frekvencie rezonancie vibrujúcej vidlice. Šírka pásma určuje viskozitu kvapaliny a frekvencia udáva hustotu kvapaliny. Pre meranie teploty je možné pridať teplotný senzor. Iné parametre, ako napríklad gravitačný gradient viskozity alebo zapal'ovacie indexy pohonných hmôt, môžu byť vypočítané [1].

#### **1.2.6.2 Metóda oscilačného telieska**

Princíp tejto metódy merania je založený na tlmenom kmitaní telieska umiestneného v kvapaline. Toto teliesko môže byť rôzneho tvaru, najčastejšie tvaru kruhového. Usporiadanie tohto typu viskozimetru je zobrazené na obrázkoch 5 a 6 [1] [2] [25] .

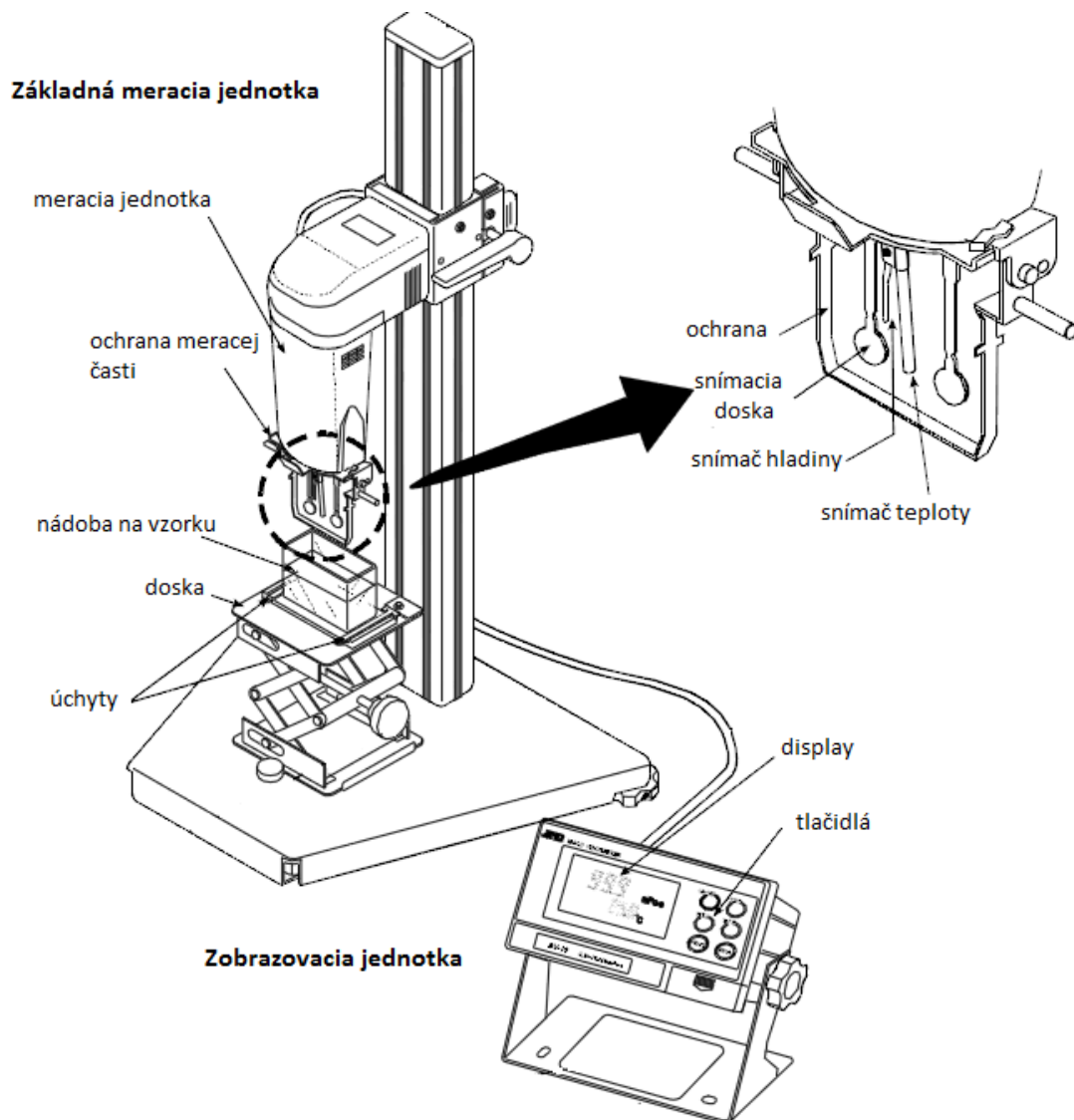


Obrázok 5: Usporiadanie oscilačného telieska pre vytvorenie riadenej amplitúdy v kvapaline [1]

Snímacie doštičky sú ponorené do vzorky kvapaliny, ktorá sa nachádza v nádobe upevnenej o dosku a doštičky kmitajú v smere oproti sebe. Sú spojené tzv. pružinovou doštičkou, ktorá vibruje rovnakou frekvenciou. Kmity sú budené elektromagnetom, ktotý je súčasťou pohonu. Medzi snímacou doštičkou a vzorkou kvapaliny vzniká trecia sila a v závislosti na nej sa mení amplitúda kmitania. Za účelom vytvorenia jednotkovej amplitúdy, viskozimeter je ovládaný riadiacim elektrickým prúdom vibrujúcej pružinovej doštičky. Riadiaca sila zodpovedajúca viskozite je priamoúmerná súčinu viskozity a hustoty meranej vzorky kvapaliny. Ak vibruje pružinová doštička s konštantnou frekvenciou, je vytvorená jednotková amplitúda pre vzorky s rozdielnou viskozitou, riadiaci elektrický prúd je tiež priamo úmerný súčinu viskozity a hustoty každej vzorky. Pri meraní týmto druhom viskozimetru je viskozita detekovná ako súčin viskozity a hustoty a vystupuje ako *zdanlivá viskozita*, preto je tiež potrebné i nezávislé meranie hustoty kvapaliny. Potom je dynamická viskozita vypočítaná na základe vzťahu [25]:

$$\eta = \frac{\eta_{zdn}}{\rho}, \quad (9)$$

kde  $\eta_{zdn}$  je zdanlivá viskozita,  $\eta$  je dynamická viskozita a  $\rho$  predstavuje hustotu kvapaliny. Na tomto princípe je založený vibračný viskozimeter *A&D SV-10 Series*, ktorý bude použitý pre meranie viskozity alternatívnych elektroizolačných kvapalín v praktickej časti tejto diplomovej práce. Toto zariadenie je zobrazené na obrázku 6 a zodpovedá všeobecnému usporiadaniu tohto typu vibračného viskozimetru.



Obrázok 6: Konštrukčné usporiadanie vibračného viskozimetru s oscilačným telieskom [25]

### 1.2.6.3 Metóda vibračnej tyče

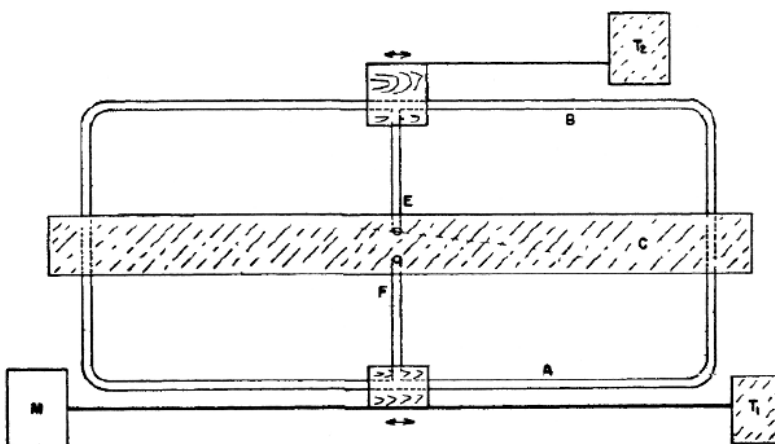
Tieto typy viskozimetrov určujú viskozitu meraním útlmu rezonátora, ktorý je vzбудený do jeho priradenej frekvencie v torznej vibrácii. Pre vibráciu tyče je potrebný konštantný zdroj energie a pre určenie viskozity sú merané zmeny amplitúdy. Tento typ viskozimetru tiež nie je schopný merať kinematickú viskozitu priamo.

Táto metóda merania môže k meraniu používať oscilujúcu kapiláru, ktorej tvar sa môže meniť. V kvapaline môže byť ponorený senzorový prvok z nerezovej ocele pohybujúci sa mikroskopicky s vysokou frekvenciou. Pri prenikaní senzoru kvapalinou dochádza k strate

energie v kvapaline, ako následku jej viskozity. Rozptýlená energia je presne zmeraná mikroprocesorom riadenou elektronikou a prepočítaná na viskozitu [1].

### 1.2.7 Ultrazvukový viskozimeter

Ultrazvukový viskozimeter poskytuje okamžité a nepretržité meranie viskozity pomocou ultravysokofrekvenčných zvukových vln. Jeho základné usporiadanie je zobrazené na obrázku 7. Nástroj pozostáva z malého snímacieho elementu alebo senzoru ktorý je ponorený v testovanej kvapaline. Toto zariadenie dokáže pracovať v rozmedzí teplôt od  $-93^{\circ}\text{C}$  do  $315^{\circ}\text{C}$ , taktiež i vo vákuu [1].



Obrázok 7: Usporiadanie ultrazvukového viskozimetru [1]

# 2. ELEKTROIZOLAČNÉ KVAPALINY A ICH VLASTNOSTI

Elektroizolačné materiály, resp. izolanty, sú látky, ktoré neobsahujú voľné pohyblivé elektróny ani iné voľné nosiče náboja, čo spôsobuje, že nevedú elektrický prúd. Sú zložené z atómov, molekúl alebo iónov, ktoré obsahujú elementárne častice, ktoré sú viazané na určité miesta mriežky, z ktorých sa za normálnych podmienok pôsobením elektrického poľa môžu vzdialiť.

Tieto látky sa používajú predovšetkým k izolácii elektrických vodičov, k oddeleniu vodivých častí alebo pre zvýšenie kapacity kondenzátorov. V praxi sa nestretávme s absolútne nevodivými izolantmi, nakoľko sa v látkach vždy nachádza malé množstvo neviazaných elektrónov alebo iónov [3] [19].

## 2.1 Vlastnosti elektroizolačných materiálov

### 2.1.1 Elektrická vodivosť

Elektrická vodivosť charakterizuje usporiadaný pohyb elektrických nábojov pri pôsobení vonkajšieho elektrického poľa [3] [19].

#### 2.1.1.1 Elektrická vodivosť plynov

Pokiaľ intenzita elektrického poľa neprekročí prahovú hodnotu, môžeme o plynoch hovoriť ako o dobrých izolantoch. Po prekročení prahovej hodnoty dochádza k nárazovej ionizácii plynu.

K prenášaníu elektrického prúdu v plynach dochádza pohybom kladných a záporných iónov a elektrónov v elektrickom poli. K ionizácii dochádza pôsobením krátkovlnného elektromagnetického žiarenia alebo nárazmi elektrónov a iónov na neutrálne molekuly.

V plynach rozlišujeme dva typy vodivosti [3]:

- *Nesamostatná vodivosť*: nachádza sa v slabom elektrickom poli, kde dochádza k ionizácii vplyvom vonkajších faktorov, ako napríklad röntgenovým, ultrafialovým či rádioaktívnym žiarením, alebo vplyvom vysokých teplôt.

- *Samostatná vodivosť*: dochádza k nej v elektrickom poli, ktorého intenzita prekročí prahovú hodnotu, kedy dochádza k nárazovej ionizácii. Neutrálne molekuly sa rozpadajú na ióny a elektróny nárazom elektricky nabitých častíc pohybujúcich sa v elektrickom poli.

Ak plyn nie je v elektrickom poli, dochádza k zániku ionizovaných častíc rekombináciou, teda dochádza k zániku elektricky nabitých častíc pri vzájomných zrážkach kladne a záporne nabitých častíc. Ak sa plyn nachádza v elektrickom poli, k zániku častíc dochádza buď rekombináciou alebo na elektródach.

### 2.1.1.2 Elektrická vodivosť kvapalín

V rámci kvapalných materiálov môžeme za izolanty považovať iba látky s kovalentnými väzbami. Látky s iónovými väzbami sú vodičmi druhej triedy (roztavené soli) a látky s kovovou väzbou predstavujú vodiče prvej triedy (kvapalné a roztavené kovy).

Látky s kovalentnými väzbami rozdelíme na [3]:

- *Nepolárne*: jedná sa o látky neutrálne, ktoré nemajú dipólový moment. Elektrická vodivosť závisí na prítomnosti disociovaných prísad a na obsahu vody.
- *Polárne*: ide o látky s dipolovým momentom a elektrickú vodivosť spôsobujú nečistoty, resp. prísady a nepatrná disociácia molekúl kvapaliny.

U kvaplinových izolantov sa vyskytuje vodivosť spôsobená pohybom elektricky nabitých koloidných častíc.

Elektrická vodivosť je závislá na teplote, pričom s rastúcou teplotou rastie pohyblivosť iónov následkom zníženia viskozity a môže dochádzať aj k zvýšeniu koncentrácie nosičov náboja ako následku zvýšenia stupňa disociácie. Elektrická vodivosť, konduktivita, rastie exponenciálne a jedná vzťahom [3]:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (10)$$

kde  $A$  a  $b$  sú konštanty,  $\gamma$  je elektrická vodivosť a  $T$  je absolútna teplota.

Vzájomný vzťah medzi konduktivitou, viskozitou kvapaliny a teplotou vyjadruje *Waldenov zákon* [3]:

$$\gamma \cdot \eta = \frac{n \cdot q^2}{l_2} \cdot \frac{l_1^2 \cdot f_{01}}{l_2^2 \cdot f_{02}} \cdot e^{-\frac{W_1 - W_2}{k \cdot T}}, \quad (11)$$

kde  $\gamma$  je konduktivita,  $\eta$  je dynamická viskozita,  $q$  je náboj elektrónu,  $n$  je látkové množstvo,  $F_1$  je vztlaková sila,  $F_2$  je sila odporu prostredia,  $l$  predstavuje rozmer molekú kvapaliny,  $k$  je Boltzmanova konštanta a  $W$  predstavuje energiu elektrostatického pola.

Na základe veľkosti energie elektrostatického pola môžu nastať tri možnosti:

- $W_1 > W_2$ : ióny sú viazané s molekulami kvapaliny pevnejšie ako molekuly medzi sebou. Súčin  $\eta \cdot \gamma$  s teplotou vzrastá, čo je spôsobené rastúcou koncentráciou voľných nosičov náboja.
- $W_1 < W_2$ : v tejto situácii sú väzby medzi molekulami pevnejšie ako väzby medzi iónmi a molekulami. Súčin  $\eta \cdot \gamma$  s rastúcou teplotou klesá a pokles viskozity je rýchlejší ako nárast konduktivity.
- $W_1 = W_2$ : v tomto prípade sú oba druhy väzieb približne rovnako silné a za predpokladu, že platí  $f_{01} = f_{02}$  a  $l_1 = l_2$ , je nárast konduktivity rovnaký ako pokles viskozity a za týchto okolností sú splnené podmienky *Waldenovho pravidla* [3]:

$$\gamma \cdot \eta = \frac{n \cdot q^2}{l} = konst. \quad (11)$$

Pre *Waldenovo pravidlo* platí, že súčin konduktivity a dynamickej viskozity kvapalného izolantu je konštantý a nezávislý na teplote. Nemôže platiť v širšom intervale teplôt a pre všetky kvapalné izolanty. Uplatňuje sa iba v kvapalinách, ktoré sú nepolárne a majú minimálny obsah prímiesí a nečistôt, teda v prípade, kedy sa v danom kvapalnom izolante nemení stupeň disociácie molekúl kvapaliny a vodivosť je spôsobená iónmi vlastnej kvapaliny. Čím viac bude v kvapaline nečistôt, tým viac sa bude uplatňovať ich vodivosť a izolant sa bude od *Waldenovho pravidla* odkláňať.

### 2.1.1.3 Elektrická vodivosť tuhých izolantov

Elektrická vodivosť je u tuhých izolantov spôsobená pohybom vlastných iónov, náhodnými prímiesami iónov a u niektorých materiálov aj prítomnosťou voľných elektrónov. Vyskytuje sa najmä vtedy, ak sa izolant nachádza vo veľmi silnom elektrickom poli. Prevláda výskyt iónovej vodivosti.

Ak tuhým izolantom prechádza elektrický prúd, ióny prímiesí môžu byť čiastočne odstánené vylúčením na elektródach. Tým sa elektrická vodivosť zmenší a rovnako sa zmenší i hodnota pretekajúceho prúdu, na ktorú vplyva dlhotrvajúce pôsobenie jednosmerného prúdu.



Voda, ktorá je absorbovaná na povrchu tuhých izolantov spôsobuje povrchovú elektrickú vodivosť. Elektrický prúd preteká touto tenkou vrstvou vody. Táto povrchová vodivosť závisí od typu izolačného materiálu a úzko súvisí so zmäčavosťou povrchu. Pri iónových a polárnych izolantoch sa na povrchu kvapka vody roztečie, u nepolárnych izolantov s tvar kvapky na povrchu zachováva. Zmäčavosť povrchu sa vyhodnocuje *dotykovým uhlom zmäčavosti*  $\theta$ , ktorý je pre povrchy zmäčavé menší ako  $90^\circ$  [3].

### 2.1.2 Polarizácia dielektrík

Dielektrikum je izolant, ktorý je umiestnený medzi vodivými elektródami kondenzátora a v elektrickom poli sa polarizuje. Ako polarizáciu dielektrík označujeme dej, kedy pôsobením elektrického pola dochádza k pohybu viazaných elektrických nábojov v izolantoch, vysunutiu nábojov z ich rovnovážnych polôh na ohraničenú malú vzdialenosť a zmene orientácie dipólových molekúl. Po zániku elektrického pola sa molekuly vracajú do pôvodného stavu [3].

Elektrická polarizácia môže byť:

- *Deformačná (pružná)*: elektrónová, iónová
- *Relaxačná (tepelná)*: dipólová, iónová
- *Migračná (medzivrstovná, vysokonapäťová)*
- *Spontánna (samovol'ná)*
- *Rezonančná*

### 2.1.3 Permittivita

Miera polarizácie dielektrika sa hodnotí na základe zväčšenia kapacity kondenzátora pri zámene vákuua alebo vzduchu medzi doskami daným materiálom. Pomer kapacity kondenzátora s daným dielektrikom  $C_d$  ku kapacite kondenzátora s vákuom medzi doskami (geometrická kapacita)  $C_0$  sa nazýva *relatívna permitivita*  $\epsilon_r$ , ktorá je dielektrickou konštantou [3]:

$$\epsilon_r = \frac{C_d}{C_0} \quad (12)$$

Permittivita charakterizuje vplyv elektrického pola na elektrický stav v izolantoch.

Permitivita izolantov je vypočítaná ako [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (13)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vákua s hodnotou  $8,859 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ .

#### 2.1.4 Dielektrické straty

Jedná sa o proces premeny časti elektrickej energie na teplo v prípade, že sa izolačný materiál nachádza v elektrickom poli. Dielektrickými stratami nazývame množstvo energie remenej na teplo za jednotku času v celom objeme materiálu. Pri jednosmernom napätí sú dielektrické straty spôsobené vodivosťou materiálu, pri striedavom napätí sa vyskytuje i polarizačná a ionizačná zložka.

Kvantitatívne je možné dielektrické straty vyjadriť tzv. stratovým výkonom, teda elektrickou energiou, ktorá sa pri pôsobení elektrického pola v jednotke času mení na teplo a izoláciu zohrieva [3].

Dielektrické straty rozlišujeme:

- *Vodivostné straty*: sú spôsobené malým množstvom voľných elektrických nábojov, ktoré sa vyskytujú u všetkých izolantov.
- *Polarizačné straty*: sú následkom relaxačných, migračných, spontánnych a rezonančných polarizácií. Sú spôsobené oneskorením pohybu viazaných elektrických nábojov so zmenami vo veľkosti intenzity elektrického pola.
- *Ionizačné straty*: Vyskytujú sa u plynov pri napätiach, ktoré prevyšujú ionizačné napätie.

#### 2.1.5 Elektrická pevnosť

Na základe veľkosti intenzity elektrického pola je možné posúdiť elektrické namáhanie izolantov. Elektroizolačnú schopnosť vykazujú izolanty iba v určitom rozmedzí elektrického pola. Po prekročení kritickej hodnoty intenzity elektrického pola dochádza k prierazu. Napätie, pri ktorom k prierazu dochádza nazývame *prierazové napätie*  $U_{pr}$ . Zodpovedajúca hodnota intenzity elektrického pola v momente prierazu je *elektrická pevnosť*  $E_{pr}$ , ktorú je možné vypočítať ako [3]:

$$E_{pr} = \frac{U_{pr}}{d}, \quad (14)$$

kde  $E_{pr}$  je elektrická pevnosť,  $U_{pr}$  je prierazové napätie a  $d$  je vzdialenosť medzi elektródami.

Prieraz izolačného materiálu je náhlym vzrastom elektrickej vodivosti, čím izolant stráca izolačné vlastnosti.

### 2.1.6 Neelektrické vlastnosti

Medzi neelektrické vlastnosti izolantov patria [3] [18] [19] [20]:

- *Mechanické vlastnosti:* Overujú sa skúškami namáhania materiálu, jeho pevnosti či tvrdosti. Na základe týchto vlastností rozlišujeme krehké plastické a pružné izolanty.
- *Tepelné vlastnosti:* Teplo, ktoré vzniká v elektrických obvodoch, je potrebné odvádzať do okolitého prostredia prostredníctvom izolačného materiálu. Tepelná vodivosť má vplyv aj na elektrickú pevnosť pri tepelnom prieraze a na odolnosť materiálu voči tepelným nárazom. Jedná sa o schopnosť materiálu znášať krátkodobé aj dlhodobé pôsobenie vysokej teploty a vyjadruje sa najvyššou teplotou, pri ktorej je materiál schopný plniť svoju schopnosť.
- *Navlhavosť izolantov:* Je to schopnosť materiálu pohltiť vlhkosť z okolitého prostredia a prepúšťať ju, teda schopnosť prepúšťať vlhkosť cez objem materiálu. Izolačné schopnosti sa pohltením vlhkosti zhoršujú.
- *Odolnosť izolantov voči vplyvom vonkajšieho prostredia:* je potrebné poznať klimatické podmienky, ktoré môžu vplývať na daný materiál a poznať ich vplyv na vlastnosti materiálov a spôsoby, ktorými je možné dosiahnuť odolnosť elektrotechnických zariadení.
- *Vplyv žiarenia na vlastnosti izolantov:* vlastnosti izolantov sa menia pôsobením žiarenia a tieto zmeny môžu byť vratné a nevratné.
- *Strnutie izolantov:* ide o zmeny elektrických aj mechanických vlastností, pričom znakmi stárnutia sú zhoršenie elektrických vlastností, zníženie mechanickej pevnosti, zmena štruktúry izolácie, jej krehnutie a praskanie, zvlhnutie a usádzanie prachu a sadzí na povrchu izolácia. Izolácia starne účinkom mechanického namáhania, vysokej teploty, elektrického pola atď.

## 2.2 Elektroizolačné kvapaliny

Kvapalnými izolačnými látkami sú predovšetkým oleje. Ich využitie v elektrotechnike je široké, nakoľko majú priaznivé elektroizolačné vlastnosti. Používajú sa najmä ako izolačné a chladiace médium, ale aj ako výplň v priestore, zhášadlo, pre odvod tepla alebo ako ochrana pevných izolantov. Kvapalné izolanty sa využívajú v rezistoroch, kondenzátoroch, puzdrách či u rôznych typov transformátorov.

Jednou z ich negatívnych vlastností je postupná degradácia, dôsledkom ktorej dochádza k starnutiu izolačných kvapalín a taktiež k zhoršovaniu ich vlastností.

Elektroizolačné kvapaliny môžeme rozdeliť do troch skupín:

- *Minerálne oleje*
- *Rastlinné oleje*
- *Syntetické kvapalné izolanty*

### 2.2.1 Minerálne oleje

Táto skupina olejov predstavuje je v súčasnosti v elektrotechnike najrozšírenejšia. V elektroizolačných zariadeniach sú používané ako izolačné, impregnačné alebo chladiace médium. Minerálne oleje sú získavané destiláciou z ropy a následne sú rafinované, čím sú odstránené nežiadúce látky. Predstavujú zmes naftalenových, aromatických a parifinických uhlovodíkov a ich vlastnosti závisia na ich chemickom zložení.

Ich najväčšou výhodou sú dokonalé dielektrické vlastnosti, avšak veľkou nevýhodou je ich vysoká horľavosť a neodbúrateľnosť, čo má negatívny vplyv na životné prostredie.

Z hľadiska použitia rozlišujeme minerálne oleje transformátorové, ktoré sú vysoko odolné voči starnutiu a mali by mať čo najnižšiu viskozitu, kondenzátorové, ktoré sú pomerne vysoko horlavé majú nízku permitivitu a káblové oleje, ktoré majú vyššiu viskozitu, aby nestekali z povrchu izolácie [7] [8] [19] [20].

Minerálne oleje sa rozdeľujú na:

- *Prafinické oleje*: jedná sa o číre a mastné kvapaliny, ktoré majú pri zahriatí mierny zápach ropy. Sú nerozpustné v o vode, glycerole a studenom ethanole. Ich hustota je približne  $0,8 \text{ g/m}^3$  a používajú sa hlavne v priemysle, napr. pri výrobe farbív, pigmentov, farieb, mazivo či izolačná kvapalina v transformátoroch, ale aj pre lekárske účely.

- *Naftalenické oleje*: majú nižší bod tuhnutia, nakoľko neobsahujú vosk. Tiež majú nižšiu viskozitu, menšiu odolnosť voči oxidácii a používajú sa napríklad ako chladiace oleje a v elektrotechnike pre káblOVú techniku.
- *Aromatické oleje*: ide o vedľajšie produkty, ktoré vznikajú pri rafinácii parafinických olejov. Ich štruktúra je cyklická a sú tmavšej farby. Používajú sa na výrobu lepidiel a pečiatovacích voskov.

### 2.2.2 *Rastlinné oleje a ich zložky*

Rastlinné oleje sa získavajú lisovaním semien, plodoch a ďalších častí rastlín. Jedná sa o zmes esterov, glycerínov a mastných kyselín, vďaka čomu sú netoxické a biologicky odbúrateľné.

Jednou z ich najpozitívnejších vlastností je tepelná stabilita pri vysokých teplotách. Zvyčajne majú vysokú odolnosť voči horeniu, vďaka čomu je ich použitie bezpečné a sú šetrné k životnému prostrediu. Ďalšou pozitívnou vlastnosťou rastlinných olejov a ich zložiek je vyššia oxidačná stabilita, ktorá je daná ich zložením, taktiež i vonkajšími faktormi ako teplotou, prostredím či vzduchom.

Rozlišujeme vysychavé a nevysychavé rastlinné oleje, pričom vysychavé rastlinné oleje sú používané najmä na výrobu elektroizolačných lakov.

Existuje veľké množstvo rastlinných olejov, pričom každý sa od seba líši elektrickými, fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. Medzi najdostupnejšie rastlinné oleje patria:

- *Ricínový olej*: oplýva vysokou permitivitou a nie je jedovatý. Používa sa na plnenie papierových kondenzátorov pre jednosmerné obvody. Jedná sa o nevysychavý olej, ktorý je takmer bez farby. Má nízky bod tuhnutia a nižšiu horľavosť.
- *Repkový olej*: získava sa zo semien repky olejnej a je lisovaný za studena alebo pomocou organických rozpúšťadiel.
- *Slničnicový olej*: bežne je využívaný v potravinárskom priemysle alebo na kozmetické účely. Môže byť svetlej jantárovej farby alebo po rafinovaní svetlej žltej farby. Obsahuje vitamín E, steroly, alifatické uhľovodíky atď. Jeho bod tuhnutia je približne v  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- *Olivový olej*: sa získava lisovaním plodov olivovníka európskeho, pričom je v jeho zložení najviac zastúpená kyselina olejová. Obsah ďalších zložiek závisí na prostredí pestovania olivovníka. Používa sa najmä v potravinárstve, pre kozmetické účely a aj vo farmaceutickom priemysle. Má vysoký obsah mononenasýtených mastných kyselín a tuhú podobu nadobúda medzi teplotami  $0$  až  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- *Kukurličný olej*: sa vyrába lisovaním za studena z kukuričných častí a je bohatý na kyselinu linolovú. Je svetlej žltej farby a jeho bod horenia je až 240°C. Tuhnúť začína pri teplote pod 3 °C.
- *Ryžový olej*: je získavaný z ryžových otrúb, teda z časti medzi zrnom a obalom. Je rafinovaný, zlatistej farby a s vôňou ryže. Olej je možné vystavovať vysokým teplotám, až do 215°C a tuhne pri teplote -7 °C. Obsahuje vitamín E, na základe čoho má dobrú oxidačnú stabilitu a tiež obsahuje mononenasytené kyseliny. Je možné ho použiť aj ako biopalivo.
- *Sójový olej*: je svetlej žltej farby a získava sa lisovaním bôbov pri 60°C až 90°C. Tento olej je rafinovaný a širšie využívaný. Čiastočne hydrogenované oleje sa predávajú ako oleje rastlinné. Tento olej má bod tuhnutia okolo -13°C. Používa sa k elektrohydrodynamickému sprejovaniu povrchov.
- *Palmový olej*: získava sa z plodov palmi olejnej a aj napriek jeho negatívnym vplyvom je jedným z najvyužívanejších olejov v potravinárstve. Jeho hlavnými zložkami sú kyselina laurová a kyselina palmitová a pri izbovej teplote je to biela až mierne žltá hmota. Topí sa pri 35°C a jeho vysoká stabilita je používaná proti oxidácii. Je dôležitou zložkou pri výrobe biopaliva.
- *Olej MERO*: jedná sa o metylester repkového oleja. Pri jeho výrobe sa využíva ako vstupná surovina repkový olej a menšie množstvo metanolu. Výrobný proces je založený na lisovaní oleja, filtrovaní a chemickej reakcii oleja, metanolu a katalyzátoru na methylester a glycerín. Táto kvapalina nie je toxická, neobsahuje ťažké kovy ani žiadne škodlivé látky, je však agresívny voči živiciam a bežným náterom. Tento olej sa používa najmä ako prísada do motorových palív a ekologického motorového paliva.

Najvýznamnejšou zložkou olejov sú mastné kyseliny, ktoré sa vyskytujú najmä ako estery v prírodných tukoch a olejoch, avšak môžu byť prítomné aj v neesterifikovanej podobe ako voľné mastné kyseliny. Chemicky sa jedná o alifatické monokarboxylové kyseliny, ktoré majú dlhé a spravidla nevetvené uhlovodíkové reťazce.

Mastné kyseliny sa navzájom líšia v dĺžke reťazcov a charakterom uhlovodíkového reťazca, stupňom nasýtenosti a v niektorých prípadoch tiež prítomnosťou ďalších substituentov. Reťazce môžu byť nasýtené alebo nenasýtené, pričom nenasýtené mastné kyseliny tvoria väčšinu rastlinných olejov.

V rastlinných olejoch sú najviac zastúpené nasledujúce mastné kyseliny:

- *Kyseliny palmitová*: jedná sa nasýtenú mastnú kyselinu, ktorá je za normálnych podmienok bielej farby a tuhá. Na kvapalnú sa mení približne pri teplote 62°C a jej teplota varu je 338 °C. Najviac je zastúpená v palmovom oleji.
- *Kyselina stearová*: patrí do skupiny nasýtených mstných kyselín a za normálnych podmienok je tuhá. K jej skvapalneniu dochádza okolo teploty 70 °C a jej bod varu je okolo 358 °C. V priemysle sa využíva pri výrobe butadienstyrenového kaučuku.
- *Kyselina olejová*: je zástupcom nenasýtených mastných kyselín a je žltej farby. Má mierny zápach a jej bod varu je približne 360 °C a tuhne pod 6 °C. Nie je toxická a najvyššie zastúpenie má v olivovom, repkovom a slnečnicovom oleji.
- *Kyselina linolová*: je to nenasýtená mastná kyselina, ktorá sa vyskytuje najmä v ľanovom a slnečnicovom oleji. Používa sa hlavne pri výrobe emulgátorov, mysieli a rýchloschnúcich olejov. Tuhne približne pod – 5 °C.
- *Kyselina linolenová*: tiež sa jedná o nenasýtenú mastnú kyselinu a uplatňuje sa najmä v potravinárskom priemysle. Táto mastná kyselina ľahko podlieha oxidácii.

**Tabuľka 1:** Zastúpenie mastných kyselín vo vybraných rastlinných olejoch

<i>Rastlinný olej</i>	<i>K. palmitová</i> [%]	<i>K. stearová</i> [%]	<i>K. olejová</i> [%]	<i>K. linolová</i> [%]	<i>K. linolenová</i> [%]
Slnečnicový olej	4 – 9	1 – 7	14 – 40	48 - 74	-
Olivový olej	7,5 - 20	0,5 - 5	56 – 85	3,5 – 20	Max 1,2
Kukuričný olej	8,6 – 16,5	Max 3,3	20 – 42,2	39,4 – 65,6	0.5 – 1,5
Ryžový olej	13 – 22	1 – 6	35 – 45	30 – 45	1 - 6
Ricínový olej	Max 2	Max. 2,5	2.5 – 6	2,5 – 7	Max 1
Repkový olej	1,5 - 6	0,8 – 2,5	50 – 66	18 – 24	6 - 14
Palmový olej	40 - 43	3 - 4	40 - 43	Max 4	-
Sójový olej	9 – 13	3 – 5	17 – 30	48 – 58	5 - 11

### 2.2.2.1 *Súčasné využitie rastlinných olejov v technickej praxi*

V súčasnosti patria svetovo medzi najsledovanejšie druhy olejín sója, repka olejná, semeno bavlníku, slnečnic, palmové jadrá a kopra. Za posledný marketingový rok bolo vyrobených približne 176,1 mil. t rastlinných olejov a 299,5 mil. t pokrutín a extrahovaných šrotov. Najväčším svetovým dovozným, ale aj vývozným regiónom poľnohospodárskych produktov je Európska únia. Čo sa týka stavu v Českej republike, najvyšší podiel v produkcii olejov zastáva repka olejná, ďalej mak, slnečnice, horčicové semená, sója, ľan olejný a iné. Dopyt po repke olejnej v Českej republike vzrástol najmä po zavedení povinného primiešavania biozložiek do pohonných hmôt, taktiež je používaná pri výrobe metylesteru repkového oleja, ktorý je určený pre domáci trh i pre vývoz.

Rastlinné oleje predstavujú vhodnú alternatívu k minerálnym olejom, nakoľko sú netoxické a biodegradabilné. Sú zložené z mastných kyselín, na základe čoho závisia ich vlastnosti ako viskozita, bod tuhnutia či bod vznietenia. Skúmané sú u nich aj dielektrické vlastnosti či oxidačná stabilita. Pre dielektrické parametre je dôležitá čistota oleja, teda je dôležité oddeliť a odfiltrovať ich pevné zložky a taktiež je potrebné oleje odvlhčiť, nakoľko sú schopné hydroskopické, teda sú schopné absorpcie. Pre elimináciu tejto vlastnosti sa do olejov pridávajú antioxidanty. Potrebné je poznať aj ich vplyv na prvky v systémoch, v ktorých sa používajú a taktiež vplyv súčastí systémov na ich starnutie olejov.

Rastlinné oleje je možné využiť napríklad ako chladiace a izolačné médium u transformátorov, kde je dôležité, aby bola dosiahnutá rovnováha výkonu medzi vnútrom transformátoru a enviromenálnym dopadom v prípade uvoľnenia do životného prostredia. Vo vnútri transformátora sú požadované stabilné, chemicky nereagujúce kvapaliny s dobrými tepelnými a dielektrickými vlastnosťami, taktiež by tieto kvapaliny nemali byť toxické pre prípad možnej havárie. V porovnaní s minerálnymi olejmi, rastlinné oleje sa dokážu kompletne a rýchlo biologicky rozložiť a takisto nie sú toxické, nakoľko neobsahujú halogény, aromatické jadrá, prchavé látky či iné zložky. Môžu byť tvorené prírodnými esterami a mastnými kyselinami, ktoré oplývajú vysokým bodom horenia až 360 °C. Taktiež nepodliehajú oxidácii v takej miere ako minerálne oleje, čo je určené zastúpením jednotlivých zložiek v olejoch. Táto vlastnosť je nižšia u olivového oleja a repkového oleja s primiešanými antioxidantmi, vďaka čomu je umožnené ich použiť v transformátoroch.

Pri oxidácii oleje začnú hustnúť a polymerizovať, čím dochádza k nárastu viskozity, čo môže byť použité ako tesnenie káblových aplikácií ako ochrana pred nečistotami a vlhkosťou.



Oceňovanou vlastnosťou v technickej oblasti je i to, že starnutie rastlinných olejov sa vždy prejavuje aj vizuálne, ako napríklad špecifickým sfarbením, oxidáciou, obsahom vody alebo vzrastom dielektrických strát.

Raslinné oleje nachádzajú využitie pri výrobe rastlinných polyolov, ktoré sa používajú ako prímiesy do tvrdých polyuretánových pien.

Vysychavé oleje sa aj vďaka ich dobrým elektroizolačným vlastnostiam používajú ako tvrditeľné elektroizolačné laky, pri vyššej tepelnej námahe sa však odlamujú z povrchu a praskajú.

Ďalšou možnosťou využitia rastlinných olejov, resp. ich zložiek, v elektrotechnike sú lítio-iónové batérie, kde sú pridávané do zmesi pre elektrolyt.

Ako už bolo spomenuté, rastlinné oleje a ich zložky sa v súčasnosti pridávajú aj do biopalív. Jednou z možností je olej MERO, avšak možné je použiť aj slnečnicový, kukuričný alebo sójový olej [4] [5] [7] [10] [11] [17] [18] [19] [20] [23] [24].

### 2.2.3 *Syntetické kvapalné izolanty*

Tento typ kvapalín sa rozdeľuje na základe vzniku. Môžu byť na báze prírodnej, kedy sa snažia vykompenzovať negatívne vlastnosti rastlinných olejov. Syntetické kvapaliny sú nehorľavé, majú vysokú tepelnú stabilitu a uspokojivé chemické vlastnosti. Ak sú ich vlastnosti výhodnejšie ako vlastnosti minerálnych olejov, je možné ich použiť ako ich náhradu. Dôležitou mierou syntetických olejov je napríklad index viskozity, kedy sa posudzuje viskozita kvapaliny pri nízkej a vysokej teplote. Druhou mierou je číslo TBN, ktoré popisuje zásaditosť alebo kyslosť oleja. Tieto miery sú dôležité pri použití materiálov náchylných na koróziu, ako napríklad guma či kovy. Ďalej sa posudzuje bod tuhnutia, pričom olej musí byť vždy tekutý a bod vzplanutia [18] [19].

Syntetické kvapalné izolanty je možné rozdeliť na:

- *Kvapaliny vzniknuté polymerizáciou uhľovodíkov*: jedná sa o kvapaliny nepolárny a ekologicky nezávadné. Vznikajú ako splodiny pri polymerizácii menasýtených uhľovodíkov butylénov a oplývajú odolnosťou voči oxidácii a žiareniu. Majú dobré elektroizolačné vlastnosti a sú stabilné pri teplotách nad 90 °C. Používajú sa v káblových aplikáciách a na impregnáciu vo zvitkových kondenzátoroch.
- *Chlórované uhľovodíky*: aby boli dosiahnuté ich elektrotechnické vlastnosti, je potrebné použiť chlór, kvôli čomu sú ekologicky i zdravotne závadnými. Ich prednosťou je nehorľavosť, avšak kvôli ich negatívnym vplyvom na ľudské zdravie boli zakázané.

- *Fluorované zlúčeniny*: tieto kvapaliny vykazujú vysokú stabilitu pri vysokých teplotách. Pri rôznych výbojoch však vzniká kyselina, ktorá pôsobí agresívne voči kovom a izolačným systémom. Používajú sa najmä ako náplň do transformátorov.
- *Organické estery*: jedná sa o oleje s vysokým bodom vzplanutia a vyššou viskozitou ako minerálne oleje. Pripravujú sa esterifikáciou medzi alkoholom a karboxylovou kyselinou. Sú zložené z vodíka, uhlíka, kyslíka a sú ekologicky nezávadné.
- *Silikónové kvapaliny*: majú nízky bod tuhnutia. Sú nehorľavé, netoxické, tepelne stabilné a majú výborné elektroizolačné vlastnosti. Ide o organokremičité makromolekulárne látky, ktoré obsahujú organický radikál.

# 3. PRAKTICKÁ ČASŤ

Táto časť sa zaoberá meraním reologických vlastností rastlinných olejov a ich zložiek v širokom tepelnom rozsahu. Pre všetky kvapaliny bola zmeraná hustota a následne aj ich viskozita. Meranie prebiehalo v laboratóriu Ústavu elektrotechnológie na certifikovaných zariadeniach.

Nakoľko všetky merané kvapaliny vykazovali vysoký bod vzplanutia, bolo možné prevádzať meranie až do teploty približne 100 °C. Avšak rozmedzie teplôt bolo u každej kvapaliny individuálne, nakoľko sa bod tuhnutia líšil u každej jednej kvapaliny, čo je spôsobené rôznym zastúpením jednotlivých zložiek. Merané kvapaliny sú zobrazené na obrázku 8 a boli zmerané vlastnosti nasledujúcich kvapalín:

- *Slnečnicový olej*: ktorý má bod tuhnutia pri teplote -17 °C
- *Olivový olej*: tuhne v rozmedzí od 0 do 10 °C
- *Ryžový olej*: jeho teplota tuhnutia je -7 °C
- *Kukurličný olej*: tuhne už pri 3 °C
- *Kyselina olejová*: jej bod tuhnutia je 6 °C
- *Kyselina linolová*: tuhne pri -5 °C
- *Ethyl oleát*: vyznačuje sa nízkym bodom tuhnutia až - 32 °C
- *Olej MERO*: jeho bod tuhnutia je v okolí -20 °C a používa sa napríklad ako zložka ekologických palív
- *MOGUL Trafo CZ-A*: predstavuje klasický transformátorový minerálny olej, ktorého vlastnosti boli merané pre porovnanie s rastlinnými olejmi a ich zložkami, teda masnými kyselinami. Má veľmi nízky bod tuhnutia.

*Tabuľka 2: Prehľad obvyklých hodnôt hustoty pre jednotlivé kvapaliny*

Meraná kvapalina	Teplota (°C)	Hustota (g.cm <sup>-3</sup> )
Snečnicový olej	20	0,916
Olivový olej	20	0,913
Ryžový olej	15	0,920
Kukuričný olej	20	0,917-0,924
Kyselina olejová	20	0,895
Kyselina linolová	25	0,914
Ethyl oleát	20	0,87
Olej MEŘO	16	0,882
TRAFO CZ-A	15	0,87



*Obrázok 8: Merané rastlinné oleje, ich zložky a minerálny olej TRAFO CZ-A*

### 3.1 Meranie hustoty

Meranie hustoty prebiehalo metódou ponorného telieska, ktorá je založená na Archimedovom zákone. Teliesko, ktoré bolo ponorené v meranej kvapaline, bolo nadľahčované vztlakovou silou  $F_{vz}$ , ktorej veľkosť je ovplyvňovaná objemom ponorenej časti, hustotou kvapaliny a tiažovým zrýchlením.

Teliesko, ktoré bolo použité pre meranie, je tvorené kremičitým sklom a jeho objem je  $10,0180 \text{ cm}^3$ .

Pre meranie boli použité analytické váhy OHAUS, na ktorých spodnú časť bolo pomocou vlasca prichytené teliesko pre meranie hustoty. Teliesko bolo ponorené do meranej kvapaliny, ktorá sa nachádzala v odmernom valci. Ten bol umiestnený vo termostate s vodným kúpeľom MEDINGEN, prostredníctvom ktorého bola meraná tekutina zahrievaná aj ochladzovaná na požadovanú teplotu.

Na základe toho, či bolo požadované ohrievanie alebo ochladzovanie, sa volila kvapalina do termostatu - destilovaná voda v prípade ohrievania a nemrznúca zmes v prípade ochladzovania.

Počas merania bolo potrebné kontrolovať, či nedochádza k odparovaniu meranej kvapaliny a teda či je teliesko úplne ponorené a zároveň bolo potrebné prikryť vodný kúpeľ, v ktorom bol odmerný valec s meranou kvapalinou umiestnený. Bolo tomu potrebné urobiť na základe toho, aby sa do analyrických váh nedostali pary vody, nakoľko by to mohlo skresliť meranie a znehodnotiť výsledky merania. Ďalším dôvodom bola ochrana pred únikom tepla a chladu.

Termostat tiež umožňoval aj externé meranie teploty pomocou tepelného čidla, vďaka čomu sme mohli kontrolovať aj teplotu meranej kvapaliny.

Aparatúra použitá pre meranie hustoty je zobrazená na obrázku 9.



*Obrázok 9: Analytické váhy OHAUS a termostat MEDINGEN*

Pred každým meraním boli analytické váhy automaticky skalibrované a následne bola zmeraná telieska vo vzduchu. Toto meranie bolo prevedené vísaním telieska ešte v prázdnom valci pre meranú kvapalinu, pričom bolo sledované, či sa v odmernom valci teliesko nedotýka jeho steny alebo tepelného čidla. Po zmeraní hmotnosti vo vzduchu bola do odmerného valca priadaná meraná tekutina. Pokaždé bolo potrebné počkať, kým sa z jej objemu vytratia bublinky, nakoľko by bohlo dôjsť k skresleniu merania. Taktiež bolo potrebné dávať pozor, aby tekutina nestekala do valca po vlasici, na ktorom bolo teliesko zavesené.

Objem tekutiny sa volil tak, aby v nej bolo telieko úplne ponorené. Meranie mohlo byť zahájené vo chvíli, kedy teplota dosahovala požadovanú počiatočnú hodnotu.

Hustota, resp. hmotnosť telieska ponoreného v kvapaline bola meraná v rôznych tepelných bodoch. Keďže bolo umožnené prepojenie analytických váh a termostatu s PC, meranie bolo prevádzané pomocou programu.

Z nameraných hodnôt bola následne vypočítaná hustota meranej kvapaliny pri každej teplote a to na základe nasledujúceho vzorca:

$$\rho = \frac{m_{vzduch} - m_{ponorené}}{V} + \rho_{vzduch}, \quad (15)$$

kde  $\rho$  je výsledná hustota meranej kvapaliny,  $m_{vzduch}$  je hmotnosť telieska vo vzduchu,  $m_{ponorené}$  je hmotnosť telieska ponoreného v meranej kvapaline a  $\rho_{vzduch}$  je hustota vzduchu, ktorá pri normálnych podmienkach podľa tabuliek dosahuje hodnotu  $0,00127 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabuľka 3:** Namerané a vypočítané hodnoty hustoty a súčiniteľa objemovej rozťažnosti kukuričného oleja

<b>θ (°C)</b>	<b>m<sub>vzduch</sub> (g)</b>	<b>m<sub>ponorené</sub> (g)</b>	<b>ρ (kg·m<sup>-3</sup>)</b>	<b>β (K<sup>-1</sup>)</b>
<b>2.7</b>	21.9915	12.6997	928.780	7.72E-04
<b>5.2</b>	21.9915	12.7174	927.010	7.76E-04
<b>9.9</b>	21.9915	12.7520	923.600	7.74E-04
<b>14.7</b>	21.9915	12.7825	920.515	8.48E-04
<b>19.6</b>	21.9915	12.8209	916.682	0.00E+00
<b>24.5</b>	21.9915	12.8524	913.538	6.93E-04
<b>29.5</b>	21.9915	12.8856	910.229	7.11E-04
<b>34.6</b>	21.9915	12.9198	906.810	7.26E-04
<b>39.6</b>	21.9915	12.9542	903.381	7.36E-04
<b>44.6</b>	21.9915	12.9880	900.007	7.41E-04
<b>49.5</b>	21.9915	13.0208	896.733	7.42E-04
<b>54.6</b>	21.9915	13.0517	893.644	7.37E-04
<b>59.6</b>	21.9915	13.0818	890.644	7.31E-04
<b>64.6</b>	21.9915	13.1199	886.841	7.48E-04
<b>69.6</b>	21.9915	13.1433	882.973	7.64E-04
<b>74.6</b>	21.9915	13.1835	880.487	7.47E-04
<b>79.6</b>	21.9915	13.2050	876.265	7.69E-04
<b>84.6</b>	21.9915	13.2170	874.019	7.51E-04
<b>89.5</b>	21.9915	13.2489	871.863	7.35E-04

V tabuľke 3 sú zobrazené namerané hodnoty hmotnosti telieska vo vzduchu a v kukuričnom oleji. Podľa vzťahu 15 bola vypočítaná hodnota hustoty pre každú teplotu a príklad výpočtu pre prvý riadok je zobrazený vo vzťahu 16:

$$\rho = \frac{m_{vzduch} - m_{ponorené}}{V} + \rho_{vzduch} = \frac{21,9915 - 12,6997}{10,0180} + 0,00127 = 928,780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (16)$$

Vplyvom teploty dochádza k zmenám hustoty, čo je spôsobené objemovou rozťažnosťou. S rastúcou teplotou objem kvapaliny lineárne rastie a tento vzťah popisuje rovnica:

$$V = V_0 \cdot [1 + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)], \quad (17)$$

kde  $\vartheta_0$  je počiatočná teplota,  $\vartheta$  je konečná teplota,  $V_0$  je objem telesa pri počiatočnej teplote,  $V$  je objem telesa pri konečnej teplote a  $\beta$  je súčiniteľ objemovej teplotnej rozťažnosti, ktorého hodnotu je možné vypočítať po nasledovných úpravách rovnice pre výpočet hustoty homogénneho telesa:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 \cdot [1 + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)]} = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)}, \quad (18)$$

kde  $\rho$  aktuálna hustota kvapaliny,  $\rho_0$  je počiatočná hustota pri teplote  $\vartheta_0$  a  $\vartheta$  predstavuje teplotu pri aktuálnej hustote.

Na základe vzťahu 18 bolo ďalej možné odvodiť vzťah pre výpočet súčiniteľa objemovej rozťažnosti:

$$\beta = \frac{\rho_0}{\rho \cdot \Delta\vartheta} - \frac{1}{\Delta\vartheta}, \quad (19)$$

kde  $\beta$  je súčiniteľ objemovej teplotnej rozťažnosti,  $\Delta\vartheta$  je rozdiel medzi aktuálnou a počiatočnou teplotou,  $\rho$  aktuálna hustota kvapaliny a  $\rho_0$  je počiatočná hustota kvapaliny.

V tabuľke 2 sú zobrazené vypočítané hodnoty súčiniteľa objemovej rozťažnosti, ktorý sa počíta s počiatočnou hustotou v teplote 20 °C alebo najbližšie k tejto teplote, preto bola volená počiatočná teplota 19,6 °C. Príklad pre výpočet je zobrazený vo vzťahu 20:



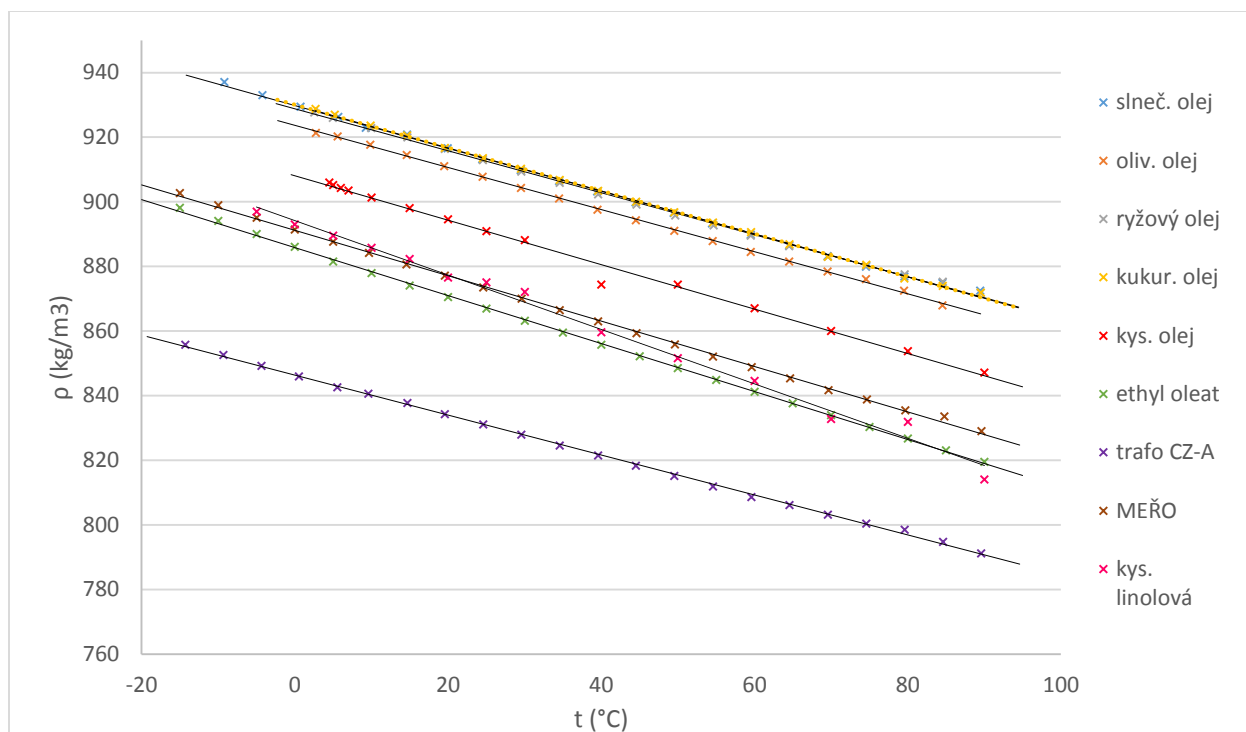
$$\beta = \frac{\rho_0}{\rho \cdot \Delta\theta} - \frac{1}{\Delta\theta} = \frac{916,682}{928,780 \cdot (2,7 - 19,6)} - \frac{1}{(2,7 - 19,6)} = 7,72 \cdot 10^{-4} K^{-1} \quad (20)$$

Súčiniteľ objemovej rozťažnosti bol však pre každú meranú kvapalinu vypočítaný prostredníctvom aproximácie nameraných hodnôt v programe MS Excel. Určila sa jeho hodnota a ako vzťažná hodnota hustoty sa určila opäť hustota v teplote 19,6 °C, nakoľko bola táto hodnota najbližšia k 20 °C. Na základe týchto hodnôt bola opäť pomocou vzorca 18 vypočítaná hustota pre každú teplotu a bola vypočítaná kvadratická odchýlka od hodnôt nameraných. Tieto hodnoty vstúpili do funkcie programu Excel „Riešiteľ“ a následne bol pomocou metódy najmenších štvorcov vypočítaný súčiniteľ objemovej rozťažnosti. Vďaka tejto funkcii bolo umožnené preloženie nameraných dát priamkou.

V tabuľke 4 sú uvedené vypočítané hodnoty súčiniteľa objemovej rozťažnosti pre každú meranú kvapalinu.

**Tabuľka 4:** Vypočítaná hodnota súčiniteľa objemovej rozťažnosti pre merané kvapaliny

Meraná kvapalina	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
Snečnicový olej	7,43.10 <sup>-4</sup>
Olivový olej	7,40.10 <sup>-4</sup>
Ryžový olej	7,36.10 <sup>-4</sup>
Kukuričný olej	7,54.10 <sup>-4</sup>
Kyselina olejová	7,99.10 <sup>-4</sup>
Kyselina linolová	9,99.10 <sup>-4</sup>
Ethyl oleát	8,78.10 <sup>-4</sup>
Olej MERO	8,24.10 <sup>-4</sup>
Trafo CZ-A	7,61.10 <sup>-4</sup>



Obrázok 10: Závislosť hustoty meraných kvapalín na teplote

Na obrázku 10 sú zobrazené tepelné závislosti hustoty meraných olejov a ich zložiek. Závislosti sú preložené vypočítanou lineárnou funkciou, ktorá takmer presne kopíruje namerané hodnoty.

Hustota bola meraná v širokom teplotnom rozsahu, pričom najnižší bod sa volil na základe bodu tuhnutia. Závislosti zobrazené na obrázku 10 nám potvrdzujú teoretický predpoklad, že sa jedná o lineárnu závislosť hustoty na teplote, pričom hustota s rastúcou teplotou klesá.

Najnižšiu hustotu vykazoval minerálny transformátorový olej TRAFKO CZ-A, u ktorého je nízka hodnota hustoty požadovaná. Jeho hustota sa v celom teplotnom rozsahu pohybovala v intervale medzi 780 až 860 kg.m<sup>-3</sup>.

O niečo vyššie hodnoty hustoty boli zaznamenané u mastných kyselín kyseliny linolovej a ethyl oleátu a u metylesteru repkového oleja, pričom ich hustota dosahovala hodnoty v rozmedzí 810 až 910 kg.m<sup>-3</sup>.

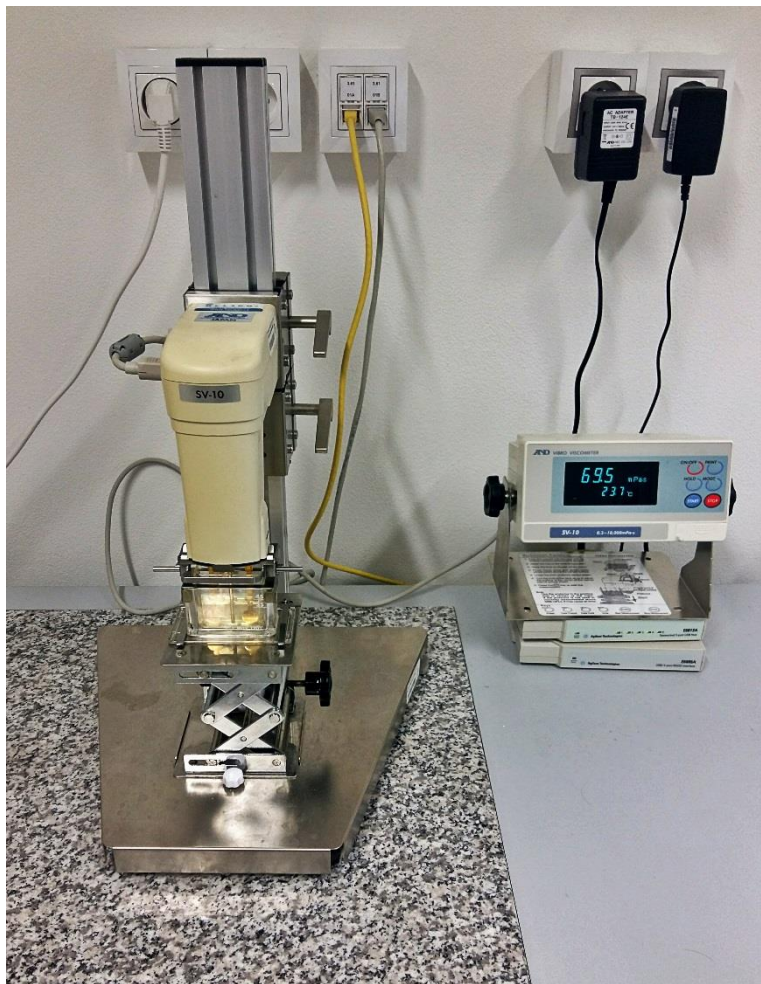
Takmer totožné priebehy hustoty môžeme pozorovať u všetkých meraných rastlinných olejov, pričom hodnoty hustoty boli zaznamenané v rozmedzí 860 až 940 kg.m<sup>-3</sup>.

Kyselina olejová vykazovala v celom teplotnom rozsahu hustotu nižšiu ako rastlinné oleje, avšak vyššiu ako ostatné mastné kyseliny.

Závislosti jednotlivých meraných kvapalín sú zobrazené v prílohe.

## 3.2 Meranie viskozity

Tepelná závislosť viskozity rastlinných olejov, ich zložiek a transformátorového oleja bola zmeraná pomocou vibračného viskozimetra SV-10. Jedná sa o viskozimeter, ktorého princíp merania bol popísaný v kapitole 1.2.6.2. Tento druh viskozimetra umožňuje kontinuálne meranie viskozity a spolu s viskozitou umožňuje i meranie teploty, vďaka čomu je jej kontrola jednoduchšia. Pred zahájením merania bol viskozimeter skalibrovaný podľa návodu. Meracie pracovisko je zobrazené na obrázku 11.



Obrázok 11: Viskozimeter SV-10

Meranie viskozity prebiehalo v širokom teplotnom rozsahu, čomu bolo potrebné prispôbiť prípravu vzoriek. Pred meraním boli vzorky meraných kvapalín umiestnené do:

- *Sterilizátoru STERICELL 55 STAN*: kde došlo k zahriatiu kvapaliny na približne 100 °C, kedy boli merané hodnoty viskozity pri poklese teploty od 100 °C po teplotu okolia
- *Laboratórny mraziaci box ELCOD DK-9500*: bol využitý pri ochladzovaní vzoriek pre meranie od záporných teplôt alebo teplôt nižších ako teplota okolia až po ohriatie na teplotu okolia

Po zahriatí alebo ochladení bola vzorka umiestnená do meracej sklenenej nádoby s objemom 10 ml. So vzorkou bolo potrebné rýchlo manipulovať, aby bol rozsah merania čo najširší a nedošlo k ohriatiu či ochladeniu vzorky.

Počas merania boli namerané hodnoty viskozity pomocou programu ukladané do PC, vďaka čomu bola zjednodušená manipulácia s dátami.

Aby bolo meranie presnejšie, viskozita bola pre každú kvapalinu meraná trikrát. Po ukončení meraní boli všetky výsledky zlúčené, ako kladné, tak i záporné a následne boli hodnoty filtrované.

Keďže viskozimeter nemeria dynamickú viskozitu, ale viskozitu zdanlivú, ktorá sa vzťahuje na hustotu, bolo potrebné i meranie hustoty, ktoré bolo popísané v kapitole 4.1. Na základe merania hustoty bol pre každú meranú kvapalinu vypočítaný súčiniteľ objemovej rozťažnosti, vďaka čomu bol umožnený výpočet hustoty pre každú teplotu, pri ktorej bola meraná viskozita. Hodnoty hustoty pre každú teplotu boli vypočítané pomocou vzorca 18. Po vypočítaní hustoty boli následne vypočítané hodnoty dynamickej viskozity podľa vzťahu:

$$\eta = \frac{\eta_{zdan}}{\rho}, \quad (21)$$

kde  $\eta$  predstavuje dynamickú viskozitu,  $\eta_{zdan}$  je zdanlivá nameraná viskozita a  $\rho$  je hustota kvapaliny.

Viskozita bola meraná v širokom rozsahu teplôt pre veľké množstvo hodnôt. V tabuľke 5 sú zobrazené hodnoty zdanlivej viskozity, vypočítanej hustoty a vypočítanej dynamickej viskozity pre vybrané teploty.

**Tabuľka 5: Vybrané hodnoty viskozity kukuričného oleja**

t(°C)	$\eta_{zdan}$ (mPa.S)	$\rho$ (kg.m- 3)	$\eta$ (mPa.s)
6.97	124.67	925.76	134.67
10.09	102.41	923.57	110.89
10.71	99.00	923.13	107.24
15.62	78.89	919.70	85.78
20.79	60.22	916.12	65.73
25.76	48.42	912.70	53.05
30.81	38.50	909.25	42.34
40.89	26.56	902.45	29.43
50.98	19.10	895.74	21.32
60.79	14.18	889.31	15.94
70.98	10.88	882.73	12.33
80.73	8.66	876.53	9.88
90.26	7.02	870.54	8.06
100.82	5.74	864.01	6.64

Vo vzťahu 21 je zobrazený príklad výpočtu hustoty pre prvý riadok tabuľky 5. Počítanie hustoty prebiehalo pomocou vzorca 18:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)} = \frac{916,12}{1 + 7,5410^{-4} \cdot (20,79 - 6,97)} = 925,76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (22)$$

kde  $\rho$  aktuálna hustota kvapaliny,  $\rho_0$  je počiatočná hustota pri teplote  $\vartheta_0$  a  $\vartheta$  predstavuje teplotu pri aktuálnej hustote.

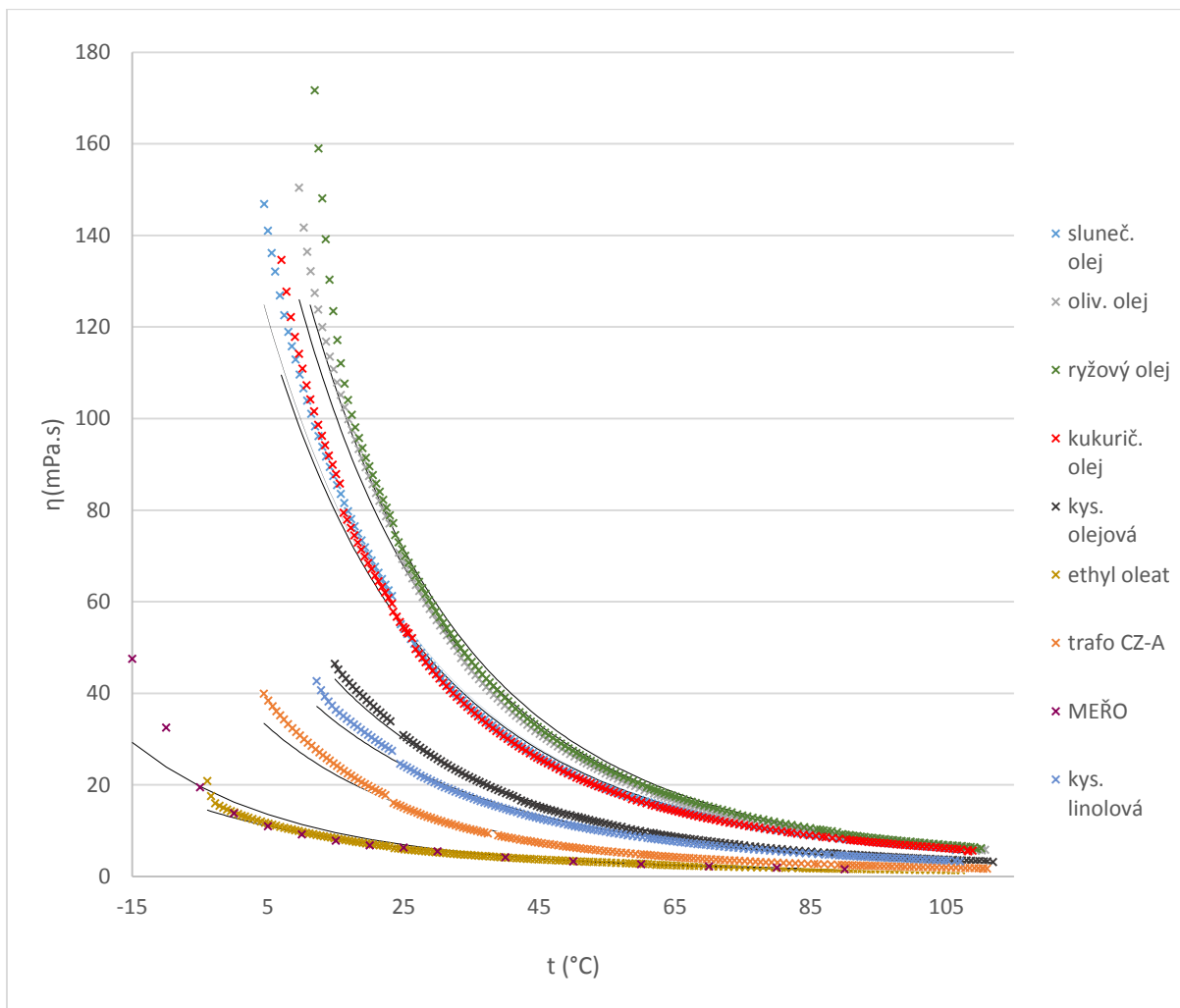
Po vypočítaní hustoty pre každú teplotu, pri ktorej bola viskozita meraná, bola podľa vzorca 21 vypočítaná dynamická viskozita. Príklad výpočtu pre prvý riadok tabuľky je zobrazený vo vzťahu 23:

$$\eta = \frac{\eta_{zdan}}{\rho} = \frac{124,67}{0,925} = 134,67 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad (23)$$

kde  $\eta$  predstavuje dynamickú viskozitu,  $\eta_{zdan}$  je zdanlivá nameraná viskozita a  $\rho$  je hustota kvapaliny.

Meranie viskozity prebiehalo opäť do teploty približne 100 °C, avšak počiatková teplota je ovplyvnená jednak bodom tuhnutia jednotlivých kvapalín, jednak stratami tepla, ku ktorým častokrát dochádzalo pri vkladaní vzorky do viskozimetru. Pri teplotách v okolí 0 °C bolo u rastlinných olejov možné pozorovať ich rozloženie na jednotlivé fázy, resp. ich kompozičné zložky. Oleje sa nachádzali v tzv. polokvapalnom stave, kedy nebolo možné pomocou viskozimetra odmerať viskozitu danej látky. Z toho dôvodu bolo potrebné počkať, kým sa olej dostane na teplotu, pri ktorej dôjde k dokonalému premiešaniu jednotlivých zložiek.

Po nameraní boli hodnoty zdanlivej viskozity prepočítané na dynamickú viskozitu a získané tepelné závislosti boli vynesené do grafu, ktorý je zobrazený na obrázku 12.



Obrázok 12: Závislosť dynamickej viskozity meraných kvapalín na teplote

Na obrázku 12 sú zobrazené závislosti dynamickej viskozity, pričom každá nameraná závislosť je preložená aproximovanou funkciou. V grafe môžeme pozorovať, že namerané hodnoty viskozity takmer presne kopírujú preloženú funkciu a taktiež môžeme sledovať exponenciálny pokles viskozity s rastúcou teplotou.

Približne okolo teploty 20 °C už nie sú rozdiely viskozity medzi jednotlivými kvapalinami výrazné.

Pre lepšiu názornosť boli zostrojené samostatné grafy pre rastlinné oleje, masťné kyseliny a olej MEŘO a TRAF0 CZ-A, ktoré sa v bežne využívajú v technickej praxi.

Na obrázku 13 sú zobrazené namerané priebehy dynamickej viskozity rastlinných olejov. Na obrázku je viditeľné, že priebehy ich viskozít sú si podobné a vykazujú vyššiu viskozitu hlavne pri nízkych teplotách, najvyššia viskozita bola zmeraná u ryžového oleja, kde dosahoval pri teplote 11 °C viskozitu až 180 mPa.s. Približne okolo teploty 60 °C začínajú byť ich priebehy takmer totožné, čo nám značí patrné prekrytie teplotných kriviek.

Všeobecne môžeme zhodnotiť, že viskozita rastlinných olejov výrazne exponenciálne rastie pri teplotách nižších ako 20 °C.



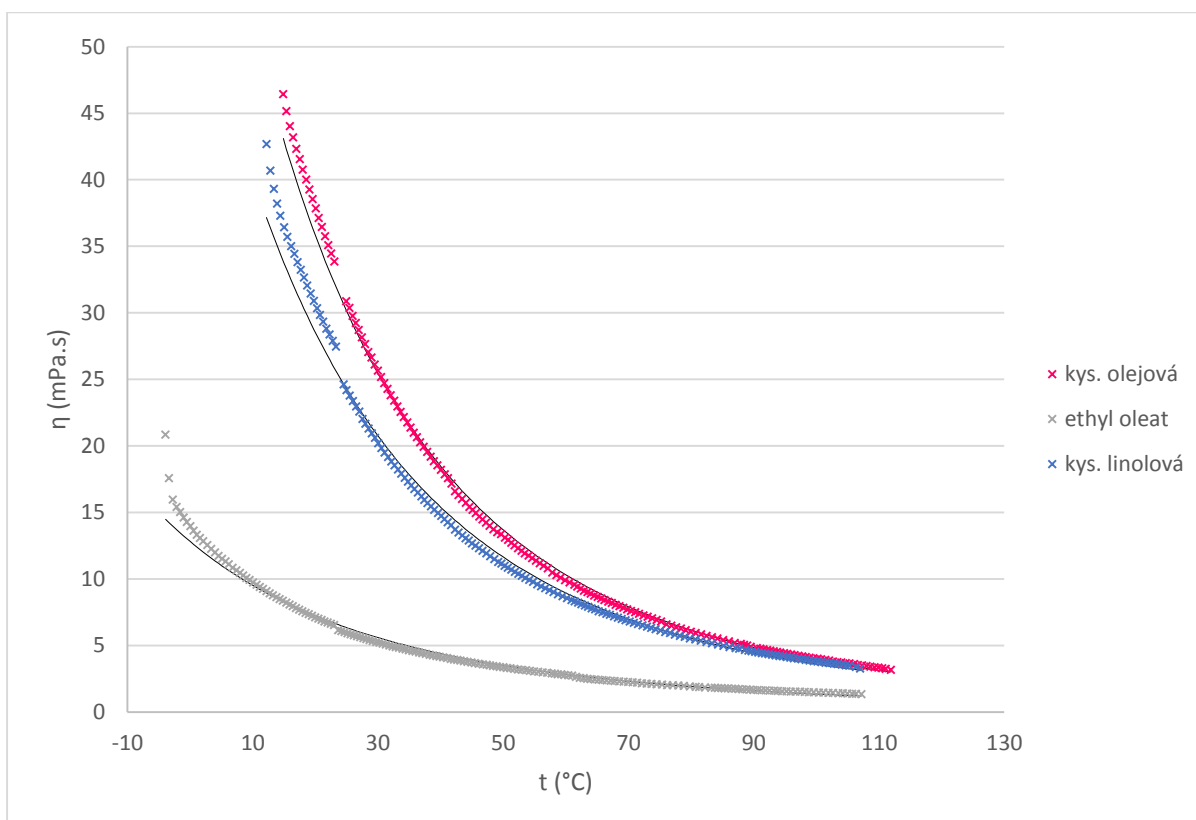
Obrázok 13: Závislosť dynamickej viskozity rastlinných olejov na teplote

Na obrázku 14 môžeme pozorovať priebehy dynamickej viskozity meraných mastných kyselín. Z grafu je zrejmé, že priebehy kyseliny olejovej a kyseliny linolovej sú si podobné a v teplotách nižších ako 50 °C sa ich viskozity vzájomne líšia maximálne o 5 mPa.s.

Väčší rozdiel viskozity, resp. odlišnosť viskozitnej krivky, je možné pozorovať u mastnej kyseliny ethyl oleát, u ktorej bola maximálna viskozita nameraná v teplote približne -4 °C, kedy doshovala dynamickú viskozitu približne 21 mPa.s. Ďalej je u nej možné pozorovať plynulejší priebeh s menším výkivom viskozity pri znižovaní teploty, resp. došlo k posunu prudkého nárastu viskozity až do okolia teploty 0 °C.

V rámci mastných kyselín môžeme zhodnotiť, že v rozmedzí teplôt od záporných hodnôt do približne 45 °C dosahovali podstatne nižšiu viskozitu ako rastlinné oleje a to až o približne 50 mPa.s u kyselín linolovej a olejovej a približne až o 75 mPa.S u ethyl oleátu.

Ethyl oleát preukázal najlepšie viskozitné vlastnosti, avšak jeho použitie v technickej praxi by bolo príliš nákladné.

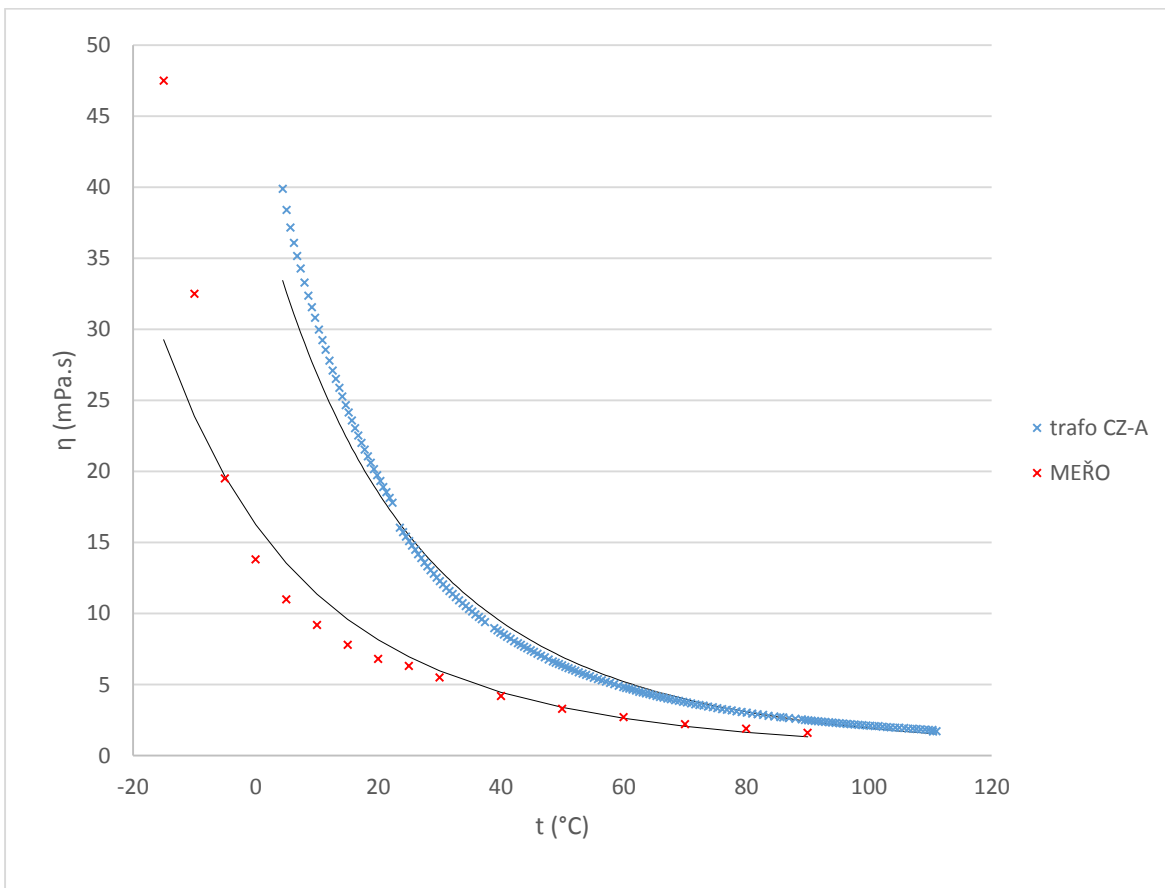


Obrázok 14: Závislosť dynamickej viskozity mastných kyselín na teplote



Na obrázku 15 sú zobrazené závislosti transformátorového oleja TRAF0 CZ-A a oleja MEŘO, ktorý sa používa ako prísada do biopalív. Vlastnosti týchto olejov boli merané z dôvodu, aby bolo možné ich porovnať s vlastnosťami potencionálnych alternatívnych technických kvapalín pozostávajúcich z rastlinných olejov a ich zložiek.

Je možné pozorovať správanie olejov vo veľmi širokých tepelných rozsahoch, pričom oboje kvapaliny vykazujú veľmi nízky bod tuhnutia. Táto vlastnosť je v technickej praxi veľmi vítaná. V záporných hodnotách teploty môžeme sledovať najvyššiu dosiahnutú viskozitu 50 mPa.s u oleja MEŘO, čo nám značí, že dosahujú lepšie výsledky viskozity ako rastlinné oleje.



Obrázok 15: Závislosť dynamickej viskozity oleja TRAF0 CZ-A a oleja MEŘO na teplote

Vlastnostiam bežne používaných olejov v technickej praxi sa najvic priblížili mastné kyseliny, obzvlášť pozitívne vlastnosti vykazoval ethyl oleát.

V okolí teploty okolia, teda teploty približne 23 °C je u každej krivky možné pozorovať mierny skok viskozity, čo je spôsobené zmenou prípravy vzorky. Do teploty okolia boli vzorky pripravované ochladením, pričom sa mohli mierne pozmeniť vlastnosti meraných kvapalín, najmä

u rastlinných olejov, čo bolo spôsobené rozložením kvapaliny na jednotlivé fázy. Taktiež bolo potrebné stretnúť sa s teplotami, pri ktorých bola viskozita meraná, avšak nie vždy to bolo možné, nakoľko sa teplota okolia v jednotlivé dni líšila. To spôsobilo absenciu dát pri niektorých teplotách.

Od teploty okolia do vysokých teplôt boli vzorky pripravovaný zahrievaním v sterilizátore a viskozita bola meraná až do ochladenia na teplotu okolia.

Na obrázku 16 sú zobrazené závislosti zlogaritmovaných hodnôt dynamickej viskozity na reciprokej teplote, ktoré sú preložené aproximovanou funkciou dynamickej viskozity.

Aproximácia rovnice v tvare vzťahu 24 prebiehala v programe MS Excel prostredníctvom funkcie Riešiteľ prostredníctvom metódy najmenších štvorcov, nakoľko táto metóda poskytovala najvhodnejší spôsob aproximácie nameraných dát.

Aproximácia prebiehala tak, že bola vypočítaná viskozita podľa vzťahu:

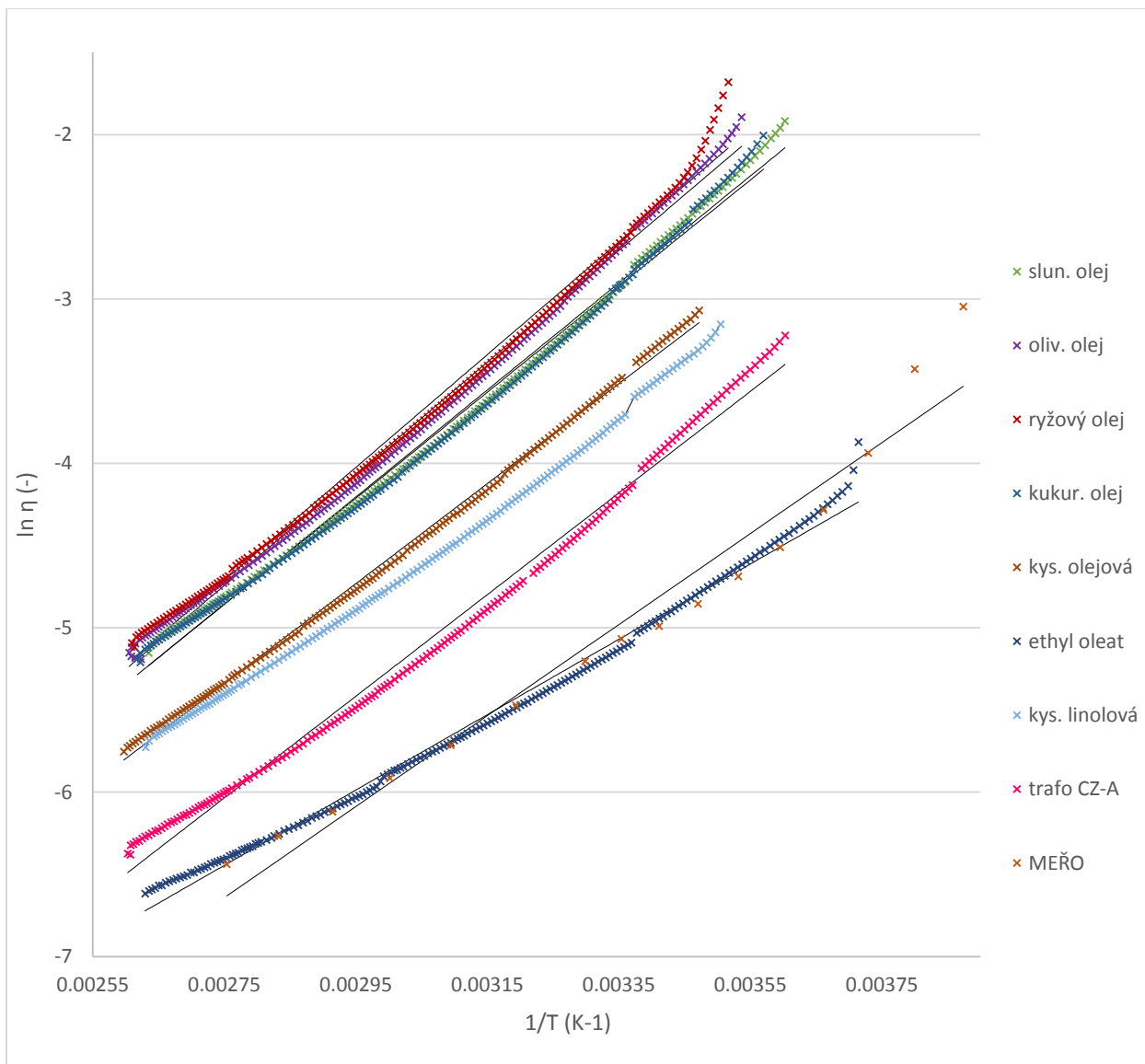
$$\ln \eta = A + \frac{B}{T}, \quad (24)$$

kde  $A$  a  $B$  predstavujú konštanty a  $T$  predstavuje termodynamickú teplotu.

Po vypočítaní aproximovanej zlogaritmovanej viskozity boli vypočítané kvadratické odchýlky medzi viskozitou nameranou a viskozitou vypočítanou. Zo všetkých kvadratických odchýlok sa urobil súčet a takéto dáta vstupovali do funkcie Riešiteľ, ktorá nám na základe týchto údajov vypočítala koeficienty  $A$  a  $B$ . Na základe ich poznania bol umožnený výpočet zlogaritmovanej viskozity pri každej hodnote termodynamickej teploty a takto vypočítané dáta boli ďalej vložené do závislostí, ktoré môžeme pozorovať na obrázku 16.

Farebné krivky predstavujú nameranú zlogaritmovanú viskozitu a každá krivka je preložená svojou aproximovanou funkciou.

Opäť je možné pozorovať, že namerané závislosti takmer presne kopírujú závislosti aproximované.



Obrázok 16: Závislosť logaritmu dynamickej viskozity na reciprokej teplote

## 4. ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberá meraním reologických vlastností alternatívnych elektroizolačných kvapalín. V teoretickej časti bola popísaná viskozita a spôsoby jej merania pomocou rôznych druhov viskozimetrov. Ďalšia kapitola sa zaoberala samotnými elektroizolačnými kvapalinami v podobe minerálnych olejov, rastlinných olejov a ich zložiek a syntetických izolačných kvapalín a boli zmienené ich základné elektrické aj neelektrické vlastnosti. V tejto časti bol tiež popísaný súčasný stav využitia alternatívnych elektroizolačných kvapalín v technickej praxi.

Praktická časť práce sa venovala meraniu vlastností vyššie zmienených kvapalín. Merané boli vlastnosti rastlinných olejov, konkrétne sa jednalo o slnečnicový olej, olivový olej, ryžový olej a kukuričný olej, niektorých ich zložiek v podobe mastných kyselín, ktoré predstavovala kyselina olejová, kyselina linolová a ethyl oleát, a oleje používané v technickej praxi, transformátorový olej TRAF0 CZ-A a metylester repkového oleja.

V laboratóriu bolo pripravené pracovisko pre meranie ich viskozity. Viskozita bola meraná pomocou vibračného viskozimetra SV-10 v širokom teplotnom rozsahu, ktorý rešpektoval bod tuhnutia a bod vzplanutia každej kvapaliny. Pre každé meranie bola kvapalina pripravená zahriatim alebo ochladením merane kvapaliny na požadovanú teplotu a meranie prebiehalo až do ustálenia sa na teplotu okolia. Nakoľko vibračný viskozimeter meral tzv. zdanlivú viskozitu, ktorá predstavovala násobok dynamickej viskozity s hustotou, bolo zároveň potrebné merať aj hustotu kvapalín.

Z tohto dôvodu bolo v laboratóriu pripravené aj pracovisko pre meranie hustoty, ktoré pozostávalo z kúpeľného termostatu na požadované teploty MEDINGEN a z analytických váh OHAUS. Hustota bola meraná v rozsahu teplôt podobných ako pri meraní viskozity a prebiehala metódou telieska z kremičitého skla ponoreného v meranej kvapaline. Výsledkom merania boli hodnoty hmotnosti telieska ponoreného do kvapaliny pri každej teplote, na základe čoho bola vypočítaná hodnota hustoty pri každej teplote. Ďalej bola prevedená aproximácia nameraných dát, výsledkom čoho bola hodnota súčiniteľa objemovej rozťažnosti, pomocou ktorej bol umožnený prepočet hustoty pre každú teplotu, pri ktorej bola meraná viskozita. Po vydelení zdanlivej hustoty vypočítanou hustotou boli získané hodnoty dynamickej viskozity a takto získané závislosti dynamickej viskozity boli aproximované funkciou.

Namerané závislosti viskozity a hustoty na teplote boli vložené do grafov a preložené ich aproximovanou funkciou. Na základe týchto grafických zobrazení bolo umožnené sledovanie rozdielov vlastností jednotlivých rastlinných olejov, ich zložiek a olejov využívaných v technickej praxi.

Na základe nameraných dát hustoty je možné zhodnotiť, že priebehy všetkých závislostí vykazovali linárny pokles s rastúcou teplotou. U rastlinných olejov bolo možné sledovať podobné priebehy závislosti hustoty na teplote, pričom bola dosiahnutá približne rovnaká hodnota hustoty v každej teplote. Najnižšie hodnoty hustoty boli sledované u transformátorového oleja TRAF0 CZ-A.

U priebehov kriviek viskozity bolo možné sledovať podobnosť navzájom medzi rastlinnými olejmi, nakoľko zastúpenie jednotlivých mastných kyselín je u nich podobné. Nižšie hodnoty viskozity boli viditeľné u mastných kyselín, obzvlášť u ethyl oleátu, ktorého hodnota viskozít sa približovala hodnotám viskozít olejov používaných v technickej praxi. Z tohto dôvodu, a tiež z hľadiska odolnosti voči oxidácii, by bolo vhodné masťnú kyselinu ethyl oleát využiť v technickej praxi. Avšak jej nevýhodou by boli vysoké finančné náklady. Minerálny transformátorový olej TRAF0 CZ-A vykazoval nízku a takmer nemennú viskozitu v celom priebehu, ako je to u technických olejov požadované. Olej TRAF0 CZ-A dokáže pracovať v širokom teplotnom rozsahu.

# Zoznam použitej literatúry

- [1] VISWANATH, D.S., GHOSH, T.K., PRASAD, D.H.L., DUTT, N.V.K.: *Viscosity of liquids*. Theory, Estimation, Experiment and Data [online], 2007. 667s. Springer, IBSN-13 978-1-4020-5482-2.
- [2] JANALÍK, J.: *Viskozita tekutin a její měření* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 66s. Skriptá. Dostupné na: <http://338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [3] JIRÁK, J., AUTRARA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M.: *Materiály a technická dokumentacie* [online]. Brno. 128s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky komunikačních technologií, skriptá.
- [4] NOUREDDINI, H., TEOH, B.C., CLEMENTS, D.L.: *Viscosities of Vegetable Oils and Fatty Acids* [online], 1992. 6.s. Dostupné na: [http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=chemeng\\_biomaterials](http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=chemeng_biomaterials)
- [5] SHAS, Z.H., TAHIR, Q.A.: *Dielectric Properties of Vegetable Oils* [online], 2011. 12s. Dostupné na: <http://banglajol.info/bd/index.php/JSR/article/view/7049/6306>
- [6] STOCKTON, D.P., BLAND, J.J.R.R., MCCLANHAN, T., WILSON, J., HARRIS, D.L., MCSHANE, P.: *Seed-oil based coolants for transformers* [online], 2009. 7s. Dostupné na: <http://sptransformersolutions.com/assetsúdocumentsúIEEEmag09.pdf>
- [7] ULRYCH, J., SVOBODA, M., POLANSKÝ, R., PIHERA, J.: *Dielectric analysis of vegetable and mineral oils*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [8] SITORUS, H.B.H., BEROUVAL, A., SETIABUDY, R., BISMO, S.: *Comparison of Streamers Characteristics in Jatropha Curcas Methyl Ester Oil and Mineral oil under Lighting Impulse Voltage*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.

- [9] CASSERLY, E., RASCO, J.M.: *Stray Gassing of Refinery Streams and Transformer Oil Produced from Them*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [10] VIERTEL, J., OHLSSON, K., SINGHA, S.: *Stidies of the Improvement of the Viscosity of Natural Ester Liquids*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [11] HOSIER, I.L., GU J., CHOTCHUANGCHUTCHAVEL, W., VAUHAN, A.S.: *Effect of viscosity and water content on the breakdown strength of vegetable oils*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [12] XIA, Y., REBOUD, J.L., ATTEN, P.: *Influence of viscosity and interface tension on water droplet injection in oil*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [13] TALHI, M., FLAZI, S., FOFANA, I.: *Impact of Local Overheating and Electrical Discharge on the Streaming Electrification of Transformer oil*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [14] GRADNIK, T., ČUČEK, B., KONČAN-GRADNIK, M.: *Temperature and chemical impact on determination of water content in dielectric liquids by capacitive moisture sensors*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [15] SUZUKI, T., KANO, T., KANETANI, A., HATADA, S., KURIHARA, F.: *Comparative Study of the Insulation Paper Aging in Palm Fatty Acid Ester(PFAE) and Mineral Oil*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [16] DUNG, N.V., LINHJELL, D., LUNDGAARD, L.E., HOIDALEN, H.K., UNGE, M.: *Effects of Spatial Restriction on Streamers in White Oil*, 2014. 4s. IEEE International Conference of Liquid Dielectrics.
- [17] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČR: *Situační a výhledová zpráva – olejiny*, Praha, 2015. 62. Dostupné na: [http://eagri.cz/public/web/449786/SVZ\\_Olejiny\\_12\\_2015.pdf](http://eagri.cz/public/web/449786/SVZ_Olejiny_12_2015.pdf)

- [18] MÍKA, P.: *Dynamická viskozita elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 40 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [19] MAKÓWKA, T.: *Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [20] SPOHNER, M.: *Diagnostika perspektivních elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [21] DIVÍLEK, P.: *Analýza reologických vlastností olejů a jejich složek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 73 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [22] JANUŠ, P.: *Nejistoty měření dynamické viskozity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 75 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [23] TOULOVÁ, J.: *Vlastnosti kapalin na bázi organických esterů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [24] BAMBASOVÁ, L.: *Změny obsahu mastných kyselin v rostlinných olejích během skladování*, Brno, 2007. 88s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí diplomové práce: Ing. Eva Vítová, Ph.D.
- [25] NĚMEČKOVÁ, L.: *Hodnocení stability vybraných rostlinných olejů*, Brno, 2010. 52s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Zemanová, Ph.D.



[26] Users Handbook, *SV-A Series*, Viscosimetry Revolution, 2009. Version 1.13E, 62s.  
Manual

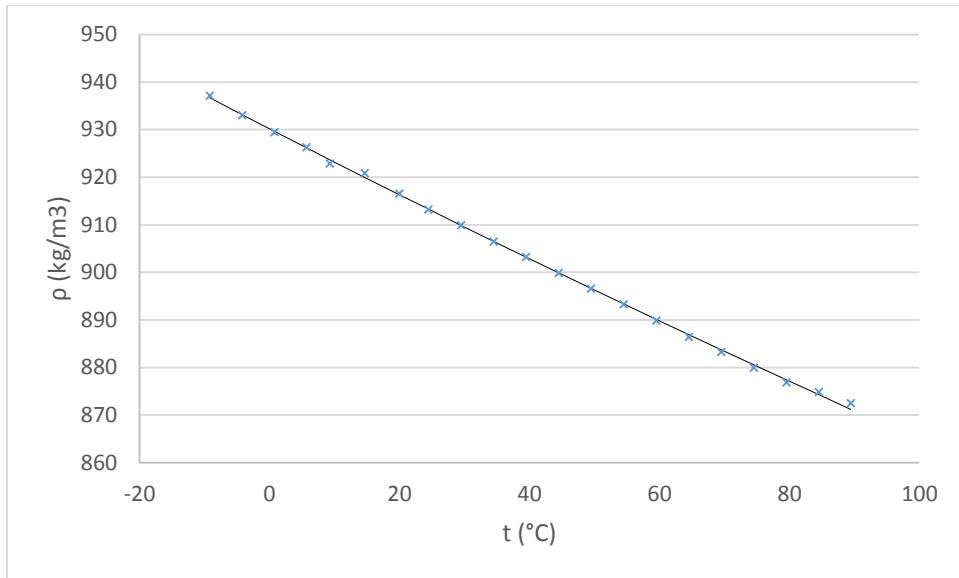
[27] *Explorer Balances Instruction Manual*, OHAUS Corporation, 2011, 145s.

# Prílohy

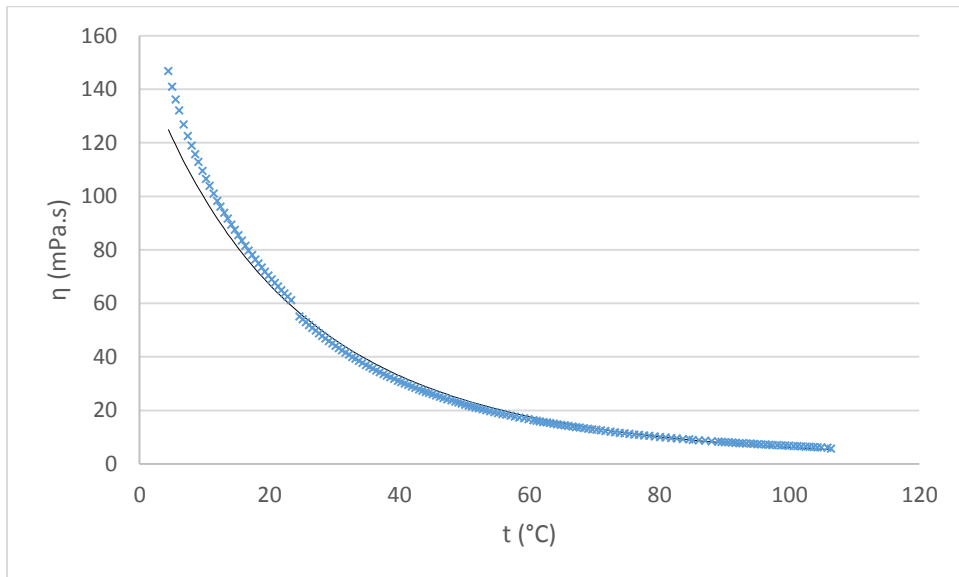
**Príloha A:** CD, ktoré obsahuje diplomovú prácu vo formáte pdf a namerané a vypočítané hodnoty viskozity a hustoty a ich grafy

**Príloha B:** Grafické závislosti hustoty a viskozity na teplote pre jednotlivé merané rastlinné oleje, mastné kyseliny a oleje používané v technickej praxi

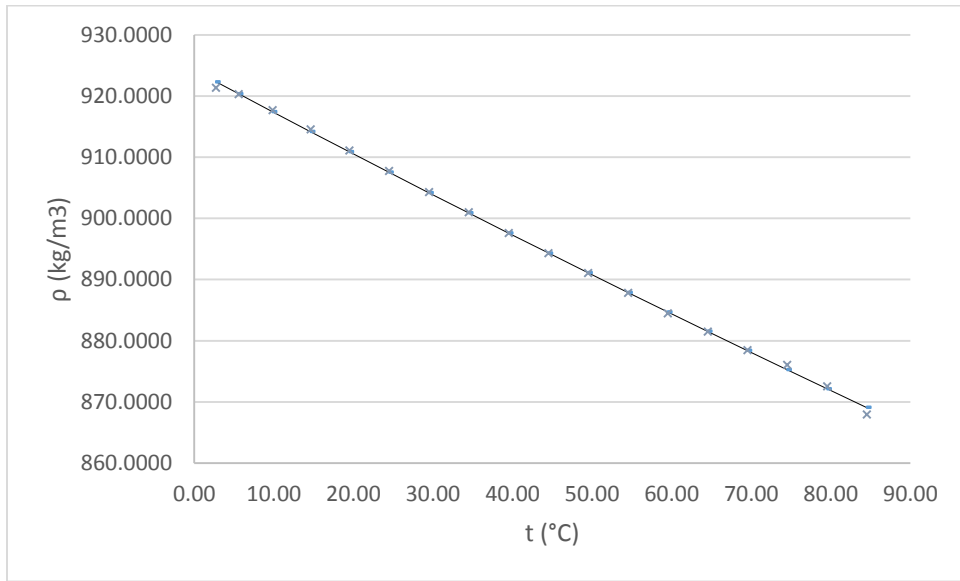
## Príloha B



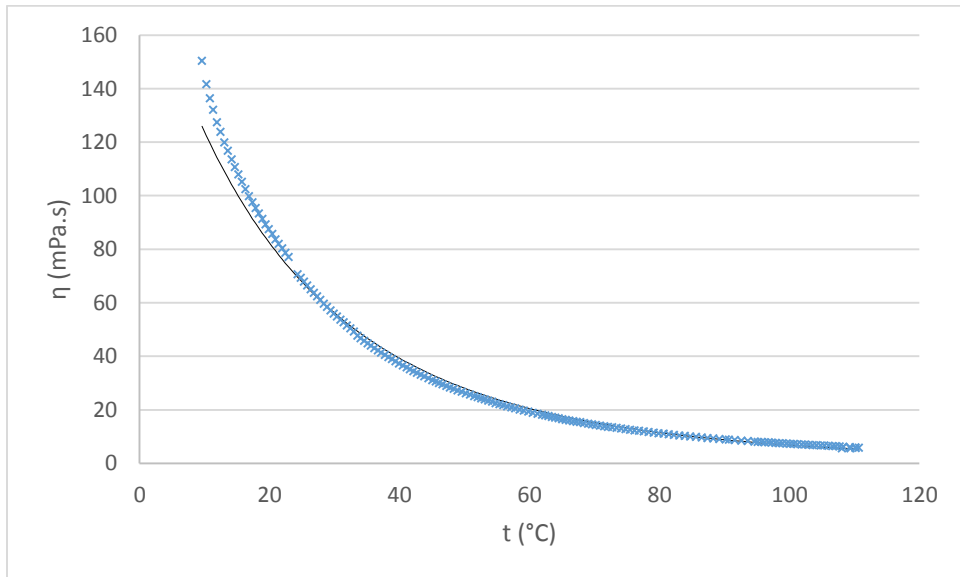
Obrázok 17: Závislosť hustoty na teplote pre slnečnicový olej



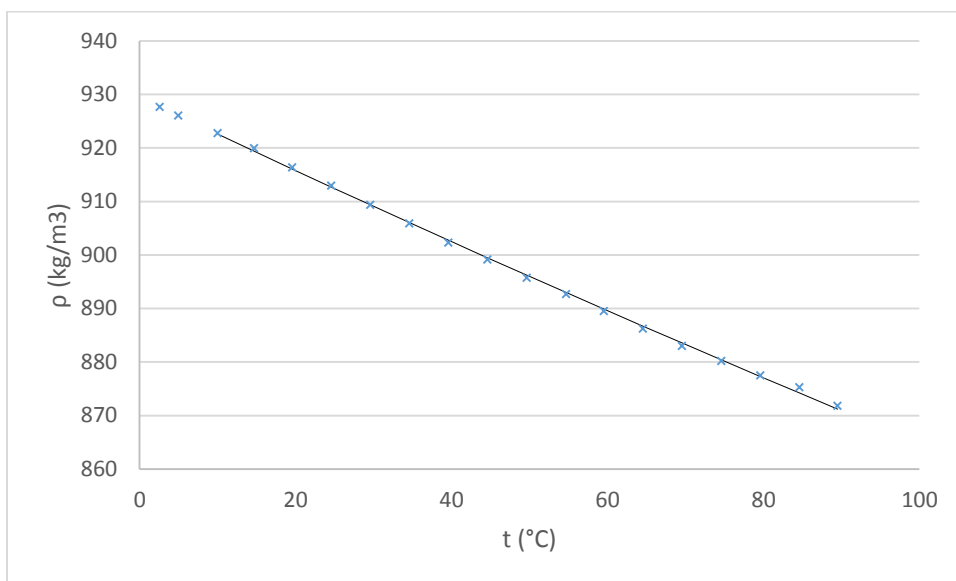
Obrázok 18: Závislosť viskozity na teplote pre slnečnicový olej



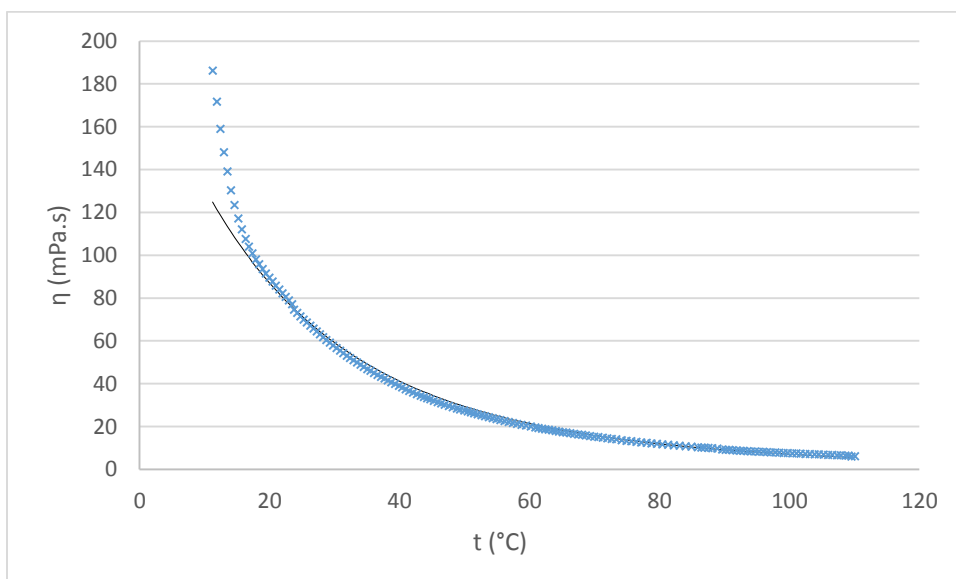
Obrázok 19: Závislosť hustoty na teplote pre olivový olej



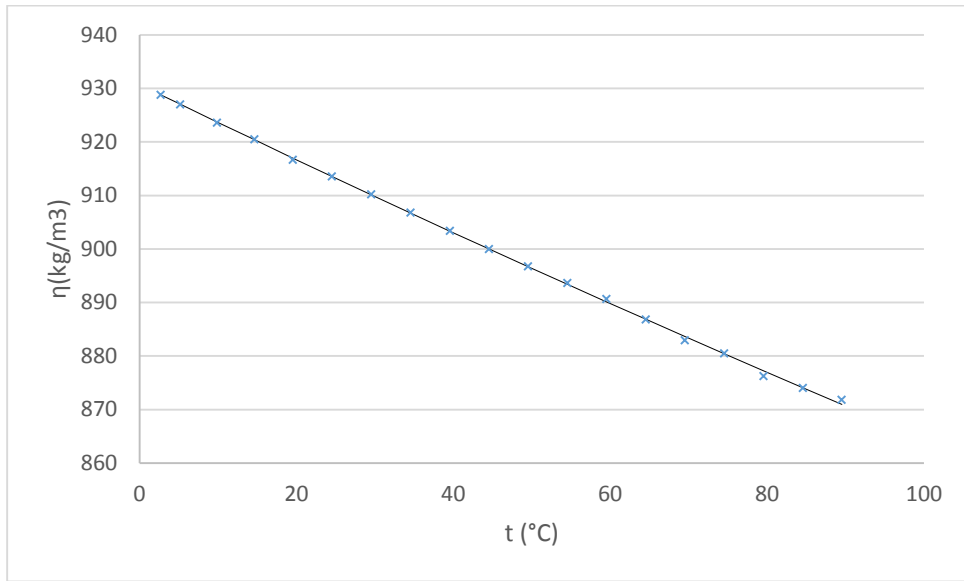
Obrázok 20: Závislosť viskozity na teplote pre olivový olej



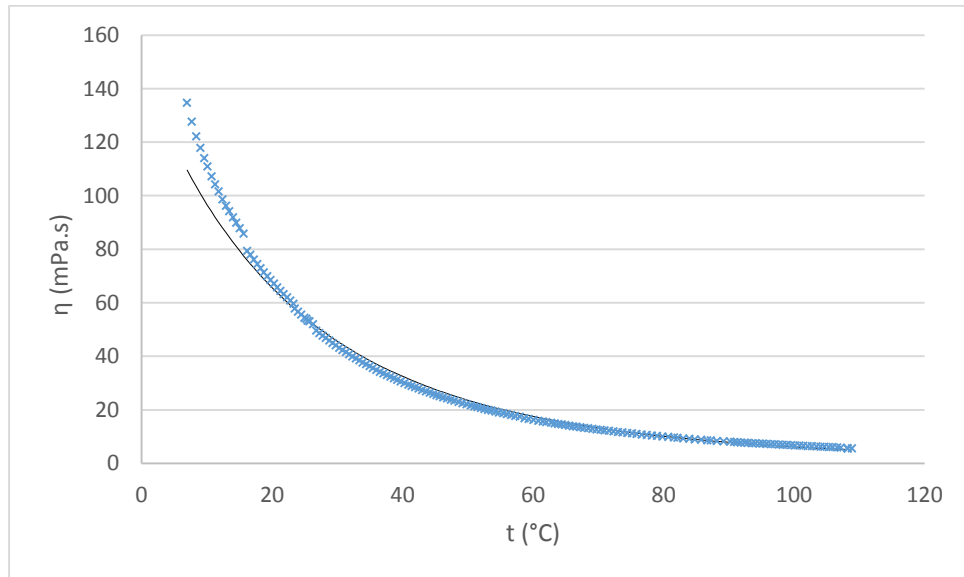
Obrázok 21: Závislosť hustoty na teplote pre ryžový olej



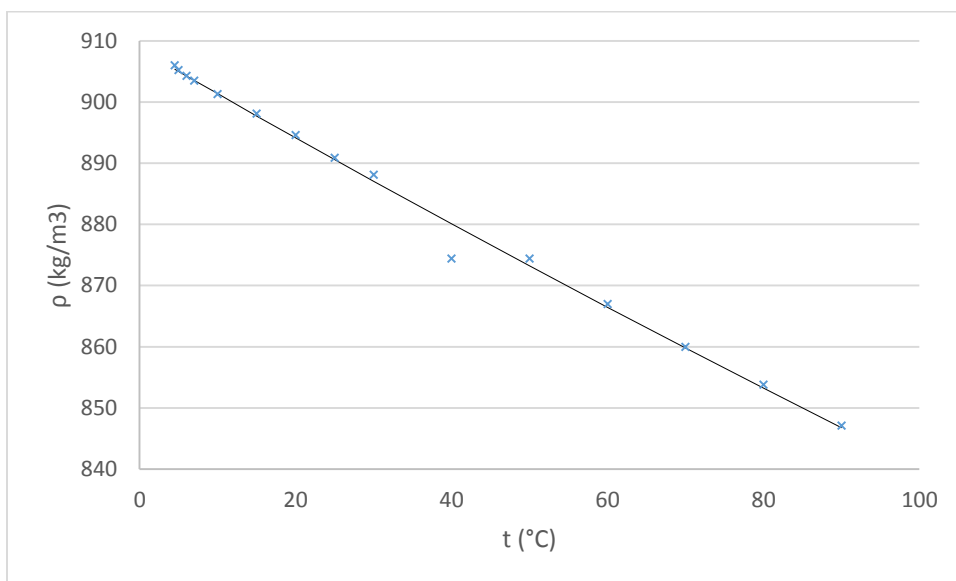
Obrázok 22: Závislosť viskozity na teplote pre ryžový olej



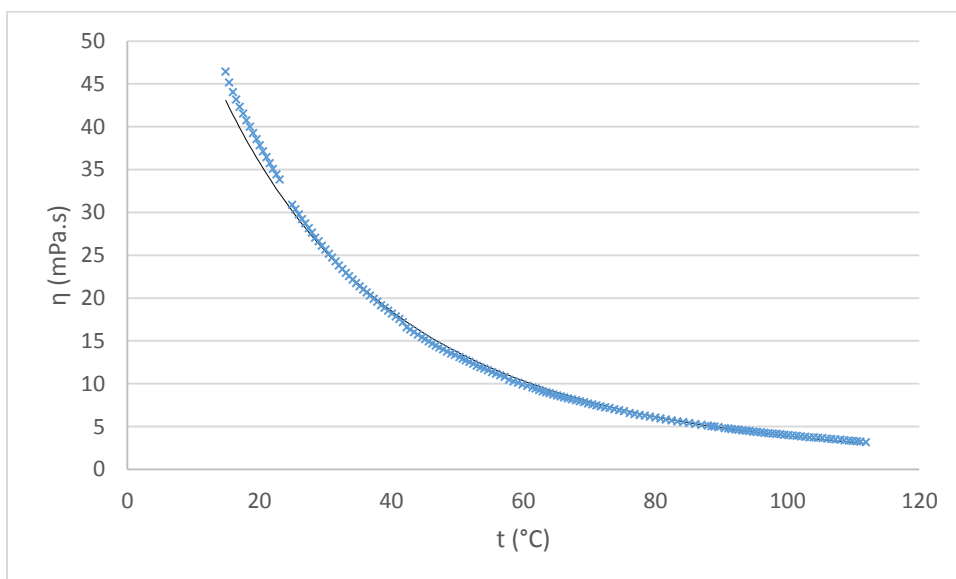
Obrázok 23: Závislosť hustoty na teplote pre kukuričný olej



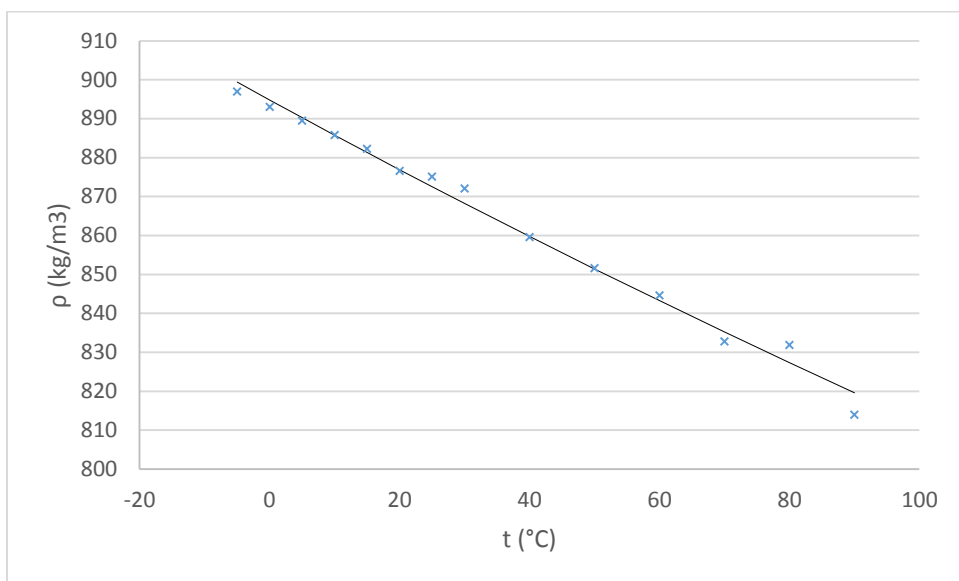
Obrázok 24: Závislosť viskozity na teplote pre kukuričný olej



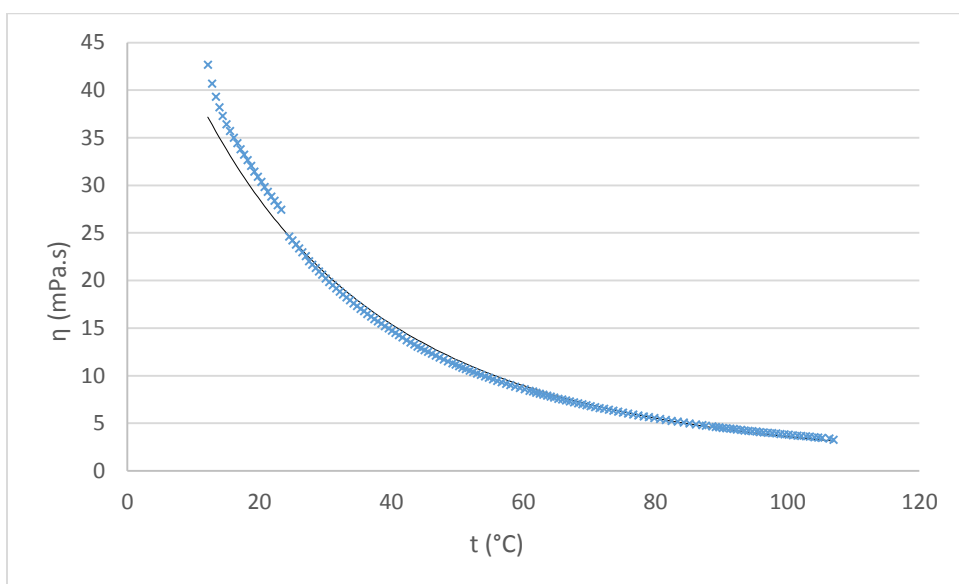
Obrázok 25: Závislosť hustoty na teplote pre kyselinu olejovú



Obrázok 26: Závislosť viskozity na teplote pre kyselinu olejovú

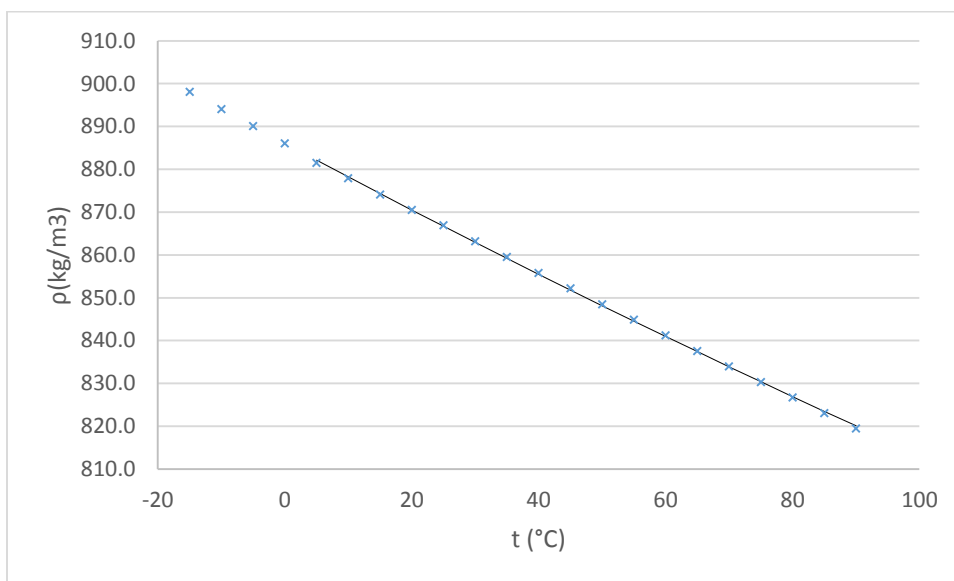


Obrázok 27: Závislosť hustoty na teplote pre kyselinu linolovú

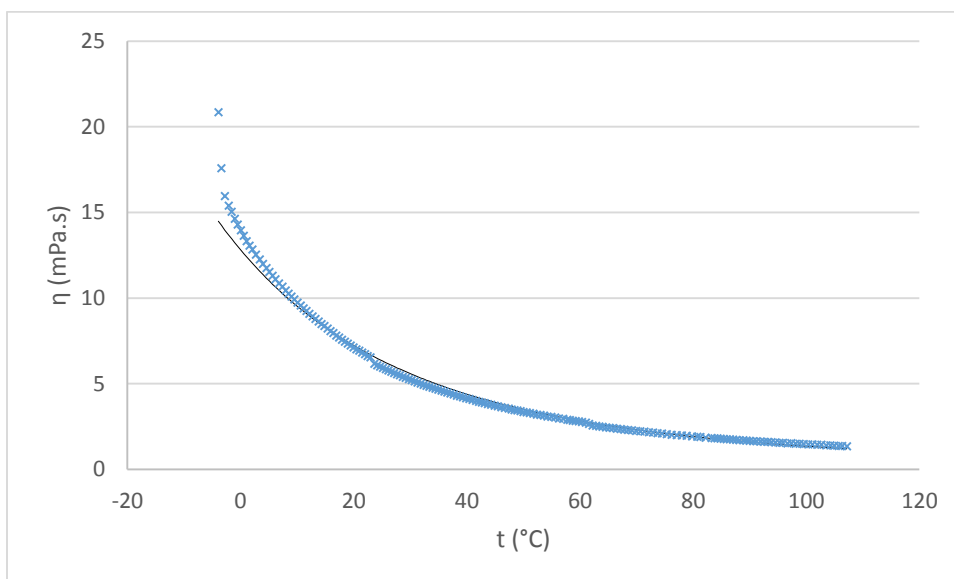


Obrázok 28: Závislosť viskozity na teplote pre kyselinu linolovú

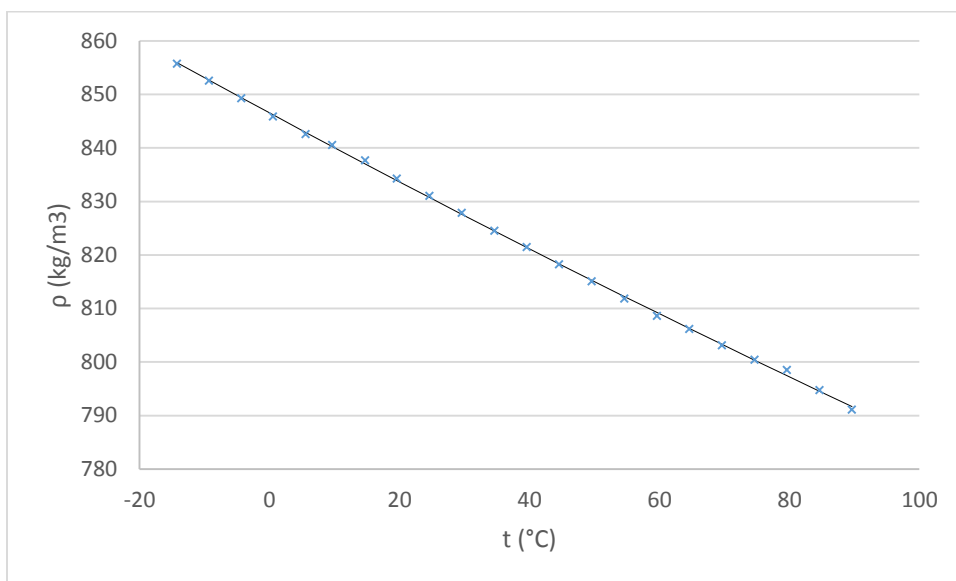




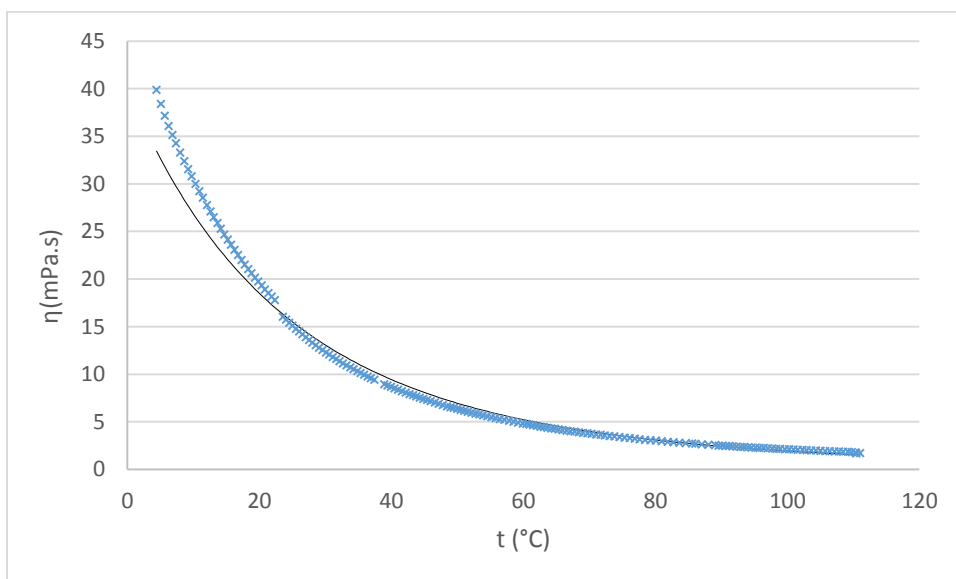
Obrázok 29: Závislosť hustoty na teplote pre ethyl oleát



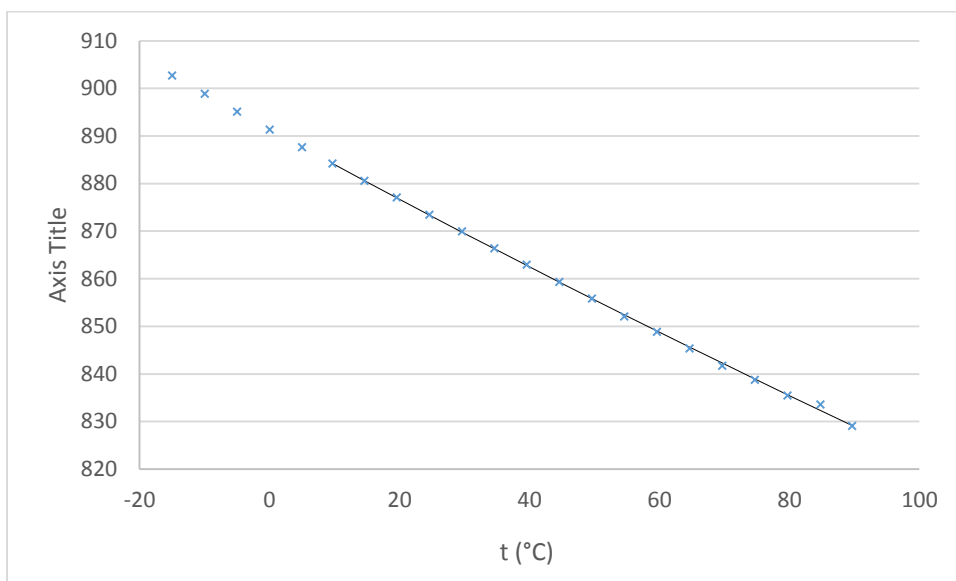
Obrázok 30: Závislosť viskozity na teplote pre ethyl oleát



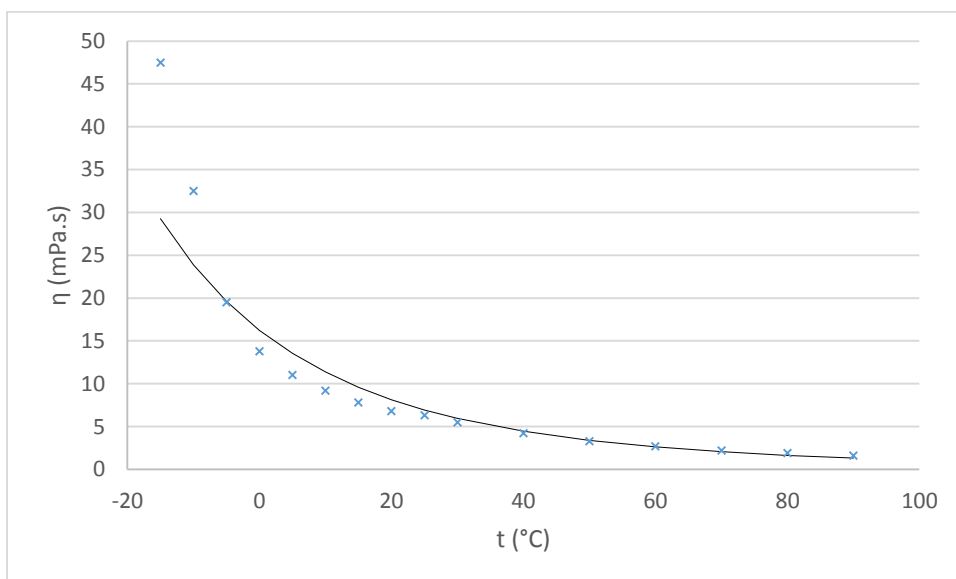
Obrázok 31: Závislosť hustoty na teplote pre TRAF0 CZ-A



Obrázok 32: Závislosť viskozity na teplote pre TRAF0 CZ-A



Obrázok 33: Závislosť hustoty na teplote pre MEŘO



Obrázok 34: Závislosť viskozity na teplote pre MEŘO