



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

# **DYNAMICKÁ VISKOZITA ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN**

**DYNAMIC VISCOSITY OF ELECTROINSULATING LIQUIDS**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**BC. PETR MÍKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**ING. MARTIN FRK, PH.D.**

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Petr Míka

**ID:** 75485

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

### Dynamická viskozita elektroizolačních kapalin

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled elektroizolačních olejů používaných v elektrotechnickém průmyslu, včetně novodobých, biologicky odbouratelných kapalin. Prostudujte fyzikální podstatu dynamické viskozity, uveďte přehled diagnostických metod pro její sledování a popište jejich princip.

Na různých vzorcích elektroizolačních a alternativních kapalin, případně jejich složek v podobě esterů mastných kyselin, proměřte teplotní závislosti viskozity a hustoty. Získané výsledky matematicky vyhodnoťte a fyzikálně interpretujte. Porovnejte hodnoty vybraných materiálových veličin běžně používaných elektroizolačních kapalin s vlastnostmi alternativních kapalin, které v praxi postupně nabývají na významu.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 30.5.2013

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*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:

Diplomová práce se zabývá perspektivními elektroizolačními kapalinami šetrnými k životnímu prostředí. V práci jsou uvedeny důležité vlastnosti v současnosti používaných elektroizolačních kapalin. Je popsána fyzikální podstata viskozity kapalin, její teplotní závislosti a jsou uvedeny způsoby jejich měření. Stejně tak je z fyzikálního hlediska popsána teplotní závislost hustoty kapalin. Bylo provedeno měření hustoty a teplotní závislosti dynamické viskozity zvolených rostlinných a minerálních olejů. Na základě měření byla určena aktivační energie těchto olejů. U vybraných vzorků bylo měření provedeno dvěma různými metodami.

## Abstract:

This work deals with perspective environmentally friendly electroinsulating liquids. Important properties of currently used electroinsulating liquids are listed. Physical nature of viscosity of liquids and its temperature dependence are described and methods of its measuring are listed. Also temperature dependence of density is described from physical point of view. Measurement of density and of temperature dependence of viscosity of chosen vegetable and mineral oils was performed. On the basis of this measurement was calculated the activation energy of these samples. Two methods of dynamic viscosity measurement were used for some samples.

## Klíčová slova:

Dynamická viskozita, teplotní závislost, rostlinné oleje, elektroizolační kapalina, aktivační energie

## Keywords:

Dynamic viscosity, temperature dependence, vegetable oils, electroinsulating liquids, activation energy

## Bibliografická citace díla:

MÍKA, P. *Dynamická viskozita elektroizolačních kapalin*. Brno, 2013. 40 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D. FEKT VUT v Brně

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2013

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce.

# OBSAH

|  |        |
|--|--------|
| Úvod .....   | - 6 -  |
| 1 Elektroizolační oleje .....  | - 9 -  |
| 1.1 Významné vlastnosti elektroizolačních kapalin .....                      | - 9 -  |
| 1.2 Klasifikace elektroizolačních kapalin .....                              | - 11 - |
| 1.3 Současný výzkum .....  | - 13 - |
| 2 Viskozita .....  | - 16 - |
| 2.1 Dynamická viskozita .....  | - 16 - |
| 2.2 Kinematická viskozita .....  | - 17 - |
| 2.3 Vliv teploty a tlaku na viskozitu .....                                  | - 17 - |
| 2.4 Nenewtonské kapaliny .....   | - 18 - |
| 2.4.1 Základní typy nenewtonských kapalin .....                              | - 19 - |
| 2.5 Způsoby měření viskozity kapalin .....                                   | - 20 - |
| 2.5.1 Průtokové viskozimetry .....   | - 20 - |
| 2.5.2 Tělískové viskozimetry .....   | - 23 - |
| 2.5.3 Rotační viskozimetry .....   | - 26 - |
| 2.5.4 Vibrační viskozimetry .....  | - 27 - |
| 2.6 Kalibrace viskozimetrů .....   | - 27 - |
| 3 Hustota .....  | - 27 - |
| 3.1 Vliv teploty a tlaku na hustotu kapaliny .....                           | - 28 - |
| 3.2 Metody měření hustoty kapalin .....                                      | - 29 - |
| 3.2.1 Hustoměr .....   | - 29 - |
| 3.2.2 Metoda ponorného tělíška .....   | - 30 - |
| 3.2.3 Kontinuální metody měření hustoty .....                                | - 31 - |
| 4 Vlastnosti vzorků rostlinných a minerálních olejů .....                    | - 33 - |
| 5 Vibrační viskozimetr SV-10 .....   | - 35 - |
| 5.1 Princip činnosti .....   | - 35 - |
| 5.2 Kalibrace .....  | - 36 - |
| 6 Měření teplotní závislosti viskozity rostlinných a minerálních olejů ..... | - 37 - |
| 6.1 Měření hustoty rostlinných a minerálních olejů .....                     | - 37 - |
| 6.2 Měření viskozity na vibračním viskozimetru .....                         | - 38 - |
| 6.3 Měření viskozity na Höpplerově viskozimetru .....                        | - 43 - |
| 7 Závěr .....  | - 46 - |
| 8 Použitá literatura .....   | - 48 - |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|         |   |      |
|---------|---|------|
| Obr.1:  | Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [12] .....   | 16 - |
| Obr.2:  | Závislost tečného napětí na gradientu rychlosti neneutonských kapalin [8] .....   | 18 - |
| Obr.3:  | Vliv toku na uspořádání částic v neneutonské kapalině [12].....   | 19 - |
| Obr.4:  | Závislost zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti strukturně viskózní kapaliny [12] ....  | 19 - |
| Obr.5:  | Časová závislost zdánlivé viskozity tixotropní kapaliny pro různé hodnoty gradientu rychlosti [12] .....  | 20 - |
| Obr.6:  | Ubbelohdeho viskozimetr [9].....  | 22 - |
| Obr.7:  | Přetlakový kapilární viskozimetr [9] .....  | 22 - |
| Obr.8:  | Schéma Stokesova viskozimetru [9] .....   | 24 - |
| Obr.9:  | Höpplerův viskozimetr [12] .....  | 25 - |
| Obr.10: | Reoviskozimetry s tlačnou kuličkou [9].....   | 25 - |
| Obr.11: | .....   | 26 - |
| Obr.12: | Druhy rotačních viskozimetrů [12].....  | 26 - |
| Obr.13: | Hustoměr [10].....  | 30 - |
| Obr.14: | Vibrační viskozimetr Vitrum SV-10 [14].....   | 35 - |
| Obr.15: | Měřicí aparatura vibračního viskozimetru [22] .....   | 36 - |
| Obr.16: | Váha Radwag XA 310/X [20] .....   | 37 - |
| Obr.17: | Změřené teplotní závislosti viskozity slunečnicového oleje, minerálního oleje Paramo Trafo N-A a metylesteru řepkového oleje .....                                    | 40 - |
| Obr.18: | Změřené teplotní závislosti viskozity olivového a sojového oleje a minerálního oleje Mogul Trafo CZ-A .....   | 40 - |
| Obr.19: | Teplotní závislosti viskozity vzorků s přímkami aproximujícími jejich průběh pro slunečnicový olej, minerální olej Paramo Trafo N-A a metylester řepkového oleje..... | 41 - |
| Obr.20: | Teplotní závislosti viskozity vzorků s přímkami aproximujícími jejich průběh pro olivový a sojový olej a minerální olej Mogul Trafo CZ-A.....                         | 41 - |
| Obr.21: | Vibrační viskozimetr Höppler KF 3.2 [15] .....  | 43 - |
| Obr.22: | Porovnání teplotních průběhů viskozity olivového a sojového oleje změřených vibračním a Höpplerovým viskozimetrem .....   | 45 - |
| Obr.23: | Porovnání teplotních průběhů viskozity slunečnicového oleje a minerálního oleje Paramo trafo N-A změřených vibračním a Höpplerovým viskozimetrem .....                | 45 - |

## SEZNAM TABULEK

|  |        |
|--|--------|
| Tab.1: Obsah mastných kyselin v slunečnicovém, sojovém a olivovém oleji podle Codex Alimentarius [3][4]..... | - 33 - |
| Tab.2: Vlastnosti metylesteru řepkového oleje.....   | - 34 - |
| Tab.3: Charakteristické vlastnosti použitých minerálních olejů [17][18].....                                 | - 34 - |
| Tab.4: Naměřené hodnoty hustoty jednotlivých vzorků a teploty vzorků při měření .....                        | - 38 - |
| Tab.5: Součinitelé teplotní objemové roztažnosti vzorků použité při výpočtech hustoty .....                  | - 39 - |
| Tab.6: Rovnice exponenciál odpovídajících teplotní závislostem viskozity měřených vzorků                     | - 42 - |
| Tab.7: Vypočtené hodnoty aktivačních energií vzorků. ....  | - 43 - |
| Tab.8: Vlastnosti viskozimetru Höppler KF 3.2.....   | - 43 - |
| Tab.9: Parametry kuliček použitých při měření viskozity .....  | - 44 - |

# Úvod

V současnosti nejrozšířenější druh elektroizolačních kapalin - tedy minerální oleje - přestává svými vlastnostmi splňovat požadavky moderní doby. A to především z hlediska možnosti poškození životního prostředí a odbouratelnosti. Zásoby ropy, ze které se minerální oleje vyrábějí, jsou navíc omezené. Z těchto důvodů vznikla potřeba hledat náhradu, která by měla nejen odpovídající elektrické a chemické parametry a nízkou cenu, ale navíc také byla malou zátěží pro životní prostředí, byla dobře odbouratelná a pokud možno pocházela z obnovitelných zdrojů. Jako vhodným kandidátem splňujícím předešlé požadavky se ukázaly být rostlinné oleje lisované ze semen různých rostlin, které jsou téměř nebo téměř zcela odbouratelné. Z toho důvodu byla vyvinuta výzkumná aktivita a vyšlo množství vědeckých článků zkoumajících vlastnosti těchto olejů a možnosti jejich použití jako alternativy k minerálním olejům.

Viskozita je významnou vlastností reálných kapalin. Jedná se materiálovou veličinu, na její hodnotu má tedy především vliv o jako kapalinu se jedná. Na hodnotu viskozity má ale také nezanedbatelný vliv teplota. Znalost viskozity je důležitá v mnoha odvětvích, například při výběru mazacích olejů, kdy nízká viskozita způsobuje vysoké ztráty oleje a vysoká má negativní vliv na mazací schopnost oleje. Viskozita elektroizolačních kapalin hraje důležitou roli především ve výkonových transformátorech, kde plní také funkci chladicího média. Nižší viskozita totiž umožňuje lepší proudění kapaliny, což zefektivňuje odvod tepla z transformátoru. Viskozita a její teplotní závislost hraje také významnou roli u kabelových olejů. U nich je důležité, aby při vysokých teplotách, při kterých dochází k impregnaci, byla viskozita nízká a olej dobře zatékal do dutin a pórů. Naopak při provozních teplotách je důležitá vysoká viskozita zabraňující stékání oleje z vyšších poloh do nižších.

Hustota elektroizolačních kapalin má v technické praxi menší význam než viskozita. Nicméně hustota elektroizolační kapaliny transformátoru má také svůj význam, neboť ovlivňuje celkovou hmotnost transformátoru. Při měření viskozity je znalost hustoty důležitá v případě, že přístroj měří dynamickou viskozitu a je potřeba znalost kinematické viskozity nebo naopak.



# 1 Elektroizolační oleje

V elektrotechnice se oleje používají v transformátorech, jako součást izolace kabelů a v kondenzátorech. Společným znakem olejů pro všechna tato využití je jejich funkce jakožto izolantu. Z toho také vyplývají požadavky na jejich vysoké průrazné napětí a vysokou rezistivitu. Jelikož transformátorové oleje mimo izolační funkce plní také funkci chladicí je u nich vyžadována nízká viskozita. Pro izolování kabelů je naopak potřeba elektroizolační oleje s viskozitou vysokou aby se zabránilo jeho stékání při šikmém uložení kabelů a následné vzniku vzduchových bublin, které mají negativní vliv na vlastnosti izolace. Z bezpečnostních důvodů je od elektroizolačních olejů vyžadována vysoká teplota vzplanutí. V poslední době získává na významu také ekologické hledisko, a proto se preferuje použití olejů s možností regenerace a s vysokou odbouratelností.

## 1.1 Významné vlastnosti elektroizolačních kapalin

### Průrazné napětí

Elektroizolační kapaliny si uchovávají svoje vlastnosti a jsou schopny plnit požadovanou funkci pouze do určité hodnoty přiloženého napětí. Tento bod se nazývá průrazné napětí, udává se v kV. Na velikost průrazného napětí má vliv několik faktorů. Nejvýznamnější jsou vzdálenost elektrod, tvar elektrického pole, obsah emulgované nebo vázané vody v elektroizolační kapalině, obsah plynů a nečistot a teplota pevných nečistot. V čistém oleji bez příměsí dochází k průrazu na základě nárazové ionizace, kdy vlivem rostoucího napětí roste množství iontů pohybujících se mezi elektrodami a které způsobují další ionizaci až do stavu, kdy dojde k průrazu. V praxi ale oleje obsahují malé množství nečistot. K průrazu pak dochází za nižšího napětí vytvořením vodivé cesty právě těmito nečistotami.

Zkoušky průrazného napětí se provádí na základě normy ČSN EN 60156 (Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda) pomocí dvou normalizovaných semisférických leštěných elektrod, které jsou uloženy v nádobě o objemu 350 ml až 600 ml ve vzdálenosti 2,5 mm od sebe. Nádoba je naplněna zkoušenou elektroizolační kapalinou. Během měření je izolant vystaven až šesti průrazům, které se provádí v pětiminutovém intervalu. Znalost hodnoty průrazného napětí je velmi důležitá, protože určuje napěťovou hladinu přístrojů, ve kterých může být daná elektroizolační kapalina použita[24][30].

### Vnitřní rezistivita

Jak už z názvu elektroizolačních kapalin vyplývá, jejich primární funkcí je od sebe vzájemně izolovat části přístroje pod napětím. Z tohoto důvodu je vysoká vnitřní rezistivita základním požadavkem pro schopnost vykonávat jejich funkci. Snížení vnitřní rezistivity v kapalných izolantech bývá způsobeno přítomností cizích částic nebo vody. Měření vnitřní rezistivity elektroizolační kapaliny v průběhu jejího stárnutí má velký význam, protože umožňuje určit, v jakém je kapalina v daném okamžiku stavu. Měření vnitřní rezistivity se provádí podle normy ČSN EN 60247. Měření se provádí za definované teploty stejnosměrným napětím o takové velikosti, aby byla kapalina namáhána 250 V/mm, pokud není pro danou kapalinu požadována jiná hodnota. Měření se provádí po dobu jedné minuty a vnitřní rezistivita určena

z konstanty cely a naměřených hodnot přiloženého napětí a proudu protékajícího kapalinou podle následujícího vzorce:

$$\rho = K \frac{U}{I} \quad (1)$$

kde  $\rho$  je vnitřní rezistivita,  $K$  je konstanta cely,  $U$  je velikost přiloženého napětí a  $I$  je velikost proudu protékajícího kapalinou[30].

### **Ztrátový činitel**

Hodnota ztrátového činitele je důležitá v aplikacích využívajících střídavý proud. V těchto aplikacích totiž popisuje míru dielektrických ztrát. Jejich příčinou jsou polarizační mechanismy v elektroizolační kapalině, které způsobují zpoždění fázoru elektrické indukce  $\vec{D}(t)$  a fázoru elektrického pole  $\vec{E}(t)$  o úhel  $\delta$ . Ztrátový činitel je definován jako tangens tohoto úhlu. Jeho hodnota závisí především na tom, zda se jedná o polární, nebo nepolární elektroizolační kapalinu a na množství a vlastnostech příměsí a nečistot.

Důležitá je také teplota dielektrika a frekvence přiloženého elektrického pole. Velmi nízkých hodnot ztrátového činitele dosahují čisté a nepolární elektroizolační kapaliny. V nich dochází pouze k elektronové polarizaci, kterou je za běžných podmínek možno považovat za bezetrátovou. V kapalinách s příměsemi nebo v polárních kapalinách se projevují i jiné polarizační mechanismy, při kterých již dochází ke ztrátám[22][24].

### **Přítomnost vody v oleji**

Přítomnost vody v oleji je jednoznačně negativní jev. Snižuje elektrickou pevnost oleje, urychluje oxidaci, a může způsobit rozklad aditiv, podpořit růst mikroorganismů a způsobovat korozi kovových částí systému a zhoršení mazacích schopností. Voda se do oleje může dostat buď ze vzduchu, nebo jako produkt polykondenzačních reakcí probíhajících v oleji, ke kterým dochází v průběhu stárnutí. Proti přítomnosti vody v oleji se používají deemulgační přísady, které zabraňují vzniku emulze oleje a vody. Míra rozpustitelnosti vody v oleji se udává v miligramech vody na kilogram oleje. Maximální rozpustitelné množství se nazývá saturační hladina.

Měření množství vody v oleji se provádí podle nory ČSN EN 60814. Zkušební metodou je automatická coulometrická titrace Karla Fishera. Důležité je, aby byla teplota oleje při zkoušce stejná jako teplota při odběru zkoumaného vzorku[7].

### **Číslo kyselosti (neutralizační číslo)**

Příčinou kyselosti olejů bývají kyselina sírová, kyselina siřičitá, naftenické kyseliny, nebo sulfokyseliny, které se v oleji objevují vinou nedokonalé rafinace. Jelikož tyto kyseliny mají korozivní účinky a také degradační účinky na izolanty, je jejich přítomnost nežádoucí. U nových transformátorových olejů indikuje číslo kyselosti stupeň rafinace. Jelikož v průběhu stárnutí množství kyselin v oleji roste, podává informaci také o provozním zestárnutí oleje.

Číslo kyselosti se určuje podle normy ČSN EN 62021-1 automatickou potenciometrickou titrací, nebo podle normy ČSN EN 62021-2 kolometrickou titrací. Číslo kyselosti se udává v mg KOH /g[7][24].

### **Bod vzplanutí**

Bod vzplanutí je důležitý údaj elektroizolačních kapalin především z pohledu bezpečnosti. Aby došlo k hoření, musí elektroizolační kapalina vytvořit se vzduchem směs v určitém poměru v přítomnosti zdroje tepla, který je iniciátorem hoření. Podle bodu vzplanutí je klasifikována nebezpečnost látek. Bod vzplanutí je teplota, při které dojde po přiblížení plamene ke vznícení a následnému pohasnutí par kapaliny. Bod vzplanutí se určuje na základě normy ČSN EN ISO 2592 [6][1].

### **Bod tuhnutí**

Jeho znalost má význam, má-li být elektroizolační kapalina vystavena nízkým teplotám. S klesající teplotou roste viskozita kapaliny a tím klesá její schopnost odvádět teplo. Bod tuhnutí je teplota, při které elektroizolační kapalina přestává téct. Určuje se postupným ochlazováním kapaliny a průběžným kontrolováním, jestli při dané teplotě stále teče[6].

### **Barva**

Míru zestárnutí oleje lze určit také podle barvy - v průběhu stárnutí totiž oleje tmavnou. Barva oleje se nejčastěji mění následkem polymeračních a polykondenzačních reakcí, jejichž produktem jsou látky v oleji rozpustné. Barvu je možno hodnotit buď subjektivně porovnáním s barevným standardem, nebo přesněji porovnáním míry absorpce v kolorimetru[30].

### **Viskozita**

Viskozita elektroizolačních kapalin má význam především, pokud kapalina plní také funkci odvádění tepla (např. od vinutí transformátoru). S rostoucí viskozitou kapaliny totiž klesá množství tepla odvedeného cirkulací. Na viskozitu má vliv molekulová hmotnost látek obsažených v kapalině a také přítomnost některých příměsí. Viskozitu zvyšují pryskyřice nebo asfaltové látky, snižují ji naopak například alkyany.

## **1.2 Klasifikace elektroizolačních kapalin**

### **Minerální oleje**

V současnosti nejrozšířenějšími elektrotechnickými oleji jsou minerální oleje. Získávají se destilací z ropy a jejich vlastnosti se dále vylepšují rafinací. Při ní se z oleje odstraňují některé nežádoucí látky obsahující kyslík. Nečistoty se také odstraňují aktivní hlinkou a jejím odfiltrováním, ochlazením a následným vykrytalizováním parafinů nebo odplyněním. Z chemického hlediska jsou minerální oleje složitou směsí uhlovodíků, jejichž poměry určují vlastnosti daného oleje. Například vyšší přítomnost parafinických složek má za následek vyšší viskozitu oleje a nižší hodnotu ztrátového činitele, vyšší obsah benzenových složek má za následek nižší hodnotu viskozity[13].

Podle chemického složení se minerální oleje dělí na:

- oleje parafinické (alkalické)

obecný vzorec:  $C_nH_{2n+n}$

obsahují větší podíl parafinových uhlovodíků s lineárními molekulami

mají plochou viskozitní křivku, vyšší viskozitu a odolnost vůči oxidaci a vysoké body tuhnutí a vzplanutí

- oleje naftenické (cyklanické)

obecný vzorec:  $C_nH_{2n}$

molekuly uhlovodíků jsou tvořeny naftenovým jádrem

mají strmou viskozitní křivku, nižší viskozitu a odolnost vůči oxidaci a nižší body tuhnutí a vzplanutí

- oleje aromatické

## Syntetické oleje

Oproti minerálním olejům se syntetické vyznačují lepšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi, především vyšší teplotou vzplanutí a odolností vůči oxidaci. Naopak nevýhodou je jejich vyšší cena. Syntetické oleje se vyrábí z nízkomolekulárních uhlovodíků. Díky způsobu jejich výroby lze oproti minerálním olejům lépe ovlivňovat jejich chemické složení a díky tomu nejsou tak komplexní směsi uhlovodíků. Z tohoto důvodu také existuje z chemického hlediska velké množství různých druhů syntetických olejů. Dále jsou uvedeny ty nejběžnější z nich[13][21].

### Polybuteny

Vznikají polymerací butenů a jsou směsí jejich polymerů. Jsou to nepolární kapaliny, které mají výborné chemické a fyzikální vlastnosti. Vyznačují se odolností vůči vyšším teplotám a oxidaci.

### Silikonové kapaliny

Jsou to anorganické polymery vyznačující se chemickou skupinou Si=O. Jejich velkou předností je ekologická nezávadnost. Typickými vlastnostmi jsou jen málo frekvenčně závislý ztrátový činitel a permitivita v rozsahu  $10^2 \div 10^8$  Hz a tepelná stálost v širokém rozsahu teplot. Výhodou je, že nezpůsobují korozi kovů, ani nejsou agresivní vůči organickým izolantům. Jedná se o bezbarvé a hydrofobní kapaliny. Nejpopulárnějším silikonem je polydimetylsiloxan (PDMS) vyráběný ze silikonu a metylchloridu.

### Chlorované uhlovodíky

Vznikají z uhlovodíků náhradou vodíkového atomu atomem chloru. Výhodou je nevířivost a nehořlavost, nicméně jejich použití v současné době zabraňuje jejich ekologická závadnost.

### Fluorované kapaliny

jsou to deriváty uhlovodíků, aminů a esterů, ve kterých jsou atomy vodíku nahrazeny atomy fluoru. Jsou chemicky velmi stabilní. Mají velmi dobré elektrické vlastnosti, proto se využívají například jako náplně transformátorů nebo výkonových spínačů.

### Organické estery

Vznikají reakcí kyselin a alkoholů s vodou. Vyznačují se dobrou teplotní stabilitou, nízkým ztrátovým činitelem a odolností vůči plynům.

## Rostlinné oleje

Jejich velkou předností je téměř úplná biologická odbouratelnost. Z toho důvodu a z důvodu nižších výrobních nákladů oproti syntetickým olejům mají potenciál stát se náhradou minerálních olejů. Nevýhodami, které zatím brání širšímu využití rostlinných olejů, jsou horší vlastnosti za nízkých teplot, schopnost absorbovat vodu a především nižší odolnost vůči oxidaci. Rostlinné oleje se vyrábějí lisováním semen některých rostlin, nejčastěji z řepky, kukuřice, sóji, skočce obecného (ricin), bavlny nebo lnu. Z chemického hlediska představují směsi esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin[21][30].

### 1.3 Současný výzkum

Současná technická úroveň ohledně rostlinných olejů ještě není taková, aby bylo možné jejich široké průmyslové využití. Současný výzkum je zaměřen na porovnávání jejich vlastností s vlastnostmi minerálních olejů, což je skupina, kterou by rostlinné oleje měly v budoucnu nahradit.

Nejdůležitější elektrické a chemické vlastnosti skupiny rostlinných olejů byly porovnány s vlastnostmi minerálních olejů v[1]. Zkoumané rostlinné oleje byly řepkový olej, slunečnicový olej, sunola (mono-nenasycený slunečnicový olej s vysokým obsahem mastných kyselin), extra panenský olivový olej, olej z hroznových jader, arašídový olej, sojový olej a kukuřičný olej. Pro demonstraci možnosti zlepšení vlastností olejů byl zkoumán řepkový olej jak přírodní, tak fyzikálně a chemicky upravený. Měření vlastností olejů byly průrazné napětí, ztrátový činitel, číslo kyselosti a mezipovrchové napětí. Z výsledku vyplývá, že většina rostlinných olejů vykazuje nižší průrazné napětí než minerální olej, výjimkou byl olej z hroznových jader. Z porovnání výsledků přírodního a upraveného řepkového oleje vyplývá, že vhodnou úpravou lze tuto charakteristiku oleje znatelně vylepšit. Ztrátový činitel všech měřených rostlinných olejů byl vyšší než ztrátový činitel minerálního oleje. U olivového oleje a oleje z hroznových jader byla hodnota ztrátového činitele vyšší drasticky, naopak sunola vykazovala ztrátový činitel srovnatelný s minerálním olejem. Negativní vliv na ztrátový činitel má vysoký obsah kontaminantů, proto je možné vhodnou úpravou docílit snížení ztrátového činitele vhodnou úpravou oleje. Toto bylo potvrzeno výsledky měření přírodního a upraveného řepkového oleje, který měl ztrátový činitel nejen významně nižší než přírodní, ale dokonce i nižší než minerální olej. Číslo kyselosti všech rostlinných olejů bylo vyšší oproti minerálnímu oleji, což poukazuje na horší chemickou a oxidační stabilitu. Vyšší číslo kyselosti je důsledkem přítomnosti kyselých látek v oleji a může být sníženo jejich odstraněním nebo neutralizací. Díky tomu také upravený řepkový olej měl výrazně nižší číslo kyselosti oproti přírodnímu. Naměřené mezipovrchové napětí rostlinných olejů bylo nižší než mezipovrchové napětí minerálního oleje. Nižší hodnota mezipovrchového napětí znamená vyšší mísitelnost oleje s vodní fází a tím i vyšší náchylnost k tvorbě rozpustných polárních produktů. To může vést ke snadnému zhoršení izolační kapaliny v průběhu činnosti transformátoru. Vlivem úprav došlo u řepkového oleje k určitému zvýšení mezipovrchového napětí. Neupravené rostlinné oleje tedy mají horší elektrické i chemické vlastnosti než minerální olej. Největším nedostatkem je nízké mezipovrchové napětí. Nicméně jejich vhodnou úpravou je možné dosáhnout znatelného vylepšení těchto parametrů.

Článek [2] se zabývá nově vyvinutou elektroizolační kapalinou tvořenou směsí založenou na rostlinném oleji a její využitelností v transformátorech pro nízké a střední napětí. Požadavky na směs byly její co nejjednodušší (a tedy nejlevnější) složení a vlastnosti, které by

umožňovaly její použití v transformátorech s chladicím režimem ONAN (Oil Natural - Air Natural), který je v NN a SN transformátorech nejběžnější. Finální složení této směsi je řepkový olej a etyl-hexanový ester v poměru 1:1 a 0,3% inhibitoru di-tertio-butyl-para-cresolu (DPBC). Estery mastných kyselin byly vytvořeny transesterifikací triglyceridu řepkového oleje s 2-etyl-1-hexanolem. Směs má nižší viskozitu a bod tuhnutí než ostatní přírodní estery. Na druhou stranu má velmi nižší bod vzplanutí než přírodní i syntetické estery a díky tomu nemůže být (stejně jako minerální olej) klasifikován jako nehořlavá kapalina. Hustota je podobná minerálnímu oleji, ale číslo kyselosti je vyšší. Byly provedeny testy kompatibility směsi s látkami běžně přítomnými v transformátorech. Směs esterů byla shledána kompatibilní s většinou laků, nátěrů smaltovacích materiálů používaných jako ochrana nebo izolace kovů. Neovlivňovala kovy (především nezpůsobovala korozi mědi ani stříbra) a stejně tak byla kompatibilní s většinou polymerů, elastomerů a pryskyřic. Absorpce směsi izolačními materiály (lepenka, vrstvené desky, vrstvené dřevo) byla mírně lepší než u syntetických esterů používaných v transformátorech. Byl proveden test zrychleného stárnutí (120 °C, 7 dní) zkoumané směsi a minerálního oleje v přítomnosti látek běžných v transformátoru a výsledky kapalin i izolačních materiálů byly pro směs i minerální olej srovnatelné. Dále byly směsi naplněny transformátory s chladicím režimem ONAN a výkonem od 50 do 400 kVA, které byly použity v reálných podmínkách v distribuční síti. Vlastnosti směsi esterů v těchto transformátorech byly sledovány po dobu 24 měsíců. Po celou tuto dobu bylo průrazné napětí směsi vyšší než 60 kV a ztrátový činitel nepřekročil hodnotu 0,2, nebyly zaznamenány ani znepokojující trendy vývoje těchto parametrů. Obsah vody byl oproti minerálnímu oleji vyšší, nicméně stále pod hodnotou saturace (>1000 ppm). Nebyl zaznamenán žádný vzrůst viskozity, číslo kyselosti nepřekročilo 0,2 mgKOH/g a obsah volného alkoholu byl pod hranicí 0,50%. Zkoumaná směs esterů se tedy ukázala být použitelná jako izolační a chladicí kapalina v NN a SN transformátorech.

Měřením nejdůležitějších elektroizolačních vlastností přírodních esterů se zabývá [16]. Porovnávány jsou vlastnosti přírodního řepkového oleje zbaveného nečistot, vysoce čištěný minerální olej ITO 100 s příměsí 2,6-di-terc-butyl-metylfenol a silikonový olej Lukosiol M200. Zkoumané vlastnosti byly šíření částečných výbojů, elektrická pevnost, dielektrické ztráty a permitivita. Uvedené jsou výsledky měření šíření částečných výbojů pro konfiguraci Rogowského elektroda - transformátorový papír s mezielektrodovou vzdáleností 0 mm. Měření bylo provedeno přímou metodou se sériovým zapojením měřené impedance a vazebního kondenzátoru podle standardu IEC60270. V řepkovém oleji se vyskytly částečné výboje již při napětí 10kV, nicméně maximální velikost výbojů nepřesáhla 100pC a až po horní hranici měření 30kV nevykazovala žádnou závislost na napětí. Oproti tomu v minerálním oleji se výboje vyskytly až při napětí 18kV, ale maximální velikost výbojů vykazovala téměř až lineární závislost na přiloženém napětí. Elektrická pevnost byla měřena v nádobě testovacího zařízení tak aby bylo minimalizováno mísení oleje se vzduchem. Vzdálenost měřících elektrod byla nastavena na hodnoty v intervalu 0,3mm až 3mm. Výsledky všech vzorků byly srovnatelné a nebylo možné jednoznačně určit, který vzorek byl z hlediska elektrické pevnosti lepší a který horší. Cílem měření ztrátového činitele a relativní permitivity bylo určit jejich závislost na teplotě a přiloženém napětí. Z výsledků vyplývá, že závislost permitivity všech vzorků na napětí je nevýznamná. S rostoucí teplotou permitivita všech vzorků rovnoměrně klesala. Nejvyšší permitivity dosáhl řepkový olej ( $\epsilon_r = 3,2$  při 25°C) což je výhodné pro kombinovanou izolaci papír-olej z důvodu blízkosti k permitivitě papíru ( $\epsilon_r = 4$ ). Největší nevýhodou přírodního oleje byla výrazná teplotní závislost a vysoká hodnota ztrátového činitele při vyšších než provozních teplotách. V tomto ohledu nejlepší výsledky vykázal silikonový olej s velmi nízkým ztrátovým činitelem i jeho závislostí na teplotě.

Výsledky experimentálního šetření elektrické pevnosti izolace složené z elementů z impregnované celulózy a oleje se zabývá[31]. Porovnány byly výsledky pro olej na rostlinné bázi (dále VBO = vegetable based oil) a minerální olej. Izolace byla zatěžována stejnosměrným a impulzním napětím. Vyšetřovány byly tři druhy průrazu: přes olejem zaplněný prostor, na rozhraní lepenka-olej (plazivý průraz) a bodový průraz papírové izolace. Jako reference byly vybrány minerální olej Nynas Nytro Lyra X a komerčně dostupný olej na rostlinné bázi vyrobený z olejů jedlých semen s příměsí látek potravinářské čistoty zlepšujících vlastnosti. Před měřením elektrické pevnosti byl minerální olej ošetřen čistícím systémem Micafil VOT-3 zahrnujícím odplynění, sušení a filtrování. První experiment byl prováděn na přípravku z lepenkového válce, na jehož koncích byly ve vzdálenosti 34mm umístěny prstencové elektrody. Na elektrody bylo přiváděno střídavé napětí o frekvenci 50 Hz po dobu jedné minuty, v prvním kroku o velikosti 70kV a v každém dalším o 10kV vyšším. Z výsledků měření vyplývá, že VBO má větší tendenci k průrazům přes olejem zaplněný prostor (7 z 21 případů) než minerální olej (1 z 18 případů). V ostatních případech proběhl plazivý průraz. V případě plazivých průrazů ve VBO došlo také k menšímu poškození lepenkové izolace. Kritický bod je tedy částečně přesunut z rozhraní lepenka-olej do olejem zaplněného prostoru, což naznačuje potenciál k omezení poškození neobnovitelné izolace. Nicméně průrazné napětí kombinace s VBO bylo o 28% nižší než v případě minerálního oleje. Pokusy impulzního průrazu byly provedeny na segmentu vinutí transformátoru s 1mm tenkou vrstvenou papírovou izolací, napěťovou elektrodou, uzemněná elektroda byla ve tvaru desky. Vzdálenost mezi elektrodami byla v různých místech různá. Z měření vyplynulo, že přibližně k 70% průrazů v minerálním oleji došlo v místě, kde byla vzdálenost nejmenší. Oproti tomu ve VBO byl význam vzdálenosti mezi elektrodami menší.

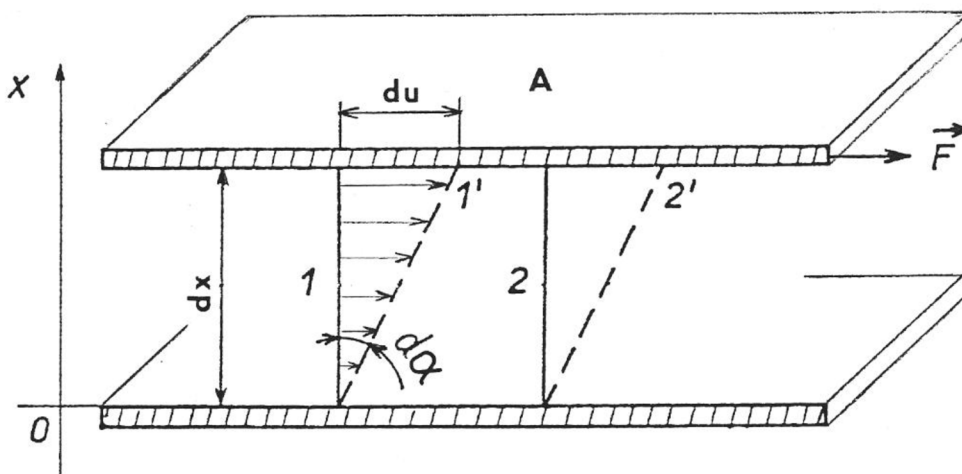
## 2 Viskozita

Viskozita je jednou z nejvýznamnějších veličin popisujících vlastnosti reálných tekutin. Její znalost je důležitá pro správný průběh mnoha technologických operací, týkajících se tekutin, či vhodnou volbu některých produktů - například mazacích olejů.

Pokud mají v reálné kapalině vůči sobě dvě sousední vrstvy rozdílnou relativní rychlost, dochází na jejich rozhraní ke tření a ke vzniku smykového napětí. Míru tohoto vnitřního tření pak vyjadřuje dynamická viskozita. Tato veličina je pro většinu kapalin závislá pouze na teplotě a v menší míře na tlaku. Tento typ kapalin se popisuje jako newtonské kapaliny. Dynamická viskozita neneutronských kapalin je pak i funkcí rychlostního gradientu uvnitř kapaliny nebo doby působení napětí.

### 2.1 Dynamická viskozita

Tato veličina vyjadřuje závislost tečného napětí v tekutině na gradientu rychlosti. Vztah pro její výpočet je možno odvodit z následujícího pomyslného experimentu. Máme dvě rovnoběžné desky, mezi kterými se nachází reálná kapalina. Pohybují-li se tyto desky vůči sobě rychlostí  $v$ , pak svým pohybem působí i na kapalinu mezi nimi. Částice kapaliny se začnou pohybovat různou rychlostí v závislosti na jejich vzdálenosti od desek tak, jak je naznačeno na Obr. 1.



Obr.1: Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [12]

Aby rychlost pohybující se desky zůstala konstantní, je na ni potřeba působit silou o velikosti:

$$F = \tau \cdot S = \eta \frac{v}{h} S, \quad (2)$$

kde  $S$  je plocha pohybující se desky,  $h$  je vzdálenost desek,  $v$  je vzájemná rychlost a  $\eta$  je dynamická viskozita kapaliny mezi deskami. Tečné napětí mezi deskami je tedy v tomto případě dáno vztahem:

$$\tau = \eta \cdot \frac{v}{h} \quad (3)$$



Tečné napětí mezi jednotlivými vrstvami kapaliny je pak dáno diferenciálním tvarem této rovnice:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (4)$$

kde  $\tau$  je tečné napětí vznikající při proudění kapaliny,  $\eta$  dynamická viskozita a  $\frac{dv}{dx}$  gradient rychlosti ve směru kolmém ke směru proudění. Jednotkou dynamické viskozity je Pa·s. Používá se také jednotka poise [P], která ovšem není součástí systému SI. Platí, že 1 Pa·s = 10 P [9][12].

## 2.2 Kinematická viskozita

Z praktických důvodů byla zavedena také veličina, která se nazývá kinematická viskozita označovaná řeckým písmenem  $\nu$ . Ta je definována jako poměr dynamické viskozity kapaliny a její hustoty. Matematicky je tedy vyjádřena následujícím vzorcem:

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

kde  $\eta$  je dynamická viskozita a  $\rho$  hustota kapaliny. Jednotkou kinematické viskozity je m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> [9][12].

## 2.3 Vliv teploty a tlaku na viskozitu

Viskozita kapalin je závislá na teplotě dané látky a v menší míře i na tlaku, který na látku působí. Pro newtonské kapaliny má teplota na viskozitu nejvýznamnější vliv. S rostoucí teplotou v kapalině klesají mezimolekulární síly a díky tomu klesá viskozita. Používají se dvě rovnice obecně popisující vztah viskozity a teploty v látkách. Prvním je Arrheniova rovnice:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}}, \quad (6)$$

kde  $\eta$  je určovaná dynamická viskozita,  $T$  je Termodynamická teplota,  $\eta_0$  je limitní viskozita,  $E$  je aktivační energie kterou potřebuje molekula k překonání bariéry a která se zpravidla určuje experimentálně a  $R$  je univerzální plynová konstanta. Pro praktické účely se tento vzorec používá také ve zjednodušené variantě:

$$\eta = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right), \quad (7)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita,  $T$  termodynamická teplota a  $A$  a  $B$  jsou empirické konstanty.

Druhou rovnicí popisující závislost viskozity na teplotě je rovnice Williams-Landel-Ferry taktéž někdy popisovaná jako rovnice WLF. Je to experimentálně zjištěný vztah a používá se pro polymerní taveniny. Rovnice má následující tvar:

$$\log \eta = \log \eta_0 - \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + T - T_0}, \quad (8)$$

kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou experimentálně stanovené konstanty specifické pro daný polymer. Používají se i jiné rovnice, které jsou odvozené z těchto dvou uvedených, ale ty už jsou vždy vztaženy ke konkrétní látce[23].

Vliv tlaku je při běžných hodnotách zanedbatelný a začíná se projevovat až při vyšších hodnotách. Viskozita plynů s rostoucí teplotou roste.

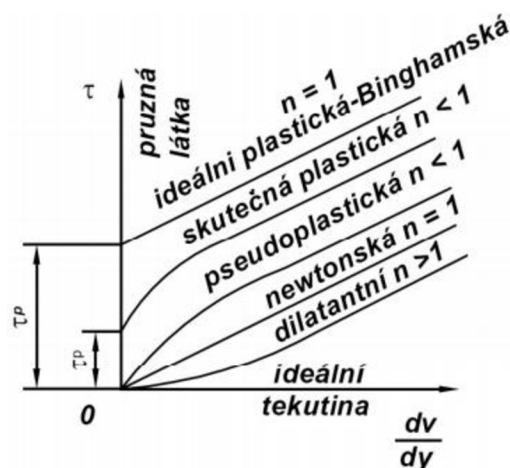
## 2.4 Neneutonské kapaliny

Jak již bylo zmíněno výše, viskozita neneutonských kapalin není závislá pouze na teplotě a tlaku, ale je ovlivněna i jinými faktory - rychlostním gradientem uvnitř kapaliny a dobou působení tečného napětí. Pro tyto kapaliny tedy neplatí Newtonův zákon. Mezi kapaliny s těmito vlastnostmi patří roztoky a taveniny polymerů, suspenze, různé pasty apod.

Viskozita neneutonských kapalin je dána vztahem:

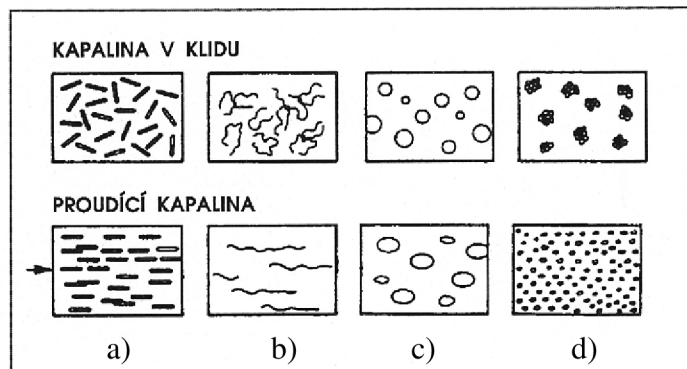
$$\tau = \eta \cdot D, \quad (9)$$

kde  $\tau$  je stejně jako v Newtonově zákoně tečné napětí a  $D$  gradient rychlosti. Veličina značená  $\eta$  je ale zdánlivá viskozita, která není látkovou konstantou a závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí.



Obr.2: Závislost tečného napětí na gradientu rychlosti neneutonských kapalin [8]

Pro charakterizaci toku neneutonských kapalin je tedy třeba znát závislost zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti v širším intervalu  $D$ [9].

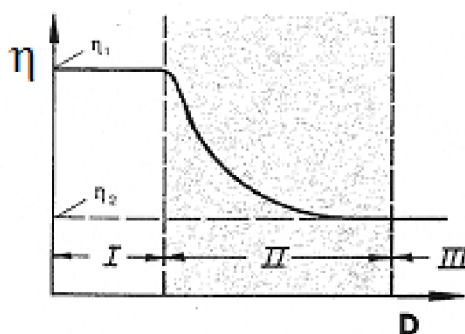


Obr.3: Vliv toku na uspořádání částic v neneutonské kapalině [12]  
 a) orientace b) napřímení c) deformace d) rozmělnění

## 2.4.1 Základní typy neneutonských kapalin

### Pseudoplastické kapaliny:

Jejich zdánlivá viskozita s rostoucím gradientem rychlosti klesá. Podle průběhu závislosti viskozity na gradientu rychlosti se tyto kapaliny dělí na pravé pseudoplastické kapaliny jejichž viskozita klesá s rostoucím gradientem rychlosti po celém intervalu a strukturálně viskózní kapaliny, které mají dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity. Do této skupiny patří roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a detergentů, některé suspenze apod. Tato vlastnost je v technické praxi většinou vítaná, jejím důsledkem totiž bývá snížení energetické náročnosti při míchání nebo toku potrubím.



Obr.4: Závislost zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti strukturálně viskózní kapaliny [12]

### Dilatantní kapaliny:

S rostoucím gradientem zdánlivá viskozita dilatantních kapalin roste. Dilatantní chování kapalin se vyskytuje zřídka, vykazují jej například některé vysoce koncentrované suspenze.

### Binghamské kapaliny:

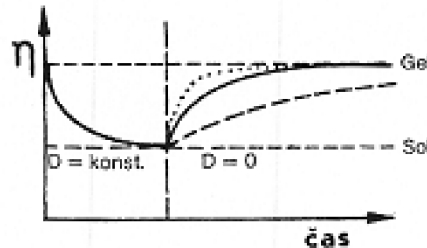
K toku Binghamských kapalin dochází až po překročení prahové hodnoty tečného napětí, která se nazývá mez toku  $\tau_k$ . Vykazují plastickou složku deformace. Pro tyto kapaliny pak platí:

$$\tau - \tau_k = \eta_0 \cdot D \quad (10)$$

Zástupci této kategorie kapalin jsou koncentrované průmyslové a odpadní (spláskové) kaly, kašovitě suspenze, křídly a vápna aj.

### Tixotropní kapaliny:

Vykazují časově závislou složku deformace, jejich zdánlivá viskozita klesá s dobou působení tečného napětí. Tixotropie je výhodná u nátěrových hmot. V elektrotechnice se tixotropní činidla využívají při výrobě past nanášených síťotiskem pro tlustovrstvé technologie nebo při výrobě pájecích past pro pájení přetavením.



Obr.5: Časová závislost zdánlivé viskozity tixotropní kapaliny pro různé hodnoty gradientu rychlosti [12]

### Reopektické kapaliny:

Stejně jako tixotropní kapaliny je jejich zdánlivá viskozita časově závislá, s dobou působení tečného napětí ale roste. Kapaliny s touto vlastností jsou vzácné. Mezi reopektické kapaliny patří suspenze betonitu.

Výše uvedené kategorie nepopisuje všechny varianty chování neneutonských kapalin, které může být podstatně složitější. V technické praxi se chování těchto kapalin popisuje tokovou křivkou v požadovaném rozsahu tečných napětí.

## 2.5 Způsoby měření viskozity kapalin

Měření viskozity kapalin je možno provádět na základě několika jejich fyzikálních projevů. Podle toho jaká je konkrétně využíván se rozlišuje několik skupin viskozimetrů. Průtokové (kapilární) viskozimetry využívají Hagen-Posseuilleova zákona při laminárním proudění v kruhové kapiláře, kuličkové (pádové) viskozimetry využívají Stokesova zákona při laminárním proudění okolo tělesa (kuličky), rotační viskozimetry využívají Couettova proudění a vibrační viskozimetry využívají vliv viskozity na tlumení vibrací.

### 2.5.1 Průtokové viskozimetry

Z Hagen-Posseuilleova zákona zákona je možno určit viskozitu podle následující rovnice:

$$\eta = \frac{\pi d^4}{8lQ_v} \Delta p = \frac{\pi d^4 t}{8lV} \Delta p, \quad (11)$$

kde  $d$  je průměr kapiláry,  $l$  je její délka,  $Q_v$  je objemový průtok za jednotku času,  $\Delta p$  je rozdíl tlaků mezi konci kapiláry (tlakový spád),  $t$  je doba toku kapaliny a  $V$  je objem kapaliny, která za tuto dobu viskozimetrem protékla[9].

Průtokové viskozimetry mohou fungovat na principu stálého tlakového rozdílu  $\Delta p$  a měřenou veličinou je pak objemový průtok  $Q_v$ . Tlak může být dán pouze hydrostatickým tlakem

sloupce kapaliny nebo také současně i tlakem inertního plynu na hladinu nebo zatěžovaným pístem ve výtlačných viskozimetrech. V praxi pak nemusí být viskozita měřena přímo, ale na základě srovnání s referentní kapalinou o známé viskozitě. Viskozita je pak dána vzorcem:

$$\nu = \frac{t}{t_0} \nu_0, \quad (12)$$

kde  $t_0$  je doba výtoku referentní kapaliny a  $\nu_0$  je její viskozita a  $t$  je doba výtoku zkoumané kapaliny [12].

Průtokové viskozimetry s konstantním tlakovým spádem jsou postačující pro měření viskozity newtonských kapalin. Pro měření závislosti zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti neneutonských kapalin se používají kapilární viskozimetry s nastavitelným tlakovým spádem. Výsledkem měření pak nejsou pouze hodnoty objemového průtoku, ale také jim odpovídající hodnoty tlakového spádu. Z těchto hodnot a také parametrů viskozimetru lze vypočítat konzistenční proměnné smykové napětí a gradient rychlosti na stěně a také zdánlivou viskozitu.

### Ubbelohdův viskozimetr

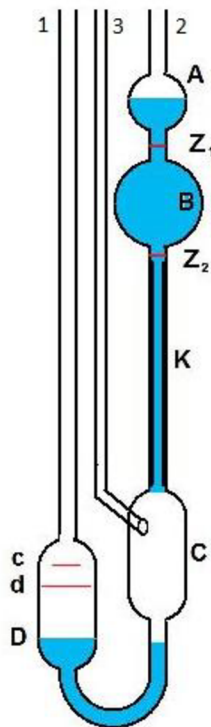
Pomocí Ubbelohdova viskozimetru se provádí měření kinematické viskozity. Měření se provádí tak, že se kapalina nalije trubicí 1 do viskozimetru tak, aby její hladina byla mezi ryskami c a d na baňce D (viz. Obr.12). Poté je vzorek temperován. Následně se uzavře trubice 2 a měrná kapalina nasáta do poloviny baňky A. Po uvolnění trubic 2 a 3 kapalina samovolně stéká. Měřenou veličinou je doba průchodu hladiny kapaliny mezi ryskami  $Z_1$  a  $Z_2$ [9].

Kinematická viskozita je pak určena přímo pomocí následující rovnice:

$$\nu = At - \frac{B}{t}, \quad (13)$$

kde  $t$  je doba průchodu hladiny kapaliny mezi ryskami,  $A$  je kalibrační konstanta viskozimetru a  $B$  je korekce na kinetickou energii. Konstanty  $A$  a  $B$ , viskozimetru lze jednoduše určit kalibrací pomocí kapaliny se známou hodnotou viskozity[9].

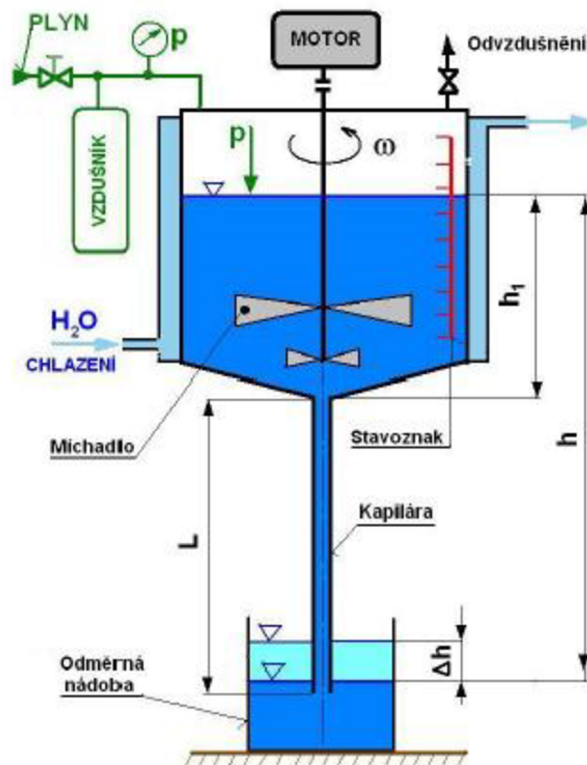
Používají se viskozimetry s různými průměry kapiláry pro různé rozsahy kinematické viskozity měřené kapaliny.



Obr.6: Ubbelohdeho viskozimetr [9]

### Přetlakový kapilární viskozimetr

Na následujícím obrázku je zobrazeno jedno z možných provedení přetlakového kapilárního viskozimetru.



Obr.7: Přetlakový kapilární viskozimetr [9]

Inertní plyn do nádoby viskozimetru je přiváděn přes redukční ventil. Požadovaná teplota vzorku je udržována vodou proudící kolem nádoby. V nádobě je umístěno míchadlo. Celkový tlakový spád ve viskozimetru je dán součtem hydrostatického tlaku vzorku a tlaku plynu na hladinu. Výsledkem měření na tomto typu viskozimetru je soustava údajů o tlakovém spádu a objemovém průtoku vzorku, ze kterých je možno určit viskozitu pro různé hodnoty gradientu rychlosti. Pro neneutonské kapaliny jsou pak naměřené hodnoty interpretovány vhodnou rovnicí toku [9][12].

## 2.5.2 Tělískové viskozimetry

Při měření viskozity tělískovým viskozimetrem dochází k pohybu tělíska (nejčastěji kuličky) kapalinou, jejíž viskozita je měřena. Kapalina působí odporovou silou proti směru pohybu tělíska. Je-li proudění v jejím okolí laminární, pak velikost této odporové síly závisí na viskozitě kapaliny podle Stokesova zákona:

$$F_o = 6\pi\eta rw, \quad (14)$$

kde  $\eta$  je měřená dynamická viskozita kapaliny,  $r$  poloměr tělíska a  $w$  je sedimentační rychlost[9].

### Stokesův viskozimetr

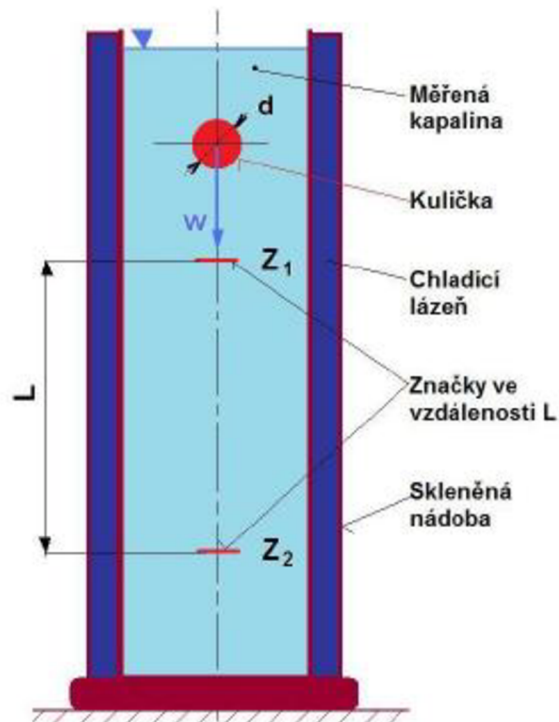
Je jedním z nejjednodušších tělískových viskozimetrů. Je tvořen skleněným válcem naplněným měřenou kapalinou. Na něm jsou vyznačeny dvě rysky ve vzájemné vzdálenosti  $L$ . Měření Stokesovým viskozimetrem probíhá tak, že se kapalinou ve viskozimetru nechá klesat kulička a měří se čas, za který urazí vzdálenost  $L$  mezi ryskami na viskozimetru. Dynamická viskozita kapaliny je pak dána rovnicí:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_k - \rho_v)gt}{9L}, \quad (15)$$

kde  $r$  je poloměr kuličky,  $\rho_k$  její hustota,  $\rho_v$  hustota měřené kapaliny,  $g$  tíhové zrychlení,  $L$  vzdálenost mezi ryskami viskozimetru a  $t$  čas, za který kuličky tuto vzdálenost urazila. V praxi se používá zjednodušený vzorec:

$$\eta = k(\rho_k - \rho_v)t, \quad (16)$$

kde  $k$  je konstanta viskozimetru. K měření je možno používat kuličky různé hustoty a díky tomu je lze měřit i viskozitu neneutonských kapalin. Základní podmínkou pro přesné měření na Stokesově viskozimetru je, že poloměr kuličky musí být výrazně menší než poloměr válce[9].



Obr.8: Schéma Stokesova viskozimetru [9]

### Höpplerův viskozimetr

Höpplerův viskozimetr je podobný Stokesovu, liší se tím, že válec s měřenou kapalinou je skloněn od svislice o uhel  $\alpha$  (nejčastěji o  $10^\circ$ ). Poloměr kuličky při měření tímto viskozimetrem nemusí být výrazně menší než průměr válce. Společný je způsob měření viskozity, tedy měření času, za který kuličky v kapalině urazí danou vzdálenost mezi dvěma ryskami na viskozimetru [12].

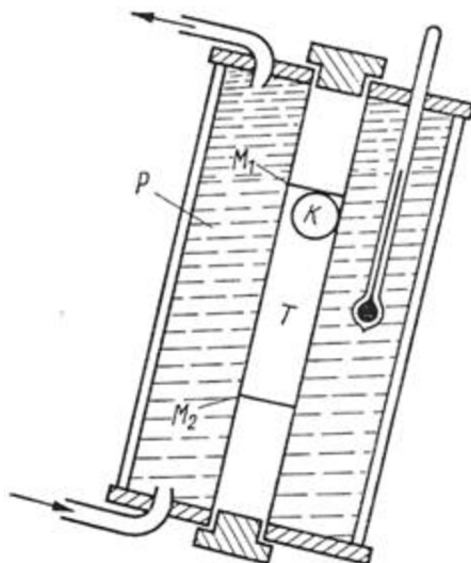
Pro Höpplerův viskozimetr pak má vzorec pro výpočet dynamické viskozity tvar:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_k - \rho_v)g \cos \alpha t}{9L}, \quad (17)$$

Stejně jako pro Stokesův viskozimetr se tento vzorec zjednodušuje na:

$$\eta = k(\rho_k - \rho_v)t. \quad (18)$$





Obr.9: Höpplerův viskozimetr [12]

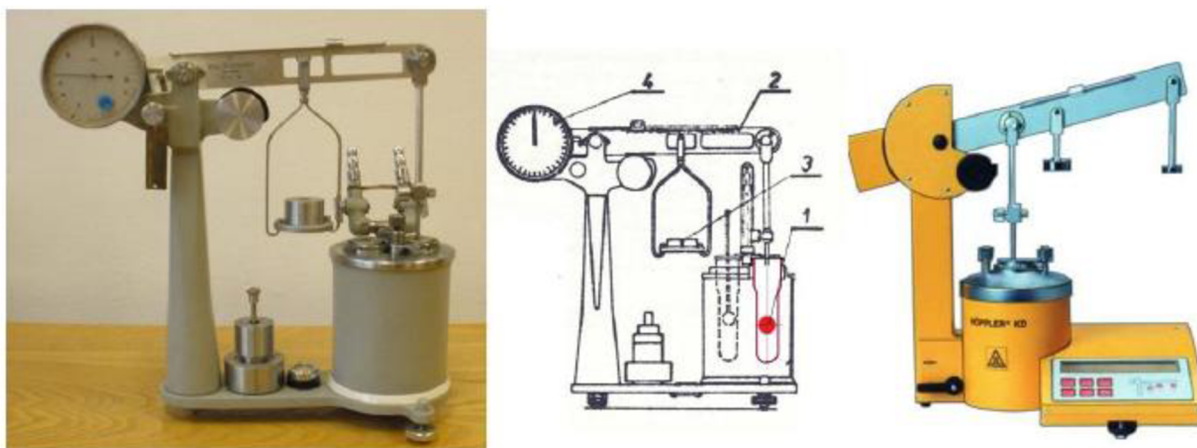
T - trubice naplněná měřenou kapalinou,  $M_1$ ,  $M_2$  - rysky ve vzdálenosti  $L$ ,  
K - kulička, P - Chladicí lázeň

### Reoviskozimetr s tlačnou kuličkou

Tento typ viskozimetru se od předchozích liší tím, že kulička je připevněna k vahadlu. Na toto vahadlo se při měření zavěšuje závaží, jehož hmotnost určuje sílu, kterou vahadlo působí na kuličku. Při měření se určuje čas, za který kulička urazí danou dráhu. Viskozita kapaliny je pak dáta vzorcem:

$$\eta = k_1 \cdot P \cdot t, \quad (19)$$

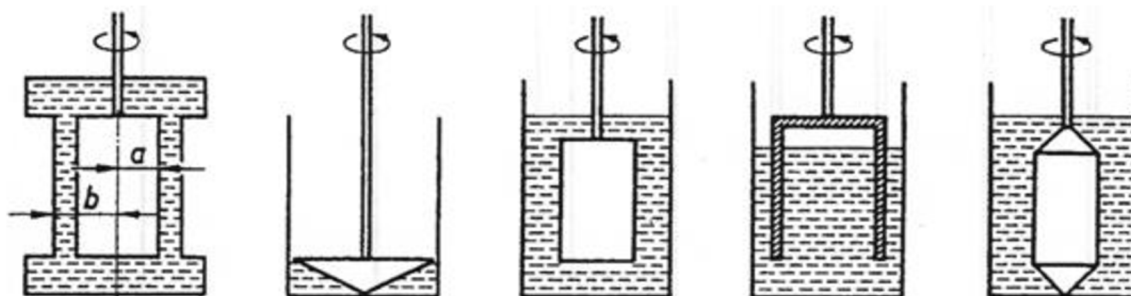
kde  $k_1$  je konstanta viskozimetru,  $P$  je parametr daný použitým závažím a  $t$  je měřený čas.  $\eta$  je dynamická viskozita měřené kapaliny. Reoviskozimetry s tlačnou kuličkou se používají pro měření kapalin s vysokou viskozitou - až  $4 \cdot 10^3$  Pa·s. Umožňují i měření viskozitních křivek neneutonských kapalin. Různé hodnoty gradientu rychlosti se nastavují použitím různě hmotného závaží[9][12].



Obr.10: Reoviskozimetry s tlačnou kuličkou [9]

## 2.5.3 Rotační viskozimetry

Princip funkce rotačních viskozimetrů vychází ze samotné definice dynamické viskozity. Základní částí rotačních viskozimetrů bývá nejčastěji soustava dvou sousých válců, mezi kterými se nachází měřená kapalina. Gradient rychlosti je vytvořen rotačním pohybem jednoho z válců. Tečné napětí se projevuje jako moment síly působící na statický válec. Ten a úhlová rychlost rotujícího válce jsou měřenými veličinami, ze kterých se určuje dynamická viskozita vzorku.



Obr.11:

Obr.12: Druhy rotačních viskozimetrů [12]

V případě viskozimetru tvořeném dvěma válci se používá jak uspořádání s rotujícím vnitřním, tak s rotujícím vnějším válcem. Teoreticky na měření viskozity nemá vliv, který válec rotuje - pro výpočet je důležitá pouze vzájemná relativní úhlová rychlost válců. V praxi se však častěji používá varianta s rotujícím vnitřním válcem. Viskozita se při měření rotačním viskozimetrem s uspořádáním dvou sousých válců určuje rovnicí

$$\eta = \frac{M}{2\pi h\omega} \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) = A \frac{M}{\omega}, \quad (20)$$

kde  $M$  je naměřený moment síly,  $h$  je výška smýkané vrstvy kapaliny,  $\omega$  úhlová rychlost rotujícího válce,  $R_1$  poloměr vnitřního válce a  $R_2$  poloměr vnějšího válce. Ve zjednodušeném vzorci pak  $A$  představuje přístrojovou konstantu. Výše uvedená rovnice platí pouze, pokud je splněna podmínka stabilního laminárního toku ve šterbině mezi válci - Couettova toku. V rovnici je zanedbán vliv koncových a hranových efektů [9][12].

Kromě rotačního viskozimetru tvořeného dvěma válci se často používá také viskozimetr typu kužel-deska. Také u tohoto typu viskozimetru se používají dvě varianty přístroje - jak s rotujícím kuželem, tak s rotující deskou. Smykové napětí je pro tento viskozimetr dáno rovnicí:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}, \quad (21)$$

kde  $M$  je naměřený moment síly a  $R$  poloměr podstavy kužele viskozimetru. Pro gradient rychlosti platí:

$$D = \frac{\omega}{\varphi}, \quad (22)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost rotujícího kužele nebo desky a  $\varphi$  je úhel mezi deskou a pláštěm kužele uvedený v radiánech. Z těchto dvou vztahů je pak určena velikost měřené dynamické viskozity.

$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{3M\varphi}{2\pi R^3 \omega}. \quad (23)$$

Průmyslové využití rotačních viskozimetrů je velice rozšířené, a to především díky možnosti kontinuálního měření viskozity, kterou tyto viskozimetry poskytují. Výhodou viskozimetru typu kužel-deska je, že pro měření postačují malé objemy vzorku[9][12].

## 2.5.4 Vibrační viskozimetry

Při vibraci tělesa v reálné kapalině (s nenulovou viskozitou) dochází k útlumu těchto vibrací. Útlum vibrací vyjadřuje součinitel tlumení  $b$ . Při laminárním proudění je pak tento součinitel lineární funkcí kinematické viskozity. Ve vibračních viskozimetrech se používají kmitající tělíska různé geometrie - nejběžněji obdélníková deska, kruhový terč nebo válec. Pohyb tělíska může být příčný i torzní. Existují tři způsoby měření součinitele tlumení používané ve vibračních viskozimetrech: pomocí měření příkonu pro oscilace s konstantní amplitudou a frekvencí, měření doby útlumu po vypnutí zdroje vibrací a měření rezonanční frekvence[9].

## 2.6 Kalibrace viskozimetrů

Kalibrace viskozimetrů se provádí nejčastěji prostřednictvím tzv. viskozitních standardů. Jsou to newtonské kapaliny vyrobené s definovanou hodnotou dynamické nebo kinematické viskozity, která je při dané teplotě (běžně 20,00 °C), nebo několika různých teplotách přesně změřena a garantována výrobcem. Na trhu jsou nabízeny standardy s přesností přibližně v rozsahu 0,1 - 1% při dané teplotě. Jako viskozitní standardy se používají speciálně vyčištěné a upravené minerální a silikonové oleje. Výrobce udává u standardů také jejich hustotu, proto je možné je používat jako standardy jak dynamické tak kinematické viskozity. Dostupné jsou viskozitní standardy v rozsahu řádově 1 - 100 000 mPa·s. Při kalibraci je velmi důležité dodržení přesné teploty, pro kterou je dána viskozita použitého standardu.

## 3 Hustota

Pro označení hustoty tělesa se používá řecké písmeno  $\rho$  [ró]. Je definována jako hmotnost elementárnímu objemu tělesa. Matematicky je tato definice popsána vztahem:

$$\rho = \frac{dm}{dV}, \quad (24)$$

kde  $dV$  je elementární objem tělesa a  $dm$  je jeho hmotnost. Pro homogenní tělesa pak platí také vztah:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (25)$$

kde  $m$  je hmotnost daného tělesa a  $V$  je jeho objem. Z definičního vztahu vyplývá také jednotka hmotnosti:

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3} = kg \cdot m^{-3} \quad (26)$$

Místo pojmu hustota se lze také setkat s ekvivalentním pojmem měrná hmotnost. Dále je v práci řešena pouze hustota homogenních těles, pro která platí vztah (25)[5].

### 3.1 Vliv teploty a tlaku na hustotu kapaliny

Protože pro většinu případů můžeme změny hmotnosti kapalného tělesa zanedbat, souvisí změny hustoty vlivem teploty nebo tlaku se změnami objemu tělesa. Změny hustoty vlivem teploty jsou způsobeny objemovou teplotní roztažností, tlak má vliv na hustotu těles díky jejich stlačitelnosti.

S rostoucí teplotou objem kapalného tělesa roste a tento vztah je považován za lineární. Matematicky je pak tento jev popsán rovnicí:

$$V = V_0[1 + \beta(t - t_0)], \quad (27)$$

kde  $t_0$  je počáteční teplota,  $t$  koncová teplota,  $V_0$  objem kapalného tělesa při počáteční teplotě  $t_0$ ,  $V$  objem tělesa při koncové teplotě  $t$  a  $\beta$  [ $1/^\circ\text{C}$ ] je součinitel objemové teplotní roztažnosti. Vztah pro teplotní závislost je pak získán dosazením této rovnice do vztahu pro hustotu homogenního tělesa:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0[1 + \beta(t - t_0)]} = \frac{\rho_0}{[1 + \beta(t - t_0)]} = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta t}, \quad (28)$$

kde  $\rho_0$  je počáteční hustota při teplotě  $t_0$  a  $\rho$  je koncová hustota při teplotě  $t$ .

Uvedená lineární závislost objemu na teplotě platí ve velké většině případů, nicméně není zcela univerzální. Nejznámější výjimkou je chování vody při teplotách okolo  $4^\circ\text{C}$  a nižších. Při poklesu teploty vody ke  $4^\circ\text{C}$  přestává být závislost objemu na teplotě lineární a při dalším poklesu dochází dokonce ke zvýšení objemu. Tento jev je způsoben tvorbou vodíkových můstků mezi molekulami vody, ke které začíná docházet přibližně při výše zmíněné teplotě  $4^\circ\text{C}$ .

Součinitel teplotní roztažnosti minerálních olejů dosahuje hodnot v rozmezí  $(5 \div 7,7) \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ .

Ideální kapalina je nestlačitelná, nicméně reálné kapaliny určitou míru stlačitelnosti vykazují. Protože se při stlačování nemění hmotnost kapaliny, vyplývá ze základního vzorce pro hustotu, že se změnou objemu se odpovídajícím způsobem mění také hustota kapaliny. Objemová stlačitelnost za konstantní teploty je vyjádřena pomocí izotermického součinitele stlačitelnosti  $\kappa$  [ $\text{Pa}^{-1}$ ]:

$$\kappa = \frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dp} \right)_{T=\text{konst.}}, \quad (29)$$

pokud nás zajímá pouze stav před stlačením a po stlačení, lze rovnici upravit na:

$$\kappa = \frac{1}{V_0} \frac{V - V_0}{p - p_0} = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta p}, \quad (30)$$

kde  $p_0$  a  $V_0$  jsou počáteční tlak a objem a  $p$  a  $V$ , jsou tlak a objem po ukončení stlačování. Z tohoto vztahu a rovnice (30) vyplývá vzorec pro závislost kapaliny na tlaku.

$$V = V_0 - \Delta V = V_0 - \kappa V_0 \Delta p = V_0 (1 - \kappa \Delta p) \quad (31)$$

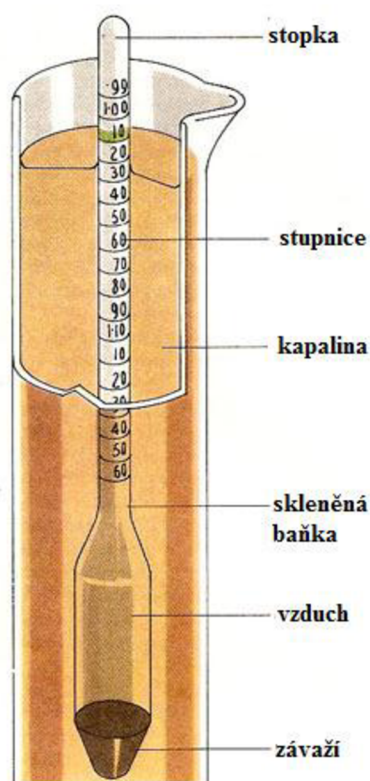
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 (1 - \kappa \Delta p)} = \frac{\rho_0}{(1 - \kappa \Delta p)} \quad (32)$$

Často používanou veličinou vyjadřující stlačitelnost je modul objemové stlačitelnosti  $K$  [Pa], který je převrácenou hodnotou součinitele stlačitelnosti. Modul objemové stlačitelnosti minerálních a rostlinných olejů se pohybuje v rozmezí  $(1,4 \div 1,8) \cdot 10^9$  Pa[5][6].

## 3.2 Metody měření hustoty kapalin

### 3.2.1 Hustoměr

Nejjednodušší a nejrychlejší metodou měření hustoty kapalin je měření pomocí hustoměru. Metoda využívá závislost velikosti vztlakové síly na hustotě kapaliny, do které je těleso ponořeno a na objemu ponořeného tělesa.



Obr.13: Hustoměr [10]

Hustoměr je zatavená skleněná trubice uzpůsobená tak, aby plovla v měřené kapalině. Hustota je pak určena podle hloubky ponoření hustoměru, která je dána stavem, kdy dojde k vyrovnání vztlakové a tíhové síly působících na hustoměr. Používají se také varianty hustoměru, ve kterých není hloubka ponoření zjišťována ze stupnice, ale měřena fotoelektricky. Výhodou této metody jsou její rychlost a nízké náklady na pořízení hustoměru. Nevýhodou je nízká přesnost měření a to, že metoda neumožňuje kontinuální měření [1]Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

### 3.2.2 Metoda ponorného tělíska

Tato metoda také vychází z Archimédova zákona. Spočívá ve trojím zvažení ponorného tělesa. Jednou ve vzduchu, poté zcela ponořeného v kapalině o známé hustotě a nakonec v měřené kapalině. Hustota měřené kapaliny je pak určena rovnicí:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2}(\rho_2 - \rho_v) + \rho_v, \quad (33)$$

kde  $m_3$  je hmotnost ponorného tělíska ve vzduchu,  $m_2$  hmotnost v kapalině o známé hustotě,  $m_1$  v měřené kapalině,  $\rho_2$  je hustota srovnávací kapaliny a  $\rho_v$  je hustota vzduchu.

Tento postup může být ještě zjednodušen, pokud známe objem ponorného tělíska. Toho lze jednoduše dosáhnout tím, že je jako ponorné tělísko použit objemový standard. Díky tomu postačí pouze vážení tělíska ve vzduchu a v měřené kapalině. Tím dochází k urychlení měření a také odpadá potřeba použití srovnávací kapaliny. V tomto způsobu měření se využívá toho, že kapalina působí na ponořené těleso vztlakovou silou, která se při vážení tělesa projeví jako

úbytek hmotnosti rovný hmotnosti kapaliny o objemu ponorného tělesa. Hustota je pak dána vzorcem:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} + \rho_V, \quad (34)$$

kde  $m_2$  je naměřená hmotnost ponorného tělesa ve vzduchu a  $m_1$  je naměřená hmotnost tělesa zcela ponořeného do měřené kapaliny,  $V$  je objem ponorného tělesa a  $\rho_V$  je hustota vzduchu.

Výhodou metody je vyšší přesnost oproti měření hustoty hustoměrem, za zachování nízkých nároku na laboratorní vybavení a relativně krátkého času na provedení měření. Nevýhodou je, že ani tato metoda neumožňuje kontinuální měření hustoty[6][19].

### 3.2.3 Kontinuální metody měření hustoty

V průmyslu je mnohdy velmi výhodné, pokud je hustota určité kapaliny měřena kontinuálně. Žádná z předchozích uvedených metod tento požadavek nesplňuje. Byly však vyvinuty metody, které kontinuální měření hustoty umožňují.

#### Hustoměry s radioaktivním zářičem

Hustoměry s radioaktivním zářičem fungují na principu měření zeslabení intenzity záření po průchodu vrstvou kapaliny o určité tloušťce. Toto zeslabení závisí také na hustotě kapaliny, a to podle následujícího vztahu:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu d \rho}, \quad (35)$$

kde  $\Phi$  je zářivý tok měřená detektorem po průchodu záření kapalinou,  $\Phi_0$  je zářivý tok vyzářený radioaktivním zdrojem  $\mu$  je hmotnostní součinitel zeslabení,  $d$  je tloušťka vrstvy kapaliny a  $\rho$  je její hustota.

Zdroje záření bývají v těchto typech hustoměrů radioaktivní izotopy s dlouhým poločasem rozpadu, které produkují  $\gamma$ -záření (Co 60, Cs 137). Detektory bývají Geigerova trubice, nebo ionizační komora. Měření probíhá bezkontaktně, kdy detektor i zářič jsou umístěny vně potrubí, kterým proudí měřená kapalina. Hustoměry s radioaktivním zářičem se používají pro měření hustoty v extrémních podmínkách za vysoké teploty a tlaku. Umožňují měření i vysoce viskózních, nebo znečištěných kapalin. Přesnost měření je náchylná na bubliny v měřené kapalině a na usazeniny na stěnách potrubí. Při provozu je potřeba dodržovat příslušné bezpečnostní předpisy[11].

#### Ultrazvukové hustoměry

Rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalině závisí na jejím složení, teplotě, viskozitě a hustotě. Pro kapaliny s konstantní teplotou a složením je závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na hustotě vyjádřena rovnicí:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (36)$$

kde  $C$  je modul objemové pružnosti prostředí a  $\rho$  je hustota měřené kapaliny. Měřicí zařízení se skládá z vysílače a přijímače ultrazvukových vln. Vyhodnocuje se čas, za který ultrazvukové vlny urazí danou vzdálenost v měřené kapalině. Z důvodu závislosti rychlosti šíření ultrazvukových vln v měřené kapalině na teplotě, je součástí zařízení také senzor teploty, aby mohla být naměřená data korigována pro danou teplotu. Zdroj ultrazvukových vln i přijímač musejí být v kontaktu s měřenou kapalinou, proto nelze ultrazvukové měření hustoty použít pro stejně extrémní podmínky jako hustoměry s radioaktivním zářičem. Výhodou naopak je, že jeho použití nevyžaduje taková bezpečnostní opatření[11].



## 4 Vlastnosti vzorků rostlinných a minerálních olejů

Pro porovnání teplotních závislostí viskozity rostlinných a minerálních olejů byly vybrány čisté rostlinné oleje od firmy Fabio Produkt s.r.o., které jsou určeny pro potravinářské využití. Konkrétní použité produkty byly slunečnicový olej Slunka, olivový olej Olivie a sojový olej. Jako zástupci v současnosti používaných minerálních transformátorových olejů byly vybrány produkty firmy Paramo Trafo CZ-A a Trafo N-A.

Tab.1: Obsah mastných kyselin v slunečnicovém, sojovém a olivovém oleji podle Codex Alimentarius [3][4]

| Mastná kyselina      | Slunečnicový olej | Sojový olej | Olivový olej |
|----------------------|-------------------|-------------|--------------|
| C6:0                 | ND                | ND          | -            |
| C8:0                 | ND                | ND          | -            |
| C10:0                | ND                | ND          | -            |
| C12:0                | ND - 0,1          | ND - 0,1    | -            |
| C14:0                | ND - 0,2          | ND - 0,2    | 0,0 - 0,05   |
| C16:0                | 5,0 - 7,6         | 8,0 - 13,5  | 7,5 - 20,0   |
| C16:1                | ND - 0,3          | ND - 0,2    | 0,3 - 3,5    |
| C17:0                | ND - 0,2          | ND - 0,1    | 0,0 - 0,3    |
| C17:1                | ND - 0,1          | ND - 0,1    | 0,0 - 0,3    |
| C18:0                | 2,7 - 6,5         | 2,0 - 5,4   | 0,5 - 5,0    |
| C18:1                | 14,0 - 39,4       | 17 - 30     | 55,0 - 83,0  |
| C18:2                | 48,3 - 74,0       | 48,0 - 59,0 | 3,5 - 21,0   |
| C18:3                | ND - 0,3          | 4,5 - 11,0  | -            |
| C20:0                | 0,1 - 0,5         | 0,1 - 0,6   | 0,0 - 0,6    |
| C20:1                | ND - 0,3          | ND - 0,5    | 0,0 - 0,4    |
| C20:2                | ND                | ND - 0,1    | -            |
| C22:0                | 0,3 - 1,5         | ND - 0,7    | 0,0 - 0,3    |
| C22:1                | ND - 0,3          | ND - 0,3    | -            |
| C22:2                | ND - 0,3          | ND          | -            |
| C24:0                | ND - 0,5          | ND - 0,5    | 0,0 - 0,2    |
| C24:1                | ND                | ND          | -            |
|                      |                   |             |              |
| Transmastná kyselina |                   |             |              |
| C18:1 T              | -                 | -           | 0,0 - 0,40   |
| C18:2 T + C18:3 T    | -                 | -           | 0,0 - 0,35   |

Pozn.: Zkratka ND znamená nedetekovatelné množství mastné kyseliny, tedy menší než 0,05%  
Pomlčka "-" znamená, že zastoupení dané (trans)mastné kyseliny nebylo ve zdroji uvedeno

Kapalina obvykle popisovaná jako metylester řepkového oleje (MEŘO) je ve skutečnosti směsí metylesterů mastných kyselin řepkových olejů. Je to čirá kapalina zabarvená do žluta. Není mísitelná s vodou. Je to hořlavá kapalina III. třídy. Je velmi dobře biologicky odbouratelná (přibližně 98% za 21 dní). Vyrábí se esterifikací mastných kyselin řepkového oleje. Ta probíhá mísením oleje vylisovaného z řepkových semen s metanolem a katalyzátory této reakce. Vedlejším produktem reakce je dále také využitelný glycerin. Je základní složkou

bionafty a zásadním způsobem se podílí na jejich ekologicky příznivých vlastnostech. Součástí bionafty bývá přibližně 30 - 36% metylesteru řepkového oleje.[10]

Tab.2: Vlastnosti metylesteru řepkového oleje

|   |           |
|---|-----------|
| Hustota při 20 °C [kg·m <sup>-3</sup> ]                             | 888       |
| Dynamická viskozita při 20 °C [mPa·s]                               | 6,1       |
| Kinematická viskozita při 40 °C [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | 3,5 - 5   |
| Bod vzplanutí [°C]  | 120       |
| Bod samovznícení [°C]   | 261       |
| Obsah vody [mg·kg <sup>-1</sup> ]                                   | max. 500  |
| Číslo kyselosti [mg KOH/g]  | max. 0,50 |

Mogul Trafo CZ-A je inhibovaný transformátorový olej vyrobený z jakostního hydrokrakovaného hluboce rafinovaného základového oleje, který se získává z parafinické ropy. Paramo Trafo N-A je neinhibovaný transformátorový olej, je vyroben z hydrogenovaného hluboce rafinovaného základového oleje z naftenické ropy. Oba oleje jsou určeny jako izolační a chladicí kapalina transformátorů všech napěťových hladin. Lze je použít i do spínačů, stykačů, kondenzátorů a jiných elektrických zařízení.

Tab.3: Charakteristické vlastnosti použitých minerálních olejů [17][18]

|   | Mogul Trafo CZ-A | Paramo Trafo N-A |
|---|------------------|------------------|
| Hustota při 15 °C [kg·m <sup>-3</sup> ]                             | 870              | 895              |
| Kinematická viskozita při 40 °C [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | 10               | 12               |
| Bod vzplanutí [°C]  | 175              | 135              |
| Bod tekutosti [°C]  | -45              | -40              |
| Číslo kyselosti [mg KOH/g]  | 0,005            | 0,01             |
| Průrazné napětí po vysušení [kV]                                    | 75               | 70               |
| Ztrátový činitel při 90 °C [-]                                      | 0,001            | 0,005            |

## 5 Vibrační viskozimetr SV-10

Pro měření teplotní závislosti viskozity vybraných vzorků byl použit vibrační viskozimetr Vitrum SV-10. Ten umožňuje kontinuální měření dynamické viskozity po dlouhou dobu, díky tomu, že vyvíjí pouze slabou zátěž na vzorek. Viskozimetrem SV-10 lze měřit také neneutonské kapaliny a kapaliny obsahující bubliny. Výhodou je také relativně malý potřebný objem vzorku přibližně 35 ml. Součástí viskozimetru je teploměr měřící teplotu vzorku.

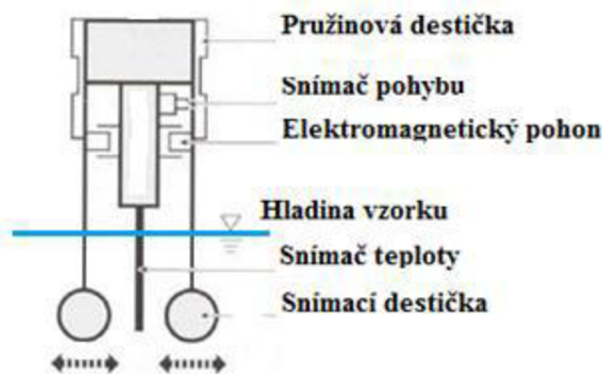


Obr.14: Vibrační viskozimetr Vitrum SV-10 [14]

Viskozimetr umožňuje měřit viskozitu vzorku na rozsahu 0,3 - 10000 mPa·s, pracuje v teplotním rozsahu 10 - 104 °C. Dosahuje opakovatelnosti se standardní odchylkou 1% a přesnosti  $\pm 3\%$ . Přesnost měření teploty je  $\pm 1$  °C v rozsahu 0 až 20 °C,  $\pm 0,5$  °C v rozsahu 20 až 30 °C a  $\pm 2$  °C v rozsahu 30 až 100 °C [14].

### 5.1 Princip činnosti

Viskozimetr Vitrum SV-10 měří viskozitu detekcí elektrického proudu nutného k rezonanci dvou snímacích destiček ponořených ve vzorku. Destičky mají kruhovitý tvar a vibrují se sinusovou vlnou s frekvencí 30 Hz a amplitudou menší než 1mm. Pohyb destiček je vyvolán elektromagneticky.



Obr.15: Měřicí aparatura vibračního viskozimetru [22]

## 5.2 Kalibrace

Jako možnost korekce odchylky měření viskozity nabízí přístroj možnost kalibrace. Kalibrace se provádí pomocí standardních roztoků s viskozitou (viskozitních standardů) a je možno provést kalibraci jednobodovou nebo dvoubodovou. Lze provést také zjednodušenou kalibraci využívající čištěnou vodu. Jednobodovou kalibraci je vhodné provést před měřením na úzkém rozsahu viskozit. Probíhá tak, že na přístroji je v menu nastavena možnost kalibrace a je změřena viskozita daného standardu. Výsledná hodnota je pak manuálně upravena tak, aby odpovídala viskozitě vzorku. Přístroj se následně automaticky zkalibruje. Dvoubodová kalibrace je vhodná pro měření na širokém rozsahu viskozit. Probíhá obdobě jako jednobodová kalibrace, pouze není měřena viskozita jednoho standardního roztoku s viskozitou, ale viskozita dvou. Viskozity obou standardů by měly být voleny s ohledem na předpokládané viskozity vzorků v samotném měření. Kalibrace čištěnou vodou probíhá stejně jako jednobodová kalibrace, pouze místo standardního roztoku s viskozitou je použita čištěná voda. Naměřená viskozita je pak porovnána s teoretickou viskozitou čištěné vody při dané teplotě.

Je velmi důležité během kalibrace zajistit přesnou teplotu vzorů z důvodu velké závislosti viskozity na teplotě. Odchylka v teplotě standardu bude mít negativní vliv na přesnost kalibrace. Je také důležité, aby viskozita standardů použitých pro kalibraci přibližně odpovídala předpokládaným viskozitám vzorků.

## 6 Měření teplotní závislosti viskozity rostlinných a minerálních olejů

### 6.1 Měření hustoty rostlinných a minerálních olejů

Metody měření viskozity jak Höpplerovým, tak vibračním viskozimetrem vyžadují znalost hustoty vzorku při dané teplotě. Z toho důvodu byla změřena hustota všech vzorků. Měření bylo provedeno metodou ponorného tělíska, které je založena na principu Archimédova zákona.

Pro měření byla použita analytická váha Radwag XA 310/X. Váha má odečitatelnou hmotnost 0,1 mg, opakovatelnost měření 0,2 mg a linearitu  $\pm 0,3$  mg. Součástí příslušenství váhy je sada pro měření hustoty včetně ponorného tělíska. Objem použitého tělíska je  $10,0180 \text{ cm}^3$ .



Obr.16: Váha Radwag XA 310/X [20]

Nejdříve byla změřena hmotnost ponorného tělíska ve vzduchu. Poté byla změřena hmotnost tělíska zcela ponořeného v jednotlivých vzorcích. Zároveň byla také změřena teplota vzorků při měření. Pro kontrolu měření byla také změřena hmotnost tělíska zcela ponořeného ve vodě. Z naměřených hodnot byla vypočtena hustota vzorků při daných teplotách. Pro výpočet byly použity následující vzorce:

$$\rho = \frac{A - B}{V} + d, \quad (37)$$

kde  $\rho$  je výsledná hustota vzorku,  $A$  je hmotnost ponorného tělíska ve vzduchu,  $B$  je hmotnost ponorného tělíska zcela ponořeného do vzorku,  $V$  je objem ponorného tělíska a  $d$  je hustota vzduchu určená podle vzorce:

$$d = \frac{0,0012932}{1 + 0,0036728 \cdot t} \cdot \frac{p}{1013,25}, \quad (38)$$

kde  $t$  je teplota vzduchu ve °C a  $p$  je tlak vzduchu v hPa.

Tab.4: Naměřené hodnoty hustoty jednotlivých vzorků a teploty vzorků při měření

| Vzorek            | Teplota vzorku při měření [°C] | Hustota vzorku [kg·m <sup>-3</sup> ] |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Slunečnicový olej | 24,0                           | 918,3                                |
| Sojový olej       | 25,4                           | 918,9                                |
| Olivový olej      | 24,0                           | 911,9                                |
| Paramo Trafo N-A  | 25,7                           | 863,7                                |
| Mogul Trafo CZ-A  | 25,1                           | 837,5                                |

Hustota metylesteru řepkového oleje byla získána z [10]. Použitá hodnota je 881 kg·m<sup>-3</sup> při 22,6 °C.

Výsledná hustota vody zjištěná kontrolním měřením byla 1000,0.

Z naměřených hodnot je patrné, že rostlinné oleje mají oproti minerálním vyšší hustotu.

## 6.2 Měření viskozity na vibračním viskozimetru

Vibračním viskozimetrem byla změřena teplotní závislost viskozity všech vzorků. Z důvodu možnosti kontinuálního měření viskozity byl pro měření zvolen vibrační viskozimetr S-V 10. Dalším důvodem pro volbu tohoto viskozimetru byl, že umožňuje současně s měřením viskozity měřit také teplotu vzorku. Před samotným měřením byl viskozimetr zkalibrován. Byla použita kombinace zjednodušené kalibrace a dvoubodové kalibrace. Jako jeden bod byla změřena viskozita vody, jako druhý bod, pak viskozitní standard s dynamickou viskozitou 50 mPa·s.

Před samotným měřením byly vzorky umístěny do klimatické komory, kde byly zahřáty na 120 °C. Každý vzorek byl poté umístěn do nádoby. Ta pak byla umístěna do viskozimetru. Měření probíhalo kontinuálně a v jeho průběhu teplota vzorku postupně klesala až na pokojovou teplotu. Viskozita a teplota vzorku měřená viskozimetrem byla postupně ukládána do souboru na PC. Naměřená data byla vyfiltrována, tak aby minimální krok mezi dvěma hodnotami byl 0,3 K.

Jelikož viskozimetr neměří dynamickou viskozitu, ale tzv. zdánlivou viskozitu vztahovanou na jednotkovou hustotu, bylo potřeba z naměřených hodnot dynamickou viskozitu vypočítat podle vzorce

$$\eta = \frac{\eta_{ZD}}{\rho}, \quad (39)$$

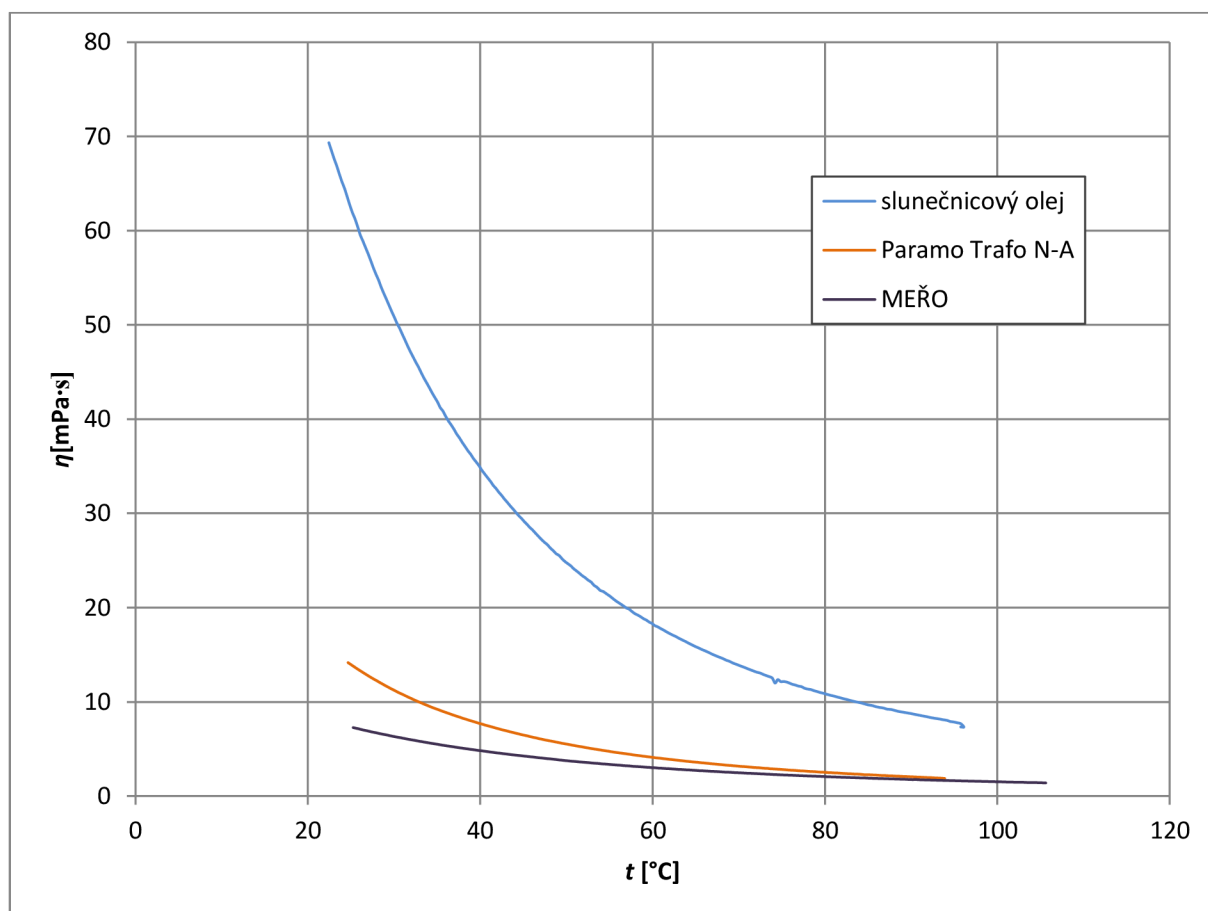
kde  $\eta$  je vypočtená dynamická viskozita,  $\eta_{ZD}$  je změřená zdánlivá viskozita a  $\rho$  je hustota vzorku při dané teplotě. Pro určení hustoty vzorků se vycházelo z dat uvedených v předchozí kapitole. Byla předpokládána konstantní hodnota součinitele teplotní objemové roztažnosti na celém intervalu teplot, na kterém byl vzorek měřen. Hustoty pro jednotlivé teploty vzorků byly určeny podle vzorce

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot (t - t_0)}, \quad (40)$$

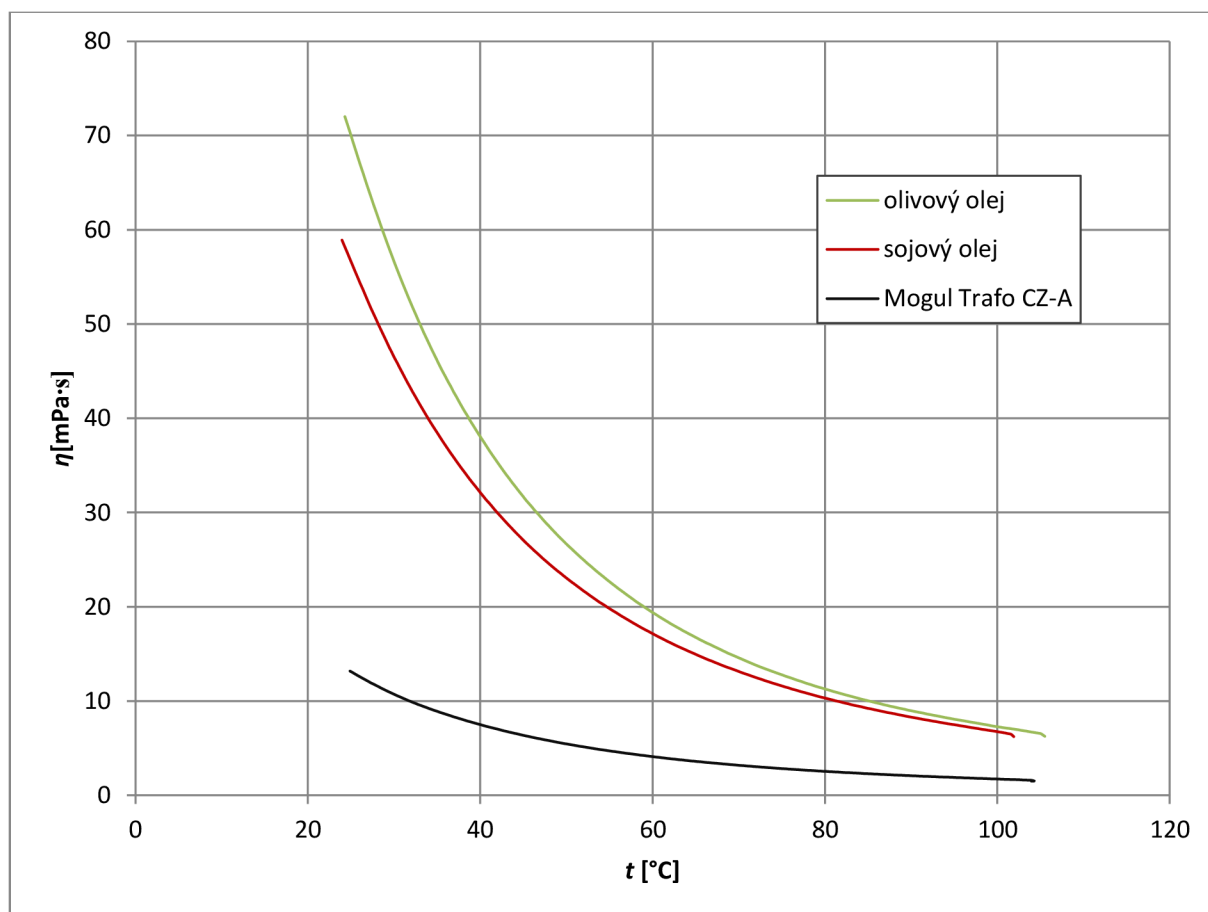
kde  $\rho$  je hustota vzorku při dané teplotě,  $\rho_0$  je změřená hustota vzorku podle Tab.3 při teplotě  $t_0$  z téže tabulky.  $\beta$  je součinitel teplotní objemové roztažnosti zjištěný z dostupných zdrojů: [27][28][29] pro rostlinné oleje, [25] pro minerální oleje a [10] pro metylester řepkového oleje.

Tab.5: Součinitelé teplotní objemové roztažnosti vzorků použité při výpočtech hustoty

| Vzorek            | $\beta$ [K <sup>-1</sup> ] |
|-------------------|----------------------------|
| Slunečnicový olej | $7,46 \cdot 10^{-4}$       |
| Sojový olej       | $7,46 \cdot 10^{-4}$       |
| Olivový olej      | $7,2 \cdot 10^{-4}$        |
| MEŘO              | $9,33 \cdot 10^{-4}$       |
| Paramo Trafo N-A  | $7,5 \cdot 10^{-4}$        |
| Mogul Trafo CZ-A  | $7,5 \cdot 10^{-4}$        |



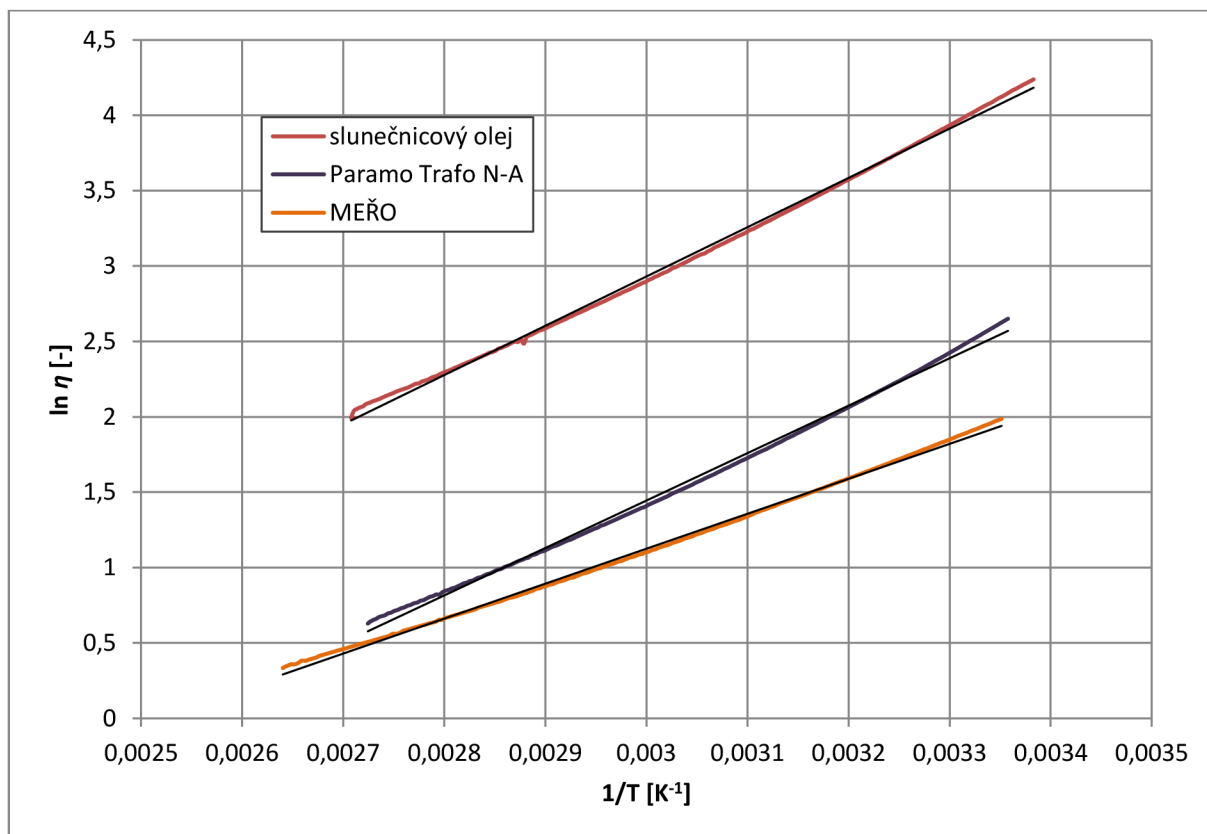
Obr.17: Změřené teplotní závislosti viskozity slunečnicového oleje, minerálního oleje Paramo Trafo N-A a metylesteru řepkového oleje



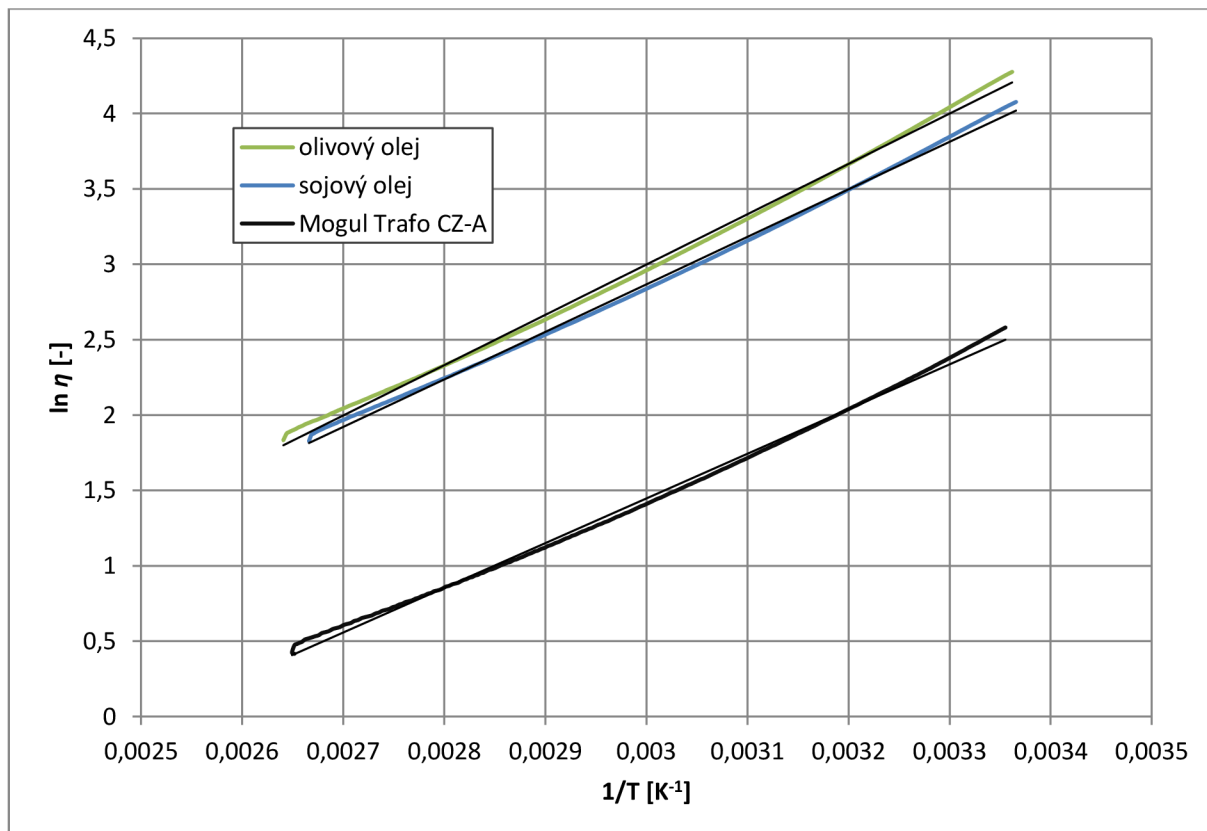
Obr.18: Změřené teplotní závislosti viskozity olivového a sojového oleje a minerálního oleje Mogul Trafo CZ-A

V kapitole 3.1 je uvedeno, uvedena rovnice (6) popisující teplotní závislost viskozity kapalin. Tato rovnice předpokládá exponenciální průběh této závislosti na převrácené hodnotě termodynamické teploty. Naměřené hodnoty byly převedeny do souřadnicového systému  $\ln \eta = f(1/T)$  ve kterém má uvedená teoretická závislost tvar přímky. Naměřenými hodnotami byla proložena přímka získaná aproximací pomocí metody nejmenších čtverců.





Obr.19: Teplotní závislosti viskozity vzorků s přímkami aproximujícími jejich průběh pro slunečnicový olej, minerální olej Paramo Trafo N-A a metylester řepkového oleje



Obr.20: Teplotní závislosti viskozity vzorků s přímkami aproximujícími jejich průběh pro olivový a sojový olej a minerální olej Mogul Trafo CZ-A

Tab.6: Rovnice exponenciál odpovídajících teplotním závislostem viskozity měřených vzorků

| Vzorek            | Rovnice přímky získané aproximací      |
|-------------------|--|
| Slunečnicový olej | $\ln \eta = \frac{3268,7}{T} - 6,8762$ |
| Sojový olej       | $\ln \eta = \frac{3152,7}{T} - 6,5909$ |
| Olivový olej      | $\ln \eta = \frac{3338,6}{T} - 7,0170$ |
| MEŘO              | $\ln \eta = \frac{2319,0}{T} - 5,8317$ |
| Paramo Trafo N-A  | $\ln \eta = \frac{3146,9}{T} - 7,9961$ |
| Mogul Trafo CZ-A  | $\ln \eta = \frac{2966,2}{T} - 7,4512$ |

Uvedené rovnice lze jednoduše upravit na rovnice ve tvaru (7). Další úpravou na rovnici ve tvaru (6) lze získat vzorec pro výpočet aktivační energie vzorků.

$$\ln \eta = \frac{A}{T} + B \quad (41)$$

$$\eta = e^B e^{\frac{A}{T}} \quad (42)$$

Porovnáním s rovnicí (6) je patrné, že výraz  $e^B$  představuje limitní viskozitu  $\eta_0$  a výraz  $e^{\frac{A}{T}}$  odpovídá výrazu  $e^{\frac{E}{R \cdot T}}$ . Platí tedy:

$$e^{\frac{A}{T}} = e^{\frac{E}{R \cdot T}} \quad (43)$$

$$\frac{A}{T} = \frac{E}{R \cdot T} \quad (44)$$

$$E = \frac{A \cdot R \cdot T}{T} \quad (45)$$

$$E = A \cdot R \quad (46)$$

Ze vzorce (46) byly vypočteny hodnoty aktivační energie měřených vzorků. Pro výpočty byla použita hodnota molární plynové konstanty  $R = 8,3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Tab.7: Vypočtené hodnoty aktivačních energií vzorků.

| Vzorek            | $E$ [kJ·mol <sup>-1</sup> ] |
|-------------------|-----------------------------|
| Slunečnicový olej | 27,2                        |
| Sojový olej       | 26,2                        |
| Olivový olej      | 27,8                        |
| MEŘO              | 19,3                        |
| Paramo Trafo N-A  | 26,2                        |
| Mogul Trafo CZ-A  | 24,7                        |

### 6.3 Měření viskozity na Höpplerově viskozimetru

Pro kontrolu dat naměřených vibračním viskozimetrem byla změřena při určitých teplotách viskozita vybraných vzorků také Höpplerovým viskozimetrem. Pro měření byl použit Höpplerův viskozimetr Köppler KF 3.2. Jeho přednostmi jsou vysoká přesnost měření a také možnost přesného řízení teploty média.

Tab.8: Vlastnosti viskozimetru Höppler KF 3.2

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Rozsah měření                        | 0,6 až 70 000 mPa·s                       |
| Čas kuličky                          | 30 až 300s a výše                         |
| Přesnost/relativní chyb měření       | 0,5 až 2% v závislosti na průměru kuličky |
| Rozsah teploty                       | -60 až +150 °C                            |
| Množství vzorku                      | 40 ml                                     |
| Sklon osy válce od vertikální roviny | 10°                                       |



Obr.21: Vibrační viskozimetr Höppler KF 3.2 [15]

Součástí Höpplerova viskozimetru je také sada šesti kuliček. Použity byly kuličky č.1 a č.2. Obě jsou vyrobeny z křemičitého skla, jehož součinitel teplotní objemové roztažnosti je o řád

menší než součinitel teplotní objemové roztažnosti vzorků. Teplotní roztažnost kuličky tedy mohla být při měření zanedbána.

Tab.9: Parametry kuliček použitých při měření viskozity

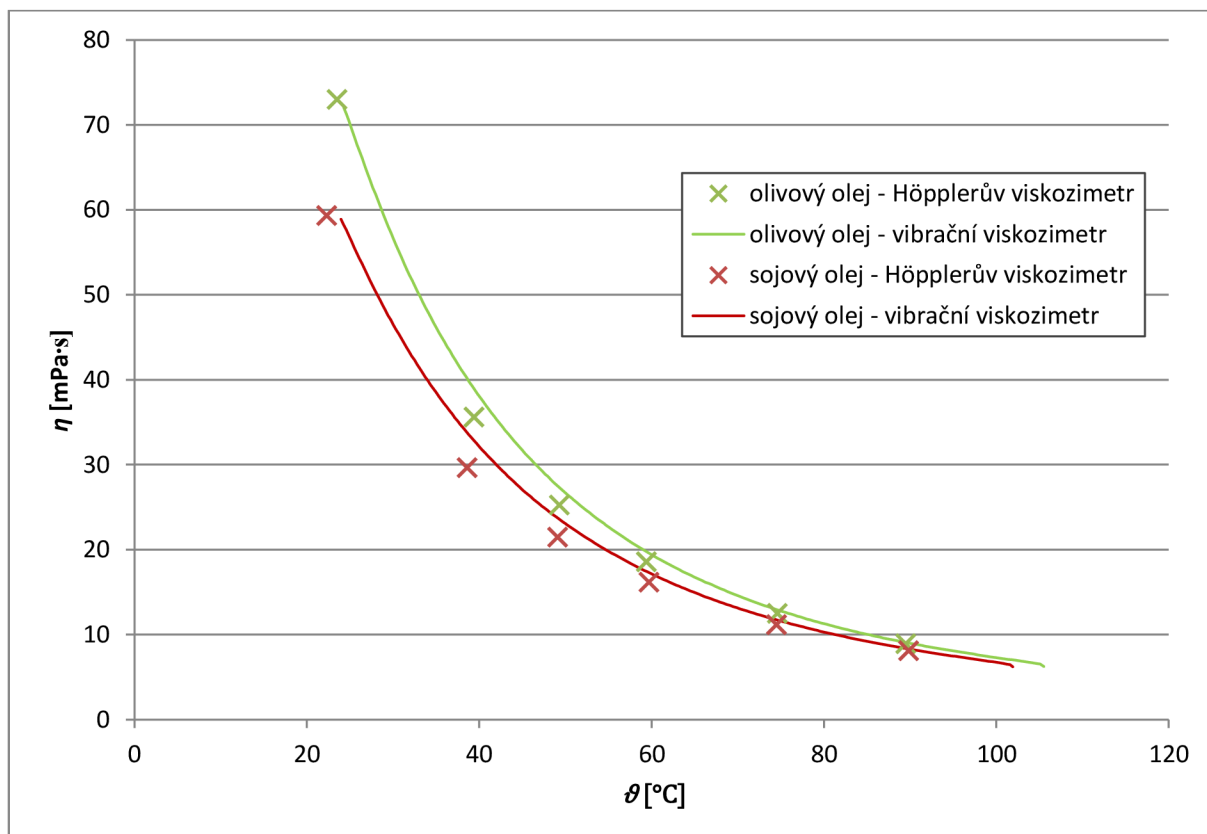
| Číslo kuličky  | 1          | 2          |
|--|------------|------------|
| Průměr [mm]  | 15,805     | 15,6364    |
| Hmotnost [g]   | 4,5988     | 4,4565     |
| Konstanta shora [ $\text{mPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ] | 0,0097964  | 0,074017   |
| Konstanta zdola [ $\text{mPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ] | 0,0097974  | 0,074020   |
| Min. pádový čas [s]  | 60         | 30         |
| Rozsah měření [ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ]                        | 0,6 až 5   | 3 až 30    |
| Přesnost při +20°C [%]   | $\leq 2$   | $\leq 0,5$ |
| Reprodukovatelnost [%]   | $\pm 1,00$ | $\pm 0,25$ |

Höpplerovým viskozimetrem bylo provedeno měření dynamické viskozity slunečnicového, sojového a olivového oleje a minerálního oleje Paramo Trafo N-A. Viskozita byla měřena při pokojové teplotě a teplotách 40, 50, 60, 75 a 90 °C. Před každým měřením byla teplota vzorku ustálena po dobu asi patnácti minut. Během této doby vzorek promícháván pádem měřicí kuličky. Viskozimetr má ryskami vyznačenou dráhu, na které se měří doba pádu kuličky. Doba pádu byla měřena stopkami s přesností na setiny sekundy. Teplota vzorků byla měřena teploměrem po ustálení teploty přibližně ve středu válcové nádoby se vzorkem.

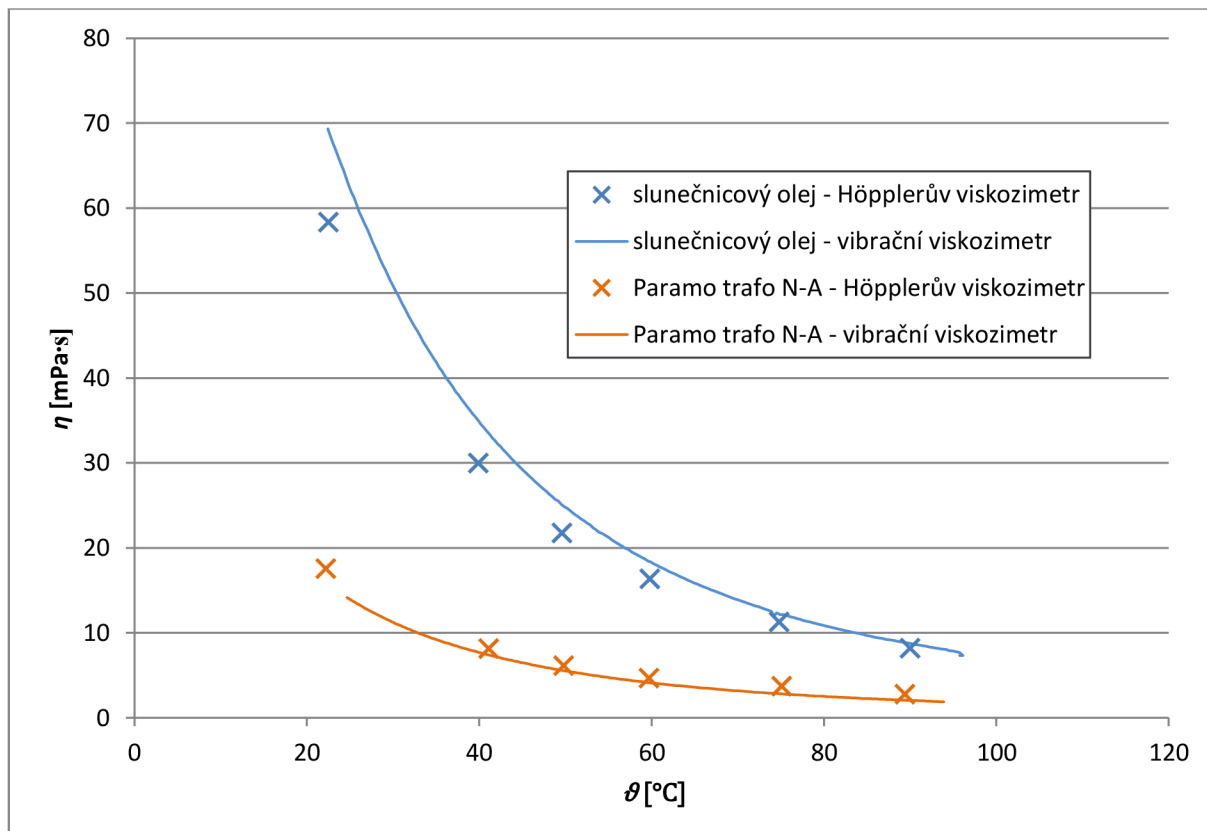
Výsledná dynamická viskozita byla určena z doby pádu kuličky podle vzorce

$$\eta = t \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot K, \quad (47)$$

kde  $t$  je doba pádu měřicí kuličky,  $\rho_1$  je její hustota,  $\rho_2$  je hustota vzorku při dané teplotě a  $K$  je konstanta viskozimetru pro danou kuličku a daný směr pádu uvedená v Tab.8. Hustota měřicí kuličky byla vypočtena z jejího průměru a hmotnosti, které byly uvedeny v certifikačním listu viskozimetru. Hustota vzorků při daných teplotách byla určena obdobně jako při měření na vibračním viskozimetru z naměřených hodnot při pokojové teplotě (kapitola 6.1) a ze součinitelů teplotní objemové roztažnosti uvedených v Tab.4.



Obr.22: Porovnání teplotních průběhů viskozity olivového a sojového oleje změřených vibračním a Höpplerovým viskozimetrem



Obr.23: Porovnání teplotních průběhů viskozity slunečnicového oleje a minerálního oleje Paramo trafo N-A změřených vibračním a Höpplerovým viskozimetrem

## 7 Závěr

V diplomové práci je uvedena základní klasifikace elektroizolačních olejů z hlediska jejich složení. Byly popsány nejvýznamnější vlastnosti těchto kapalin potřebné v běžné praxi. Dále byly uvedeny současné trendy ve výzkumu perspektivních elektroizolačních kapalin. Byly popsány fyzikální základy viskozity a hustoty kapalin a jejich závislosti na teplotě a metody jejich měření.

Bylo vybráno šest vzorků elektroizolačních kapalin pro měření jejich teplotní závislosti dynamické viskozity. Jako zástupci perspektivních biologicky odbouratelných kapalin byly vybrány slunečnicový, sojový a olivový olej a metylester řepkového oleje. Aby bylo možné jejich vlastnosti porovnat se v současnosti nejpoužívanějšími minerálními oleji, byly pro měření vybrány také minerální transformátorové oleje Paramo Trafo N-A a Mogul trafo CZ-A. Pro měření teplotní závislosti dynamické viskozity vzorků byl vybrán vibrační viskozimetr SV-10. Pro ověření výsledků bylo na některých vzorcích dále provedeno měření dynamické viskozity Höpplerovým viskozimetrem. Protože pro výpočet dynamické viskozity z naměřených dat jak vibračním, tak Höpplerovým viskozimetrem je potřebná znalost hustoty vzorků, byla tato změřena také.

Měření hustoty bylo provedeno při pokojové teplotě. Zvolena byla metoda ponorného tělíska fungující na základě Archimédova zákona. Z naměřených hodnot vyplývá, že hustota všech změřených rostlinných olejů je podobná a je znatelně vyšší než hustota minerálních olejů. Tato vlastnost se při případném použití těchto rostlinných olejů jakožto elektroizolačních kapalin v transformátoru projeví zvýšenou hmotnostní celého transformátoru. Toto je zcela určitě negativní jev, nicméně nezabraňuje využití rostlinných olejů jako elektroizolačních kapalin v transformátorech. Hustota metylesteru řepkového oleje je oproti rostlinným olejům nižší a podobná hustotě minerálních olejů.

Vibračním viskozimetrem byla měřena teplotní závislost dynamické viskozity všech vzorků na rozsahu teplot přibližně 25 - 90 °C. Vzorky byly před měřením vyhřátý v klimatické komoře na teplotu 120 °C a v průběhu měření vychlázávaly na pokojovou teplotu. Jelikož použitý vibrační viskozimetr neměří dynamickou viskozitu, ale zdánlivou viskozitu, byly naměřené hodnoty přepočítány pomocí změřených hodnot hustoty a součinitelů teplotní objemové roztažnosti zjištěných z dostupných zdrojů. Z výsledků měření vyplývá, že dynamická viskozita rostlinných olejů je výrazně vyšší než dynamická viskozita minerálních olejů. Tato vlastnost se projeví negativně na chladicí funkci rostlinných olejů v transformátoru, protože způsobí omezení cirkulace oleje a tím i zhoršení schopnosti odvádět teplo. Tento jev bude třeba vzít v potaz při případném návrhu transformátoru, který by jako elektroizolační kapalinu využíval rostlinný olej, a to zejména pokud by bylo předpokládáno použití za nízkých teplot, protože rozdíl mezi viskozitami rostlinných a minerálních olejů s klesající teplotou dále roste. Nejnevhodnější z tohoto pohledu se jeví olivový olej, který dosahoval na měřeném rozsahu teplot nejvyšší dynamické viskozity. Dynamická viskozita metylesteru řepkového oleje se naopak na měřeném rozsahu ukázala být oproti minerálním olejům mírně nižší. Z tohoto pohledu by tedy metylester řepkového oleje mohl být jako elektroizolační kapalina použit.

Ze změřených průběhů dynamické viskozity byla také vypočtena aktivační energie vzorků. Nejvyšší aktivační energii mají olivová a slunečnicový olej. Mírně nižší je aktivační energie sojového oleje a minerálních olejů. Znatelně nižší aktivační energii pak má metylester řepkového oleje.

Mezi dynamickým viskozitami změřenými vibračním a Höpplerovým viskozimetrem byly menší odchylky, zejména u slunečnicového oleje. V případě rostlinných olejů byly hodnoty změřené vibračním viskozimetrem vždy vyšší. Z hlediska metody je obecně měření Höpplerovým viskozimetrem oproti vibračním přesnější, proto pravděpodobně vznikly odchylky především při měření vibračním viskozimetrem. Jejich zdrojem byla především nižší přesnost přístroje a pokles hladiny oleje v průběhu měření vlivem odpařování a teplotní roztažnosti.

Z naměřených hodnot vyplývá, že z hlediska viskozity a hustoty jsou rostlinné oleje pro použití v transformátorech jako elektroizolační kapaliny méně vhodné než minerální oleje. Jejich vlastnosti ale nejsou natolik horší, aby bylo toto jejich použití znemožněno. Ke zlepšení těchto vlastností by mohlo dojít pomocí vhodné rafinace rostlinných olejů, jak je ukázáno na změřených hodnotách metylesteru řepkového oleje. Důležité je ale také poznamenat, že hustota a dynamická viskozita je pouze část z vlastností významných pro elektroizolační kapaliny a velmi významnou roli při rozhodování o jejich uplatnění budou hrát také jejich elektrické vlastnosti a ekologická šetrnost a biologická odbouratelnost.

## 8 Použitá literatura

- [1] AMANULLAH, M., Syed M. ISLAM, Samer CHAMI, Gary IENCO. *Analyses of electro-Chemical Characteristics of Vegetable oils as an Alternative Source to Mineral Oil-based Dielectric Fluid*. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1490101&isnumber=32026>
- [2] BERTRAND, Yves. *Development of a low viscosity insulating fluid based on vegetable oil*. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6251501&isnumber=6250708>
- [3] CODEX STAN 210-1999. *Codex Standard for Named Vegetable Oils*. 2011. Dostupné z: [http://www.codexalimentarius.org/input/download/standards/336/CXS\\_210e.pdf](http://www.codexalimentarius.org/input/download/standards/336/CXS_210e.pdf)
- [4] CODEX STAN 33-1981. *Codex Standard for Olive Oils and Olive Pomace oils*. 2009. Dostupné z: [www.codexalimentarius.org/input/download/standards/88/CXS\\_033e.pdf](http://www.codexalimentarius.org/input/download/standards/88/CXS_033e.pdf)
- [5] DRÁBKOVÁ S. *Mechanika tekutin* [on-line]. Ostrava 2007 [cit. 2013-03-13]. 260 s. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [6] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin* [on-line]. Ostrava, 2010 [cit. 2013-03-23]. 62 s. Syllabus předmětu. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. Dostupné z: [www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf)
- [7] ESB ELEKTRICKÉ STROJE A.S. *Regenerace transformátorových a turbínových olejů* [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [8] JAHODA. *Mechanika tekutin: Fyzikální vlastnosti tekutin* [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/uchi/ped/hydoteplo/materialy/vlastnosti\\_tekutin.pdf](http://www.vscht.cz/uchi/ped/hydoteplo/materialy/vlastnosti_tekutin.pdf)
- [9] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2013-03-06]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [10] 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.
- [11] KADLEC, K. *Měřicí technika* [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmoodle.vscht.cz%2Fpluginfile.php%2F6967%2Fmod\\_resource%2Fcontent%2F3%2FMRT\\_2013-Koncentrace\\_H.pdf%3Fforcedownload%3D1&ei=tyynUb6MC4vy7AbarICoCw&usg=AFQjCNF8CVLcj2Ux4rL9pw\\_kxKxwq2ySiQ&bvm=bv.47244034,d.ZGU&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmoodle.vscht.cz%2Fpluginfile.php%2F6967%2Fmod_resource%2Fcontent%2F3%2FMRT_2013-Koncentrace_H.pdf%3Fforcedownload%3D1&ei=tyynUb6MC4vy7AbarICoCw&usg=AFQjCNF8CVLcj2Ux4rL9pw_kxKxwq2ySiQ&bvm=bv.47244034,d.ZGU&cad=rja)



- [12] kf.upce.cz [online]. [cit. 2013-03-14] Dostupné z: [kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc](http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc)
- [13] KVITEK, Emil. *Materiály pro elektrotechniku* [online]. Pardubice, 2007 [cit. 2013-04-05]. 63 s. Učební text. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dostupné z: [www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/IMPEE/Skripta\\_materialy.pdf](http://www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/IMPEE/Skripta_materialy.pdf).
- [14] *Laboratorní vybavení, potřeby, technika a chemikálie : Viskozimetr vibrační SV-1A, SV-10, SV-100* [online]. 2011 [cit. 2011-05-02]. VITRUM. Dostupné z [www: <http://www.vitrum.cz/viskozimetr-vibracni-sv-1a-sv-10-sv-100\\_k773\\_p1919.html>](http://www.vitrum.cz/viskozimetr-vibracni-sv-1a-sv-10-sv-100_k773_p1919.html).
- [15] *Laboratoře UETE : Měřicí přístroje* [online]. 2011 [cit. 2011-04-26]. Laboratoře UETE. Dostupné z [www: <http://laboratore.uefe.vutbr.cz/?id=merici-pristroje&str=9&device=20 >](http://laboratore.uefe.vutbr.cz/?id=merici-pristroje&str=9&device=20).
- [16] MARCI M., I. KOLCUNOVÁ a J. KURIMSKÝ. *Dielectric properties of natural esters*. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5874663&isnumber=5874563>
- [17] *Mogul Trafo CZ-A: Technické informace*. Dostupné z: [http://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti\\_trafo\\_cza.pdf](http://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_trafo_cza.pdf)
- [18] *Paramo Trafo N-A: Technické informace*. Dostupné z: [http://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti\\_paramo\\_trafo\\_na.pdf](http://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_paramo_trafo_na.pdf)
- [19] PŘIBYL, P. *Analýza kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc
- [20] RADWAG. *Váhy laboratorní, analytické - váhy RADWAG* [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.vahy-radwag.cz/>
- [21] REŇÁK, L. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [22] 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.
- [23] STRAŇÁKOVÁ, E. *Vlastnosti a viskozita pryskyřic založených na bázi bisfenolu a s ohledem na podnikovou praxi*. Brno, 2011. 42s. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/175999/prif\\_r/Rigorozni\\_prace\\_final.pdf](http://is.muni.cz/th/175999/prif_r/Rigorozni_prace_final.pdf)
- [24] ŠIMKOVÁ, M. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010. 155 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Hammer M., CSc.
- [25] SubsTech: Substances and Technologies. [online]. [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mineral\\_transformer\\_oil](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mineral_transformer_oil)

- [26] Test certificate for viscometer. *RHEOTEST Messgeräte Medinhen GmbH : HÖPPLER KF*. 02.03.2010. 2 s. 09/0429.
- [27] Transport information service (TIS): Olive oil. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: [http://www.tis-gdv.de/tis\\_e/ware/oele/oliven/oliven.htm](http://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/oele/oliven/oliven.htm)
- [28] Transport information service (TIS): Soy oil. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: [http://www.tis-gdv.de/tis\\_e/ware/oele/soja/soja.htm](http://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/oele/soja/soja.htm)
- [29] Transport information service (TIS): Sunflower oil. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: [http://www.tis-gdv.de/tis\\_e/ware/oele/sonnenbl/sonnenbl.htm](http://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/oele/sonnenbl/sonnenbl.htm)
- [30] VAŠMUCIUS, A. *Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech*. Plzeň, 2012. 41 s. Dostupné z: [https://portal.zcu.cz/wps/PA\\_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=47427](https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=47427). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [31] VUKOVIČ Dejan, et al. *Comparative Experimental Study of Dielectric Strength of Oil-cellulose Insulation for Mineral and Vegetable-based Oils*. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6251503&isnumber=6250708>
- [32] Základové oleje - Oleje.cz. [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Zakladove-oleje>