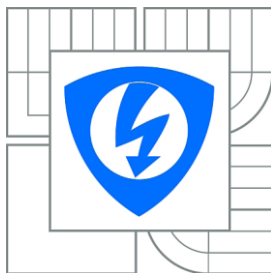


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

ANALÝZA REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ROSTLINNÝCH OLEJŮ A JEJICH SLOŽEK

ANALYSIS OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VEGETABLE OILS AND
THEIR COMPONENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

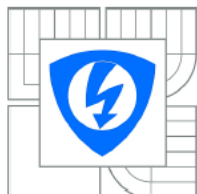
Bc. PETR DIVÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2014



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 Divílek
Ročník: 2

ID: 106402
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza reologických vlastností rostlinných olejů a jejich složek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled elektroizolačních olejů používaných v elektrotechnickém průmyslu, včetně novodobých, biologicky odbouratelných kapalin, které postupně nabývají na významu. Uveďte hlavní požadavky na jejich vlastnosti. Sepište literární rešerši pojednávající o současném stavu výzkumu v oblasti využití a diagnostiky vlastností organických rostlinných olejů a jejich složek v technické praxi. Prostudujte fyzikální podstatu dynamické viskozity a vytvořte přehled diagnostických metod pro její sledování, včetně rozboru jejich principu.

Upravte a automatizujte měřicí pracoviště pro sledování dynamické viskozity a hustoty kapalných materiálů v širokém teplotním rozsahu. Na různých vzorcích elektroizolačních kapalin, rostlinných olejů a zejména jejich jednotlivých složek v podobě vyšších mastných kyselin a esterů, proměřte teplotní závislosti viskozity a hustoty. Výsledky matematicky vyhodnoťte a fyzikálně interpretněte. Dosažené hodnoty vybraných materiálových veličin u alternativních kapalin a jejich složek porovnejte s hodnotami obvyklými pro minerální oleje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá teoretickým rozбором rostlinných olejů, minerálních olejů a syntetických kapalin a následně měřením hustoty a viskozity vybraných vzorků elektroizolačních kapalin. Práce je z velké části zaměřena na rostlinné oleje a jejich složky zvané mastné kyseliny. Ty jsou podrobněji popsány v samostatných kapitolách. Jsou zde uvedeny využití v technické praxi s detailnějším zaměřením na energetiku, kde se rostlinné oleje začínají používat ve větším měřítku. V experimentální část je zaměřena na měření hustoty a dynamické viskozity. Viskozita se měřila na dvou přístrojích a to na Höpplerově viskozimetru a na vibračním viskozimetru. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a zpracovány do tabulek a grafů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rostlinné oleje, minerální oleje, syntetické oleje, mastné kyseliny, nasycené mastné kyseliny, nenasyčené mastné kyseliny, olivový olej, MEŘO, MOGUL trafo D, slunečnicový olej, sojový olej, kyselina olejová, kyselina linolová, rýžový olej, hustota, dynamická viskozita, kinematická viskozita, teplota, bod hoření, bod tuhnutí.

ABSTRACT

This Master's thesis is dealing with theoretical analysis of vegetable, mineral oils and synthetic fluids, and with measuring of density and viscosity of selected samples of electric insulating fluids. The main part of the thesis is focused on vegetable oils and their elements called fatty acids. Those are more detail described in separate capitols. In those capitols is described their utilization in engineering practice with focus on energetics, where vegetable oils are used in larger scale. In experimental part of the work is measurement of density and dynamic viscosity. Viscosity was measured on two different machines, first the Hoppler viscometer and on vibrating viscometer. Results of these measurement are evaluated in tables and graphs.

KEYWORDS

Vegetable oils, minerals oils, synthetic oils, fatty acid, saturated fatty acids, non-fatty acids, olive oil, MEŘO, MOGUL transformer D, sunflower oil, soybean oil, oleic acid, linoleate acid, rice oil, density, dynamic viscosity, kinematic viscosity, teperature, fire point, pure point.

Bibliografická citace díla:

DIVÍLEK, Petr. *Kapalné organické estery v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 33 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma analýza reologických vlastností rostlinných olejů a jejich složek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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 nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29.5.2014

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1. ROSTLINNÉ OLEJE	10
1.1 SOUČASNÝ STAV DISTRIBUCE ROSTLINNÝCH OLEJŮ	11
1.2 PŘÍKLADY VEŘEJNĚ DOSTUPNÝCH ROSTLINNÝCH OLEJŮ.....	12
1.3 SLOŽKY ROSTLINNÝCH OLEJŮ	15
1.3.1 <i>Nenasycené mastné kyseliny</i>	16
1.3.2 <i>Nasycené mastné kyseliny</i>	17
1.4 ROSTLINNÉ OLEJE V TECHNICKÉ PRAXI.....	19
1.5 ROSTLINNÉ OLEJE PRO ENERGETIKU	20
1.6 ROSTLINNÉ OLEJE POUŽÍVANÉ V TRANSFORMÁTORECH	21
1.6.1 <i>Envirotemp FR3 Fluid</i>	21
1.6.2 <i>BIOTEMP</i>	22
2. TEPELNÁ STABILITA ROSTLINNÝCH OLEJŮ	23
2.1 ROSTLINNÝ OLEJ PŘI VYŠŠÍCH TEPLOTÁCH.....	23
2.2 OXIDAČNÍ STABILITA ROSTLINNÝCH OLEJŮ	24
3. MINERÁLNÍ OLEJE	25
4. SYNTETICKÉ KAPALINY	27
4.1 SYNTETICKÉ KAPALINY NA ORGANICKÉ BÁZI.....	29
4.1.1 <i>MIDEL 7131</i>	29
4.2 MIDEL EN.....	29
5. DŮLEŽITÉ VLASTNOSTI OLEJŮ	30
6. MĚŘENÍ KAPALIN	31
6.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KAPALIN	31
6.2 NEELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KAPALIN	32
6.2.1 <i>Hustota kapalin</i>	32
6.2.2 <i>Viskozita kapalin</i>	34
6.3 METODY MĚŘENÍ VSKOZITY	37
6.3.1 <i>Rotační viskozimetry</i>	37
6.3.2 <i>Pádové viskozimetry</i>	39
6.3.3 <i>Vibrační viskozimetry</i>	40
6.3.4 <i>Průtokové viskozimetry</i>	41

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
7.1 MĚŘENÍ HUSTOTY RŮZNÝCH VZORKŮ OLEJŮ	42
7.1.1 <i>Výsledky</i>	47
7.2 MĚŘENÍ VSKOZITY RŮZNÝCH VZORKŮ OLEJŮ	47
7.2.1 <i>Měření pomocí vibračního viskozimetru</i>	47
7.2.2 <i>Výsledky</i>	56
7.3 MĚŘENÍ POMOCÍ HÖPPLEROVA VSKOZIMETRU	56
7.3.1 <i>Měření dynamické viskozity oleje MEŘO</i>	57
7.3.2 <i>Měření dynamické viskozity sojového oleje</i>	58
ZÁVĚR	62
LITERATURA.....	64
PŘÍLOHY	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1) Produkce olejnin v Evropě.....	11
Obrázek 2) Postup výroby oleje MEŘO	14
Obrázek 3) Struktura triglyceridu	16
Obrázek 4) Struktura kyseliny olejové	16
Obrázek 5) Struktura kyseliny linolové	17
Obrázek 6) Struktura kyseliny linolenové	17
Obrázek 7) Struktura kyseliny palmitové	17
Obrázek 8) Struktura kyseliny laurové	18
Obrázek 9) Struktura kyseliny stearové.....	18
Obrázek 10) Zkoušky PFVO na čtyřech vzorcích olejů [44]	22
Obrázek 11) Bod vzplanutí a hoření minerálního oleje a přírodního esteru [43].....	24
Obrázek 12) Příklad řetězce alkanu [21]	25
Obrázek 13) Příklad struktury cykloalkanů [22]	26
Obrázek 14) Příklad struktury naftalenu [20]	26
Obrázek 15) Příklad struktury polydimethylsiloxanu.....	28
Obrázek 16) Měření hustoty pomocí hustoměru [3].....	33
Obrázek 17) Váha na měření hustoty pomocí ponorného tělíska [3]	33
Obrázek 18) Ultrazvukový hustoměr.....	34
Obrázek 19) Vznik smykového napětí v tekutině podle Newtona [9].....	35
Obrázek 20) Základní typ rotačního viskozimetru	38
Obrázek 21) Různé úpravy rotačních viskozimetrů	38
Obrázek 22) Pádový Höpplerův viskozimetr [9].....	39
Obrázek 23) Složení vibračního viskozimetru.....	41
Obrázek 24) Průtokové kapilární viskozimetry [9]	41
Obrázek 25) Zařízení na měření váhy pomocí ponorného tělíska Radwag XA 310/X (nahore) a termostat HUBERT Pilot one (dole)	42
Obrázek 26) Závislost hustoty kapalin na teplotě všech vzorků změřených na vahách..	45
Obrázek 27) Závislost hustoty olejů (bodově) a hustot vypočítané pomocí aproximace (přímka).....	46

Obrázek 28) Vibrační viskozimetr SV-10	48
Obrázek 29) Závislost dynamické viskozity na teplotě pro všechny vzorky	49
Obrázek 30) Závislost dynamické viskozity na změně teploty pro rýžový, mogul, MEŘO olej a kyselinu linolovou	51
Obrázek 31) Závislost dynamické viskozity na změně teploty pro sojový, olivový, slunečnicový olej a pro kyselinu olejovou	51
Obrázek 32) Závislost logaritmu dynamické viskozity kys. olejové na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	52
Obrázek 33) Závislost logaritmu dynamické viskozity rýžového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	52
Obrázek 34) Závislost logaritmu dynamické viskozity sojového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	53
Obrázek 35) Závislost logaritmu dynamické viskozity olivového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	53
Obrázek 36) Závislost logaritmu dynamické viskozity slunečnicového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou	54
Obrázek 37) Závislost logaritmu dynamické viskozity kyseliny linolové na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	54
Obrázek 38) Závislost logaritmu dynamické viskozity mogulu trafo D na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	55
Obrázek 39) Závislost logaritmu dynamické viskozity mogulu trafo D na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou.....	55
Obrázek 40) Hustota MEŘO a sojového oleje v závislosti na teplotě.....	60
Obrázek 41) Závislost dynamické viskozity na teplotě pro MEŘO a sojový olej.....	60
Obrázek 42) Závislost kinematické viskozity na teplotě pro MEŘO a sojový olej.....	61

ÚVOD

Rostlinné oleje jsou známy tím, že se využívají v potravinářském průmyslu. Můžeme je najít v každé domácnosti, kde se používají především jako přísady do jídel či na smažení. Používají se i jako přísada do kosmetiky anebo k farmaceutickým účelům. Dále jsou rostlinné oleje spojovány s bionaftou. Je to především řepka olejka, ze které se vyrábí olej zvaný MĚŘO. Ten může samostatně sloužit jako palivo nebo se mísí společně s naftou.

To, že se rostlinné oleje používají i v elektrotechnice už tolik známé není. V oboru elektrotechniky a energetiky se vědci a výrobci snaží nahrazovat leckdy drahé a hlavně toxické syntetické kapaliny, kapalinami netoxickými a hlavně biologicky odbouratelnými čehož lze dosáhnout právě rostlinnými oleji.

V současné době se rostlinné oleje začínají využívat hlavně v energetice, kde ekologické havárie přinutily provozovatele trafo stanic začít používat jiné než toxické médium. Havárie nejsou jediným důvodem proč se přechází na kapalinu přírodního původu. Rostlinné oleje mají mnoho výhod, které jsou nejen v případě havárie biologicky odbouratelné, ale pomáhají izolovat a ošetřovat papír, který je v transformátoru použit. Další výhodou může být např. daleko vyšší tepelná stabilita oleje, čímž se snižuje riziko vzniku požárů, které byly příčinou již zmiňovaných ekologických havárií.

Velmi důležitými parametry rostlinných olejů jsou jejich elektrotechnické veličiny, které hrají velkou roli při použití kapaliny v elektrotechnice nebo energetice. V této práci budou změřeny a rozebrány neelektrické veličiny vybraných druhů kapalin.

1. ROSTLINNÉ OLEJE

Rostlinné oleje jsou směsí esterů, glycerinů a mastných kyselin. Vyrábí se z lisovaných semen rostlin, které jsou na výrobu oleje předurčeny, je to zejména řepka, kukuřice, sója, ricin, len apod. Nečastěji se s nimi setkáme v potravinářském průmyslu. Obsahují látky, které jsou neodmyslitelnou součástí životosprávy každého člověka.

Z pohledu elektrotechniky jsou dobrou alternativou namísto minerálních a syntetických olejů. Mají výborné mazací schopnosti na úkor horší oxidačně tepelné stability.

Obrovskou výhodou je potom jejich ekologická odbouratelnost, tudíž mají široké spektrum použití. Je to především způsobeno tím, že rostlinné oleje neobsahují halogeny, polynukleární aromatické látky, těkavé nebo polo-těkavé organické látky a jiné sloučeniny, které mohou být přítomny v minerálních olejích a případně i v jiných dielektrických kapalinách [16].

Velkou nevýhodou je absorpce vody za nízkých teplot, oleje potom vykazují horší vlastnosti.

V elektrotechnice se nejčastěji používají jako impregnace do papírových kondenzátorů, na výrobu elektrotechnických laků, aditiv a v současné době i jako chlazení u výkonových transformátorů.

Jedno z mnoha dělení rostlinných olejů je na vysychavé rostlinné oleje a na nevysychavé rostlinné oleje.

Vysychavé rostlinné oleje

Do této skupiny patří např. makový olej, lněný, tungový a dřevný. Patří mezi oleje termoreaktivní, tedy oleje, které na vzduchu za působení tepla přechází do tuhého stavu. Tato vytvrzená (ztuhlá) hmota má dobré elektrické vlastnosti, je odolná vůči rozpouštědlům a neměkne při zahřátí.

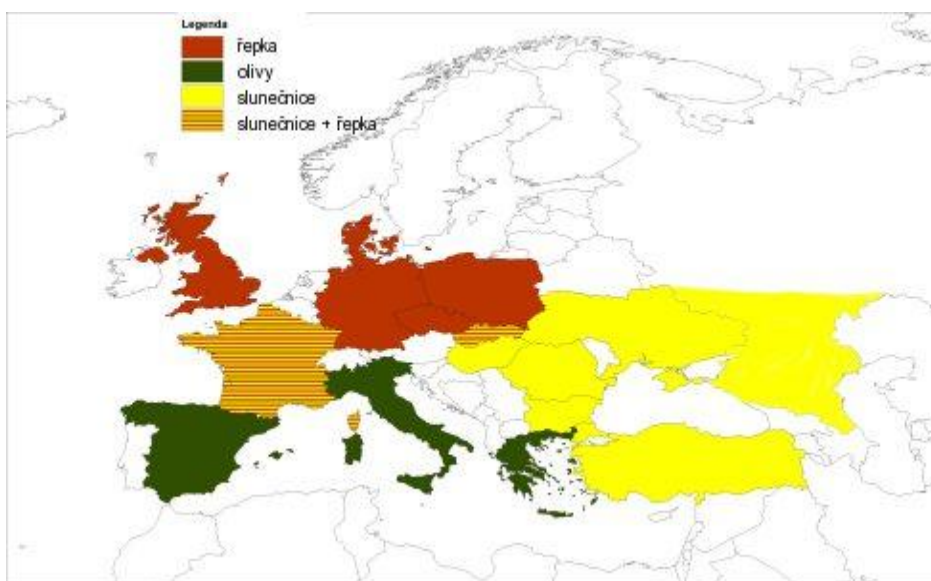
Nevysychavé rostlinné oleje

Patří sem olej olivový, řepkový, slunečnicový a ricinový. Jsou to oleje, které zachovávají své tekuté vlastnosti. Používají se jako kapalné izolanty a k napouštění papírových kondenzátorů ve stejnosměrných obvodech. Obecně mají širší pole působení než oleje vysychavé.

1.1 Současný stav distribuce rostlinných olejů

Podle údajů USDA (Foreign agricultural Service) – zahraniční zemědělské služby, bylo v roce 2012/2013 zaseto 472,6 mil. tun nejsledovanějších druhů olejnin. K těmto druhům patří sója, řepka, semeno bavlníku, podzemnice olejná, slunečnice, palmová jádra a kopra. Z celkového zasetého množství bylo sklizeno zhruba 160 mil. tun rostlinného oleje, ostatní výrobky z rostlin byly použity na pokrutiny a extrahované šroty. Nejvýznamnějšími vývozci olejnin v roce 2012/13 byly Brazílie, Spojené státy, Kanada a Argentina. Mezi rostlinnými oleji je na prvním místě palmový olej, který zaujímá 25% celosvětové produkce rostlinných olejů. Jeho výroba se nejčastěji nachází v jihovýchodní Asii a to v Indonésii a Malajsii.

V loňském roce v ČR zaujímaly olejnin 19 % orné půdy a to převážně řepka olejka, které se v minulém roce dařilo (bylo sklizeno zhruba o 2,3 % více než v předloňském roce). Předpokládá se, že vývoz této rostliny bude nadále stoupat. Dalšími rostliny, které se u nás pěstují na olej jsou slunečnice a mák a v menším množství potom sojové boby, len a hořčice. Pro další rok se předpokládá nárůst pěstování olejnin o 3,4 %.



Obrázek 1) Produkce olejnin v Evropě

V tuzemsku bylo v minulém roce spotřebováno 550 tis. tun řepkového semene pro výrobu metyl-esteru řepkového oleje (MEŘO). Poptávka po této olejnině, která se přidává do bionafty, stoupá a proto produkce řepky olejky v ČR nadále roste.

Ovšem EU shromažďuje informace o tom, že olej MEŘO může více škodit životnímu prostředí než samotná nafta a proto bude evropská unie produkci bionafty nejspíš redukovat.

Další olejinou, která se v ČR produkuje ve velkém měřítku a je celosvětově na předních místech produkce je mák setý. Ten se používá především na výrobu morfia. U nás se vyrábí zhruba 3-4 % této farmaceutické látky, zbytek se vyváží [32].

1.2 Příklady veřejně dostupných rostlinných olejů

Řepkový olej

Olej získaný ze semen řepky olejné. Je lisovaný buď pomocí organických rozpouštědel nebo za studena. V prvním případě je v oleji obsažen nadbytečný fosfor. V druhém, tedy při lisování za studena, nadbytečný fosfor už není.

Rýžový olej

Rýžový olej je získáván z rýžových otrub (část mezi zrnem a slupkou), pomocí několika kroků výroby. Olej je rafinován a má zlatou barvu, která má specifickou vůni rýže. Olej odolává velmi vysokým teplotám (až 215 °C), proto se často používá při vaření. Obsahuje vysoký podíl vitamínu E, což oleji poskytuje dobrou oxidační stabilitu a také obsahuje z větší části mono-nenasycené kyseliny.

Ricinový olej

Získaný ze semen skočce obecného. Je to bezbarvá a velmi světle žlutá kapalina. Obsahuje oleát a linoleany. Má široké spektrum použití např. brzdové kapaliny, maziva, odolné laky za studena, nátěry, léčiva ad. Jelikož má Ricinový olej nízký bod tuhnutí a malou kouřivost, lze jej použít i do biopaliv.

Slunečnicový olej

Tlačí se ze semen slunečnice. Je běžně používán jako přídatek k potravinám a ke kosmetickým účelům. Olej má světle jantarovou barvu, rafinovaný je potom světle žlutý. Olej obsahuje vitamin E, steroly, alifatické uhlovodíky ad. Slunečnicový olej může být použit jako přísada k palivu pro vznětové motory.

Sojový olej rafinovaný

Sojový olej se získává lisováním sójových bobů při teplotě od 60 °C do 90 °C. Výsledná olejová kapalina je světle žlutá. Tento olej je rafinovaný a používá se pro další aplikace. Oleje, které jsou částečně hydrogenované, se prodávají jako rostlinné oleje. Zbytky z výroby, známé jako sojová moučka, se používá jako krmivo pro zvířata. Bod tuhnutí je okolo -13 °C.

Palmový olej

Olej získaný z palmy olejné. Získává se z oplodí palem, nikoli ze semen. V EU patří hned za řepkový olej jako druhý nejpoužívanější olej v potravinářství. Hlavní složkou je kyselina laurová a kyselina palmitová. Obsahuje velké množství vitamínu E a nasycených mastných kyselin. Tento olej je při pokojové teplotě bílou až nažloutlou hmotou. Taje při 35 °C. Jeho hustota při 50 °C je 859 kg/m³. V průmyslu se využívá jeho vysoké stability proti oxidaci. Je důležitý pro výrobu biopaliva. Nedoporučuje se k výživě – ucpává cévy.

Olivový olej

Olivový olej se získává lisováním plodů olivovníku evropského. Nejvíce je v olivovém oleji zastoupena kyselina olejová, její podíl se pohybuje v rozmezí 56-85 %. Množství složek obsažených v oleji ze závislé na prostředí, kde olivovník vyrůstá. Používá se především v potravinářském průmyslu anebo i v kosmetickém či farmaceutickém průmyslu. Olivový olej pro svůj velký obsah mono-nenasycených mastných kyselin je velmi prospěšný lidskému zdraví.

MEŘO olej

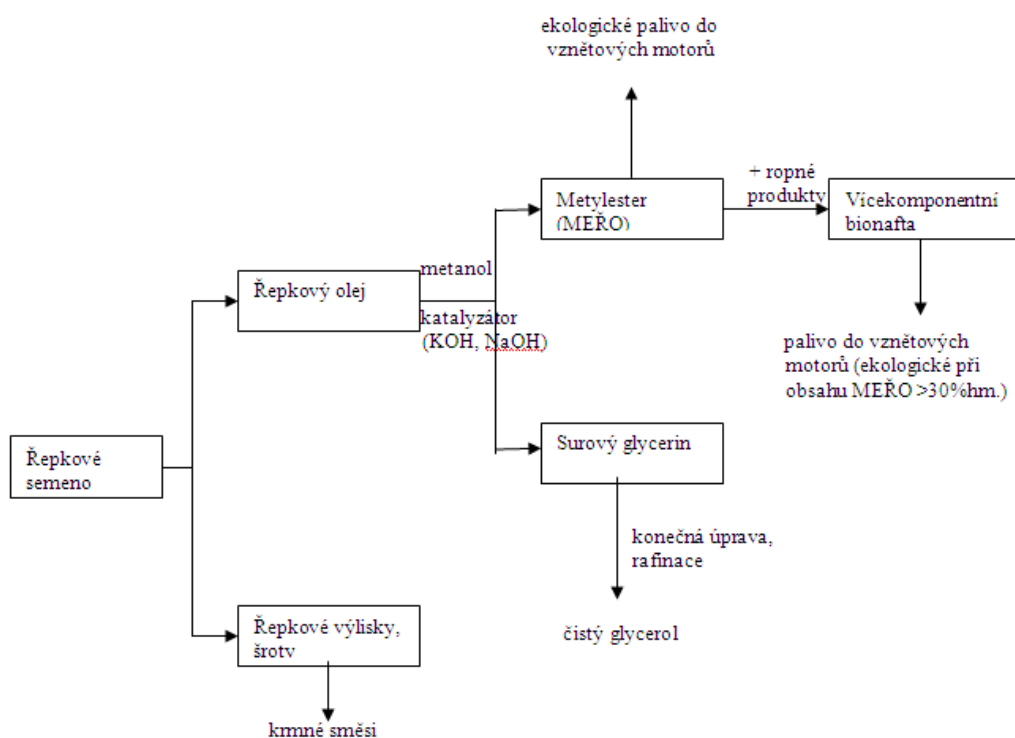
Při výrobě MEŘO se jako vstupní surovina používá řepkový olej a menší množství metanolu. Celý proces výroby se tak skládá z lisování oleje, filtrování a následné chemické reakce oleje, metanolu a katalyzátoru na methylester a glycerin.

MEŘO je čistá nažloutlá kapalina bez mechanických nečistot a je neomezeně mísitelná s motorovou naftou. Není toxická, neobsahuje těžké kovy ani žádné škodlivé látky, které by škodily zdraví. Nevýhodou je agresivita vůči běžným nátěrům a pryžím.

Ve srovnání s motorovou naftou dochází při spalování MEŘO k významnému snížení emisí nespálených uhlovodíků, těžkých částic a na nich navázaných polycyklických aromatických uhlovodíků. Oproti motorové naftě neobsahují rostlinné oleje síru, a proto při jejich spalování nedochází ke vzniku oxidu síry. Vysoký obsah kyslíku v MEŘO má pozitivní vliv na oxidaci, a tím na snižování úrovně smogu v ovzduší .

Složení MEŘO:

- 98 % methylesteru mastných kyselin řepkového oleje
- 1 % směsi mono-, di- a triglyceridů
- 1 % ostatní zanedbatelné látky



Obrázek 2) Postup výroby oleje MEŘO

Transesterifikace

Hlavní reakce, kdy spolu chemicky reagují řepkový olej s alkoholem za vzniku esteru a glycerinu. Používaným alkoholem je metanol a reakce probíhá buď za běžné nebo zvýšené teploty. Hlavním důvodem použití metanolu jsou příznivé vlastnosti získaného MEŘO (hustota, viskozita). Získaný olej se dále čistí. Získaný vedlejší produkt, tedy glycerin, je žádaným produktem v chemickém průmyslu [12].

Vedlejší produkce reakce mastné kyseliny a katalyzátoru (nejčastěji hydroxid draselný nebo sodný) je vznik mýdla o vody.

Rostlinný olej, uskladněný v cisterně, se čerpadly dopraví do nádoby reaktoru. Po proběhnutí esterifikace, asi za 6 až 8 hodin, se na základě různé hustoty směs rozdělí na dvě frakce:

- 1) Methylester odteče do tepelného ohřívače, kde se oddělí zbylý metanol, který nevstoupil do reakce. Separace probíhá kontinuálně v koloně, kde se odstraní i případný zbytek glycerinu. MEŘO je uvedeno do zásobníku s pufrem (kyselina fosforečná), kde je prováděna zkouška kvality.

2) Směs glycerinu s olejem se neutralizuje kyselinou fosforečnou. Poté se odstředivkou oddělují pevné příměsi. Tyto vstupují do sušárny, odkud vychází jako konečný produkt hodnotné fosforečné hnojivo. Ze zbylé tekutiny se v diskovém separátoru oddělí olej od glycerolu.

Použití MEŘO

Olej se ve většině případů používá jako přísada do motorových paliv. V ČR se přidává do ekologického motorového paliva, většinou tvoří přes 30 % hm. (bionafta II. generace). Jsou i země, kde se olej používá přímo jako motorové palivo nebo médium pro vytápění. V jiných případech se dá např. destilovaný olej MEŘO použít v oleochemii [12].

Toxicita MEŘO

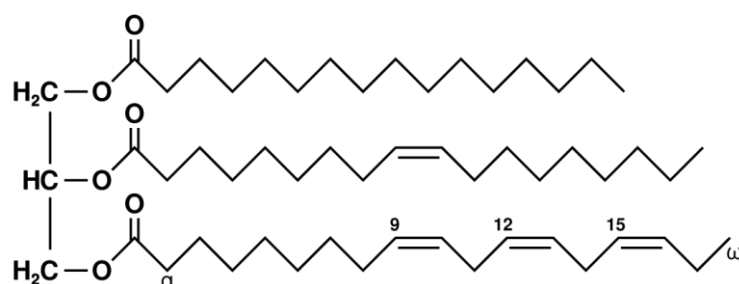
Podle článku [12] není MEŘO toxické. Je zde uvedeno, že zahraniční zkoušky (Rakousko, Německo, Francie) neprokázaly toxicitu ani nebezpečnost vůči vodnímu prostředí. Po úniku většího množství oleje do povrchových vod je ale nutné použití bezpečnostních opatření a odčerpání oleje z hladiny. Při úniku oleje do půdy se olej rozloží v závislosti na množství uniklého oleje a na atmosférických podmínkách.

Tabulka 1) Přehled parametrů pro jednotlivé oleje

Olej	Hustota při 20°C	Bod vzplanutí
Řepkový	915 kg/m ³	246 °C
Rýžový	921 kg/m ³	nad 215 °C
Palmový	859 kg/m ³ při 50 °C	304 °C
Ricinový	961 kg/m ³	313 °C
Slunečnicový	917 kg/m ³	232 °C
Sojový rafinovaný	922 kg/m ³	324 °C
MEŘO	860-900 kg/m ³ při 15 °C	min.120 °C

1.3 Složky rostlinných olejů

Jak již bylo řečeno výše, tak rostlinné oleje obsahují různé složky. Nejčastěji jsou to mastné kyseliny (MK) a to poly-nenasycené mastné kyseliny (P-NMK), mono-nenasycené mastné kyseliny (M-NMK) a nasycené mastné kyseliny (NMK). Dále pak obsahují glyceridy a estery. Glyceridy jsou ve tvaru triglyceridů tj. glycerin je esterifikován se třemi molekulami mastných kyselin [31].

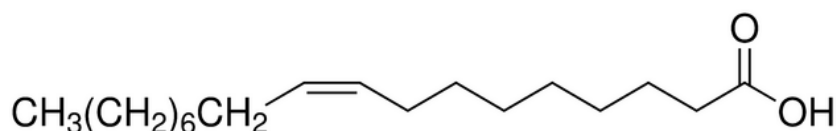


Obrázek 3) Struktura triglyceridu

Mastné kyseliny se přitom mohou v každém oleji lišit. Záleží na prostředí, kde rostlina roste i na způsobu zpracování semen rostlin.

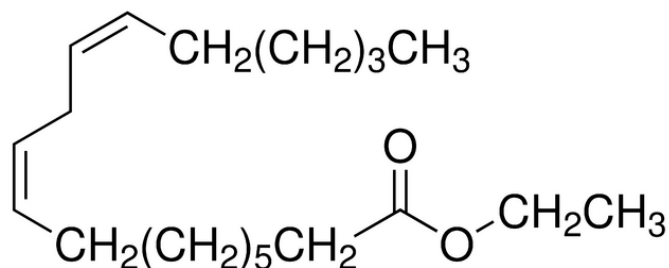
1.3.1 *Nenasycené mastné kyseliny*

Jednou z mono-nenasycených mastných kyselin je kyselina olejová. Je to žlutá až nahnědlá kapalina charakteristického zápachu. Chemický vzorec kyseliny olejové je $C_{17}H_{33}COOH$ a je to vyšší nenasycená mastná karboxylová kyselina. Patří do skupiny OMEGA-9 mastné kyseliny. Její bod varu se pohybuje nad $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ a bod tuhnutí pod $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kyselina by neměla být toxická pro vnější prostředí [30]. Nejčastěji se kyselina olejová vyskytuje v olivovém, řepkovém, slunečnicovém oleji a dále v rybím anebo v mléčném tuku.



Obrázek 4) Struktura kyseliny olejové

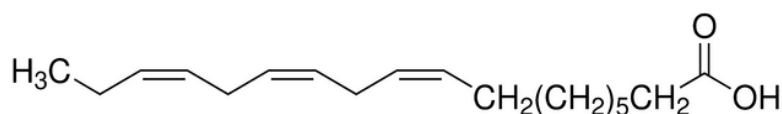
Další z vyšších nenasycených mastných kyselin, které obsahují oleje je kyselina linolová (ethyl linoleát). Patří do skupiny OMEGA-6 mastných kyselin, tedy do skupiny esenciálních MK a je to poly-nenasycená MK. Vyskytuje se hlavně v lněném oleji, ale také ve slunečnicovém oleji nebo v oleji ze světlice barvířské. Může se vyskytovat i v plnotučném mléce nebo ve skopovém mase. Využívá se ve výrobě mýdel, emulgátorů a rychleschnoucích olejů. Je to silný antioxidant, takže její využití najdeme hlavně ve zdravé výživě.



Obrázek 5) Struktura kyseliny linolové

Do skupiny OMEGA-6 mastných kyselin patří i esenciální poly-nenasycená **kyselina γ -linolenová** (GLA). Kyselinu GLA můžeme nalézt v brutnákovém a pupálovém oleji anebo v semenech černého rybízu. GLA se používá hlavně ve zdravé výživě a zdravotnictví.

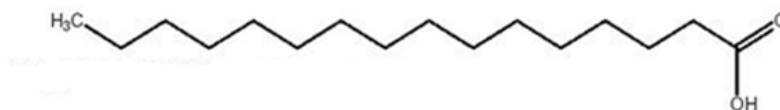
Mezi OMEGA-3 nenasycené mastné kyseliny můžeme zařadit např. esenciální poly-nenasycenou **kyselinu α -linolenovou** (ALA). Kyselina ALA se nachází ve lněném, řepkovém, sojovém a dýňovém oleji a u živočichů je lze nalézt např. u ryb. Alfa-linolenová kyselina se používá zejména ve zdravotnictví a ve zdravé výživě.



Obrázek 6) Struktura kyseliny linolenové

1.3.2 *Nasycené mastné kyseliny*

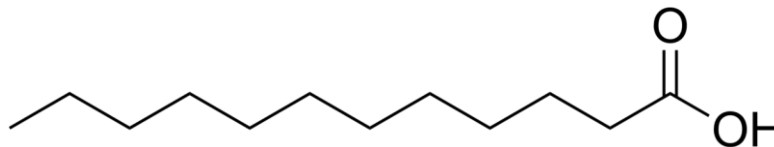
Kyselina palmitová je další složkou olejů a tuků. Je to vyšší mastná kyselina a patří mezi karboxylové kyseliny. Za normálních podmínek je bílá a tuhá, v nejvyšší míře ji obsahuje palmový olej. Při teplotě okolo 62 °C se tuhá látka mění v kapalnou, má vysokou teplotu varu a to 338 °C .



Obrázek 7) Struktura kyseliny palmitové

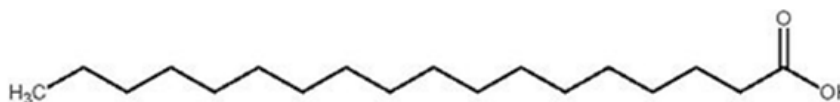
Ve větším množství se v palmojádrovém oleji vyskytuje i kyselina laurová, ta je u ostatních rostlinných tuků už jen v menším množství. V čistém stavu je lehce dráždivá,

ale není toxická, je sypká a bílá, pachem připomínající mýdlo. Většinou se z ní vyrábí šampóny a tekuté mýdla. V životosprávě je urychlovačem metabolismu. Bývá často používána jako příměs do látek používaných ke snížení bodu tuhnutí. Teplota varu u této kyseliny se pohybuje okolo 298 °C.



Obrázek 8) Struktura kyseliny laurové

Do skupiny vyšších mastných kyselin patří i kyselina stearová. Je obsažena v přírodních tucích a patří do skupiny karboxylových kyselin. Za normální (pokojové) teploty je pevnou látkou. Její bod tání je okolo 70 °C a bod varu má okolo 358 °C. Jako samotná se používá v pracích prostředcích a v mýdle, ale společně s kyselinou palmitovou je vhodná jako vosk k výrobě svíček. V průmyslu se s touto směsí můžeme setkat při výrobě butadienstyrenového kaučuku.



Obrázek 9) Struktura kyseliny stearové

Tabulka 2) Přibližné hodnoty složek obsažených ve vybraných rostlinných olejích [41]
[40]

	k. linolová	k. olejová	k. palmitová	k. stearová	k.linolenová
Řepkový olej	18-24 %	50-66 %	1,5-6 %	0,8-2,5 %	6-14 %
Rýžový olej	30-45 %	35-45 %	13-22 %	1-6 %	1-6 %
Ricinový olej	Obsahuje především 95 % kyseliny ricinolejové				
Slunečnicový olej	48-74 %	14-40 %	4-9 %	1-7 %	0,1-0,2 %
Sojový olej	48-58 %	17-30 %	9-13 %	3-5 %	5-11 %
Palmový olej	4 %	40-43 %	40-43 %	3-4 %	-
Olivový olej	3,5-20 %	56-85 %	17,5-20 %	0,5-5 %	1,2 %

1.4 Rostlinné oleje v technické praxi

V elektrotechnice lze využít oxidace rostlinného oleje, která probíhá jinak než u minerálních olejů. Zoxidovaný rostlinný olej netvoří v kalu sraženiny. Místo toho začne olej houstnout a nakonec polymeruje. To má za následek dramatické zvýšení viskozity, které mohou tvořit základ pro „inteligentní“ samotěsnící systém využívaný v kabelových aplikacích. Tato technologie se používá především v podzemních kabelech, které jsou náchylné na průnik nečistot a vlhkosti. Tyto nečistoty mohou poškodit jak kabel, tak i elektrické zařízení, které je na kabel napojeno. Oleje se vstřikují do kabelů s nízkou viskozitou, aby dobře zatekly do volného prostoru kabelu. Na místě, kde je kabel umístěn dochází ke zvýšení viskozity a tím i k potřebné izolaci kabelu. Tato izolace se chová jako hydrofobní pro následné pronikání vlhkosti a nečistot [17] [34].

Rostlinné oleje je možno využít i v technologii polyolů. Molekuly rostlinných olejů musí být chemicky transformovány, tak aby bylo docíleno hydroxylové skupiny. Molekuly nenasyčených kyselin mohou být převedeny na hydroxylové skupiny. Bohužel ne mnoho těchto úprav rostlinných olejů na polyoly je selektivních. Polyoly se používají jako příměs do polyuretanových tvrdých pěn. Podíl rostlinného polyolu v této pěně je v rozsahu 10-50 %. Tyto pěny jsou daleko ohleduplnější k životnímu prostředí a navíc i levnější než pěny z ropného oleje [35] [36].

Dále můžeme rostlinné oleje najít, jak již bylo zmíněno, v lacích nebo jako impregnant papírových izolantů, např. v kondenzátorech, zejména u stejnosměrných aplikací. Pro tyto aplikace se používá především olej ricinový, lisovaný ze skočce. Napouští se jím papírové kondenzátory, a to především proto, že má vysokou permitivitu a není jedovatý. Tento olej patří do skupiny nevysychavých olejů.

Vysychavé oleje se používají hlavně jako tvrditelné elektroizolační laky s dobrými elektrickými vlastnostmi. K těmto účelům je vhodný dřevný olej, který dobře schne ve větší vrstvě a má větší odolnost proti vodě než např. olej lněný. Jeho nevýhodou je ovšem to, že se při vyšším tepelném namáhání odlamuje od povrchu a praská [1].

Jednotlivé složky rostlinných olejů, jmenovitě estery, se používají i v Li-ion bateriích, kde se přidávají do směsi pro elektrolyt. Podle článku [37] není použití esterů společně s lithiem při vyšším tepelném namáhání příliš stabilní. Oproti tomu v článku [39] je uvedeno, že série organických rozpouštědel napomáhá uchování stabilních vlastností elektrolytu za nízkých teplot. To funguje na principu vytvoření filmu na povrchu elektrody a tím její ošetření před nízkými teplotami.

V ČR, jak je možnost vidět i na vlastní oči, je hojně pěstována řepka olejka. Je to z toho důvodu, že olej z řepky olejky je hlavní složkou kapaliny jménem MEŘO nebo-li methyl ester řepkového oleje. Jelikož je tato kapalina hodně využívána na celém světě jako přídavek do bio paliva, je detailněji popsána v kapitole 1.2.

Do bio paliv se ovšem nepoužívá jen olej z řepkového oleje ale i jiné rostlinné oleje. Jsou jimi např. sójový, slunečnicový, bavlníkový, kukuřičný a hořčičný olej. Živočišné tuky a palmový olej se mohou také použít na výrobu bio paliva, ale jejich vysoký obsah volných mastných kyselin může při následném zpracování způsobovat komplikace [42].

Rostlinný olej je v současné době používán i v energetice, především u transformátorů jako chladicí a izolační médium. Této problematice se podrobněji věnuje kapitola 1.5.

1.5 Rostlinné oleje pro energetiku

Minerální oleje jsou stále nejpoužívanějším médiem pro výplň vysokonapěťových transformátorů. Jejich velikou nevýhodou ale je, že jsou toxické pro životní prostředí, proto je nutné hledat jejich náhradu. Přimícháním DDB (dodecylbenzen) k minerálnímu oleji je dosaženo toho, že olej získá biologickou odbouratelnost, ale jeho stárnutí je daleko od ideálu a navíc není obnovitelný. Jako velmi dobrá alternativa k minerálním olejům se ukázaly oleje rostlinné [38].

Při výrobě oleje pro transformátorové využití je potřeba zvolit olej s vysokým obsahem mono-nenasycených mastných kyselin, které mají vliv na oxidační stabilitu oleje [21]. Olej, který má nejlepší oxidační stabilitu, se podle experimentu v článku [38], ukázal být žlutý olivový olej. Ten nabízí nejlepší odolnost proti stárnutí a má nejnižší dielektrické ztráty. Řepkový olej je použitelný pro některé aplikace přimícháním antioxidantů. Oleje jako slunečnicový a kukuřičný se ukázaly být nevhodné pro transformátory, protože oxidují a houstnou mnohem více než ostatní oleje. Tohoto jevu může být využito v kabelových systémech. V práci je závěrem uvedeno, že použití DDB je vhodnější pro podstatně lepší odolnost proti oxidaci ve srovnání s rostlinnými oleji.

V článku [16] je uvedeno, že v roce 1998 byl vyvinut první olej na přírodní bázi pro použití v energetice. Ten vykazoval nejen vynikající požární vlastnosti, ale splňoval i kritéria „úplné biologické rozložitelnosti“.

Současné výzkumy jsou ve stádiu pokusů na nově dimenzovaných super výkonových transformátorech, které by jako chladicí a izolační médium používaly rostlinné oleje. Použití v těchto výkonových aplikacích je založeno na několika faktech:

Rostlinné oleje jsou šetrné k životnímu prostředí, mají vysoký bod vzplanutí (několikanásobně vyšší oproti minerálním olejům), dobré elektrické vlastnosti a jsou obnovitelné [2].

V článku [4] je uvedeno, že byl vyroben výkonový transformátor na 420 kV, který jako chladicí a izolační médium používá výhradně kapalinu na rostlinné bázi. Je to

první transformátor, který nepotřebuje žádný doklad o závadnosti vůči znečištění vody.

Tento olej je lisován z přírodních semen. Má zvýšenou požární bezpečnost, je ekologický a jeho předností jsou dobré elektrické a chemické vlastnosti [5].

1.6 Rostlinné oleje používané v transformátorech

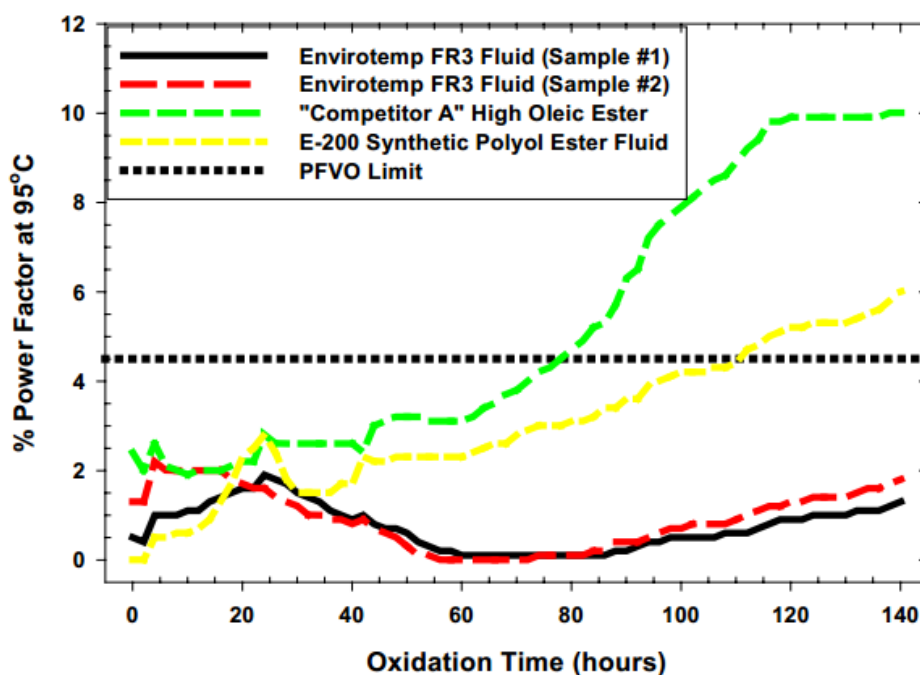
1.6.1 *Envirotemp FR3 Fluid*

Jedním, již zmiňovaným olejem může být olej s názvem Envirotemp FR3 fluid. Tento olej je dielektrická kapalina, vyráběna ze semen rostlin a je využívána pro výkonové aplikace. Olej má nazelenalou barvu, a tak se dobře odlišuje od ropných olejů. Je netoxický a neobsahuje žádné přísady, které by jej znečistily, proto se dá označit za zdravotně nezávadný. Má 56x nižší emise oxidu uhličitého než minerální olej.

Tato kapalina má vysoký bod vzplanutí, a to okolo 330/360 °C. Ochraňuje izolační papír uvnitř vinutí, který může vydržet až 8x delší dobu než při použití minerálního oleje. Použitím tohoto oleje se sníží i velikost daného transformátoru [5].

Dva různé vzorky kapaliny Envirotemp FR3 prošly zkouškami SFL a PFVO. Zkouška PFVO byla složena z měření na vzduchu ve velkých proudech po dobu 140 hodin a při teplotě 95 °C.

Výsledky testů ukázaly, že zkouška SFL neprokázala žádný výskyt kalu po dobu 88 hodin. Zkouška PFVO ukázala, že oba vzorky spadají do limitu 4,5 % [44]. Popis zkoušek je podrobněji popsán v kapitole 2.2.



Obrázek 10) Zkoušky PFVO na čtyřech vzorcích olejů [44]

1.6.2 BIOTEMP

Další z řady biologicky odbouratelných olejů, který má výborné dielektrické vlastnosti a lze jej použít ve výkonových aplikacích jako izolační médium.

Olej je vyráběn ze semen slunečnice a světlice. Je biologicky odbouratelný z 97 % za 21 dní, a proto se může používat v interiéru nebo ve venkovních prostorách se zvýšenou ochranou prostředí. Během spalování oleje se nevypouští do ovzduší žádné jiné látky než oxid uhličitý a voda. Je tedy považován za netoxický. Ve srovnání s minerálními oleji, které mají bod vzplanutí okolo 145/160 °C, dosahuje olej BIOTEMP více jak dvojnásobných hodnot, a to 330/360 °C.

BIOTEMP je schopen absorbovat více vody než klasické izolační kapaliny, což znamená, že pomáhá „vytahovat“ vodu z izolačního papíru a zabrání tak jeho stárnutí.

Společnosti, které tento olej používají hlásí, že se jim snížily náklady na instalaci, zlepšila spolehlivost a snížily nároky na údržbu. V delším časovém horizontu se zvýšila i provozní životnost transformátoru [6].

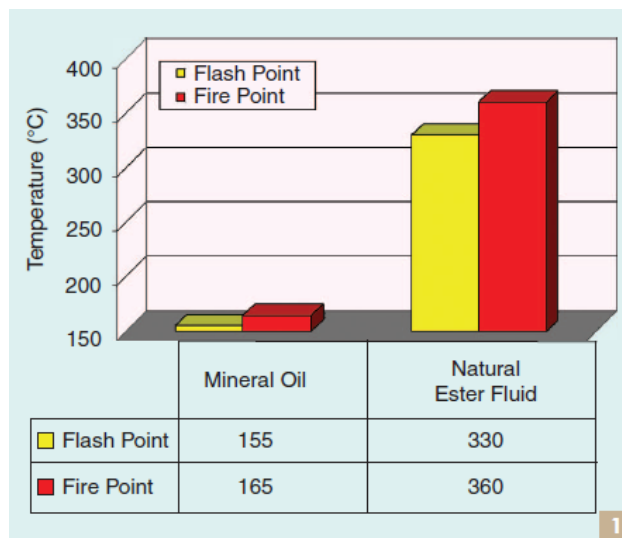
2. TEPELNÁ STABILITA ROSTLINNÝCH OLEJŮ

2.1 Rostlinný olej při vyšších teplotách

Jednou z nejdůležitějších vlastností olejů je jejich tepelná stabilita při vysokých teplotách. Tímto tématem se zabývá článek [43]. Je zde uvedeno, že minerální oleje jsou sice stále nejpoužívanější oleje pro transformátory, ale jejich stárnutí a neodbouratelnost v případě havárie je stále diskutovanějším tématem. Proto American National Standards Institute (ANSI) vydala nařízení, že řídicí budovy v trafostanicích musí být kvůli požární ochraně vzdáleny minimálně 11 m od transformátorů, které jako plnivo používají minerální olej a jsou pro napětí 333 kVA. Existuje totiž hodně případů, kde požáry vzniklé na transformátorech s minerálními oleji se přesunuly na okolní budovy.

Rostoucí požadavky na zlepšení požární bezpečnosti, šetrnosti k životnímu prostředí a prodloužení životnosti kapaliny, zvýšily rychlost výzkumu přírodních esterových kapalin, které jsou méně hořlavými, lépe se sloučí s jinými materiály, mají lepší elektrické vlastnosti, lépe chrání materiál před stárnutím a jsou netoxické. Na obrázku 14) je znázorněn rozdíl mezi bodem vzplanutí a hoření minerálních olejů a přírodních esterů.

Studie ukázaly, že transformátory plněné přírodními estery mohou být umístěny nejen poblíž budov ve venkovních prostorech ale i přímo v budovách. Jednou z nevýhod přírodních esterů je jejich cena. Náklady na transformátory, které by měly být plněny přírodními oleji, jsou přibližně o 10-15 % více, než u minerálních olejů. Nicméně, použití této kapaliny slibuje vyšší životnost a výkonnost pro uživatele.



Obrázek 11) Bod vzplanutí a hoření minerálního oleje a přírodního esteru [43]

2.2 Oxidační stabilita rostlinných olejů

Oxidační stabilitu oleje určují především jeho složky jako jsou mastné kyseliny, ale i vnější faktory jako je teplota, nádoba kde se olej vyskytuje a množství vzduchu s kterým se olej je ve styku. Lze ji popsat jako reakci volných radikálů, kde reagují uhlíkové vazby v nenasycených mastných kyselinách [45].

Elektrické izolační kapaliny musí mít odpovídající oxidační stabilitu pro efektivní chlazení a udržení žádoucích elektrických vlastností pro životnost transformátoru. Minerální oleje se mohou srážet a tím vzniká nežádoucí kal, který ovlivňuje chlazení a elektrické vlastnosti transformátoru. Kal v oleji vzniká během urychleného tepelného stárnutí a je ukazatelem špatné stability oleje.

Existují zkoušky jako např. PFVO (Power Factor Valued Oxidation) a SFL (Sludge Free Life), které měří ukazatele oxidační stability transformátorového oleje při zrychleném tepelném stárnutí. Test PFVO měří přítomnost a chování znečišťujících látek, které jsou v kapalině produkovány při oxidaci. Test SFL zjišťuje typ kalu, které mohou být vytvořeny jako vedlejší produkt oxidace. Oba tyto testy jsou součástí TOPS (Doble Transformer Oil Purchase Specification) [44].

3. MINERÁLNÍ OLEJE

Tyto oleje jsou získány destilací z ropy. Jsou směsí uhlovodíků s rozdílnou molekulovou hmotností. Ropa obsahuje směs kapalných, plynných a tuhých látek, kde převážnou částí jsou uhlovodíky (asi 97 %). Chemické složení minerálních olejů se značně liší, protože mají jako ropný výrobek různý původ, s čímž souvisí i různá viskozita.

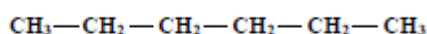
Používají se v různých odvětvích např. jako rozpouštědla, maziva, ochrana povrchů, jako izolační kapaliny atd. Většinou se jedná o toxické oleje. Existují i minerální oleje, které jsou nízkotoxické, ty se používají na ochranu povrchu vajec nebo proti prašnosti obilí. Ale i tak se jedná o potraviny, které by neměly být povoleny ke konzumaci.

Minerální oleje jsou pro lidský organizmus toxické, což způsobují hlavně aromatické uhlovodíky, které jsou v olejích obsaženy. Při požití mohou nastat problémy jako poškození jater, lymfatických uzlin, imunitního systému ad. [23].

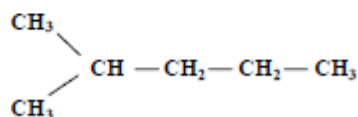
Minerální oleje lze rozdělit do tří skupin [19].

Parafinické uhlovodíky (Alkanické) – oleje, které jsou nasycené uhlovodíky s rozvětvenými a lineárními řetězci. Jsou chemicky stálé s vysokým bodem vzplanutí, dobrou viskozní křivkou. Jejich struktura tvoří n-alkany, které mají rozvětvené řetězce a izoalkany, které mají řetězec rozvětvený [21]. Tuhnou ovšem už při teplotách blízkým k nule [18].

n-hexan (n-alkan) - [C₆H₁₄]

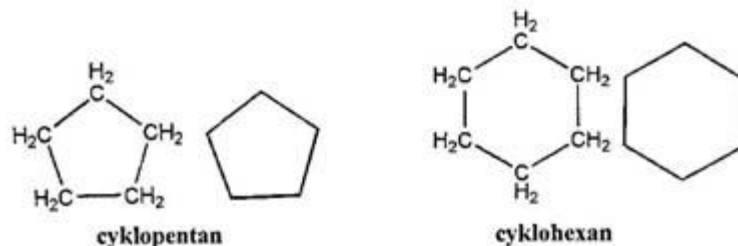


i-hexan (izoalkan) - [C₆H₁₄]



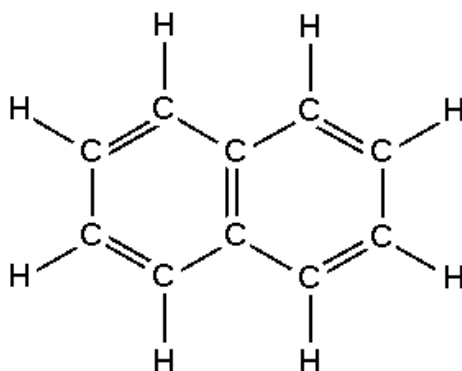
Obrázek 12) Příklad řetězce alkanu [21]

Alkylcyklánové uhlovodíky – molekuly, které jsou složeny z jednoho nebo více cykloalkanových kruhů. Počet kruhů určuje monocykloalkany, dicykloalkany, tricikloalkany, ad. Jeden kruh se většinou skládá z pěti nebo šesti členů. V této skupině můžeme nalézt např. cyklopropan nebo cyklobutan [21].



Obrázek 13) Příklady struktur cykloalkanů [22]

Aromatické uhlovodíky – jsou zastoupeny v malém množství. Mají v molekule jeden nebo více aromatických kruhů, ale i kruhy cykloalkanické, ty mohou být rozvětvené i nerozvětvené. Molekuly s jedním aromatickým kruhem nazýváme monoaromáty, se dvěma kruhy diaromáty, dále jsou to triaromáty atd. Nalezneme zde benzen a naftalen [21].



Obrázek 14) Příklad struktury naftalenu [20]

Mezi rozpuštěné tuhé látky patří např. parafín, u plynných rozpuštěných látek je to ethan, butan, oxid uhličitý, dusík nebo vzácné plyny. V kapalném skupenství se zde vyskytují různé uhlovodíky jako např. izoalkany, cykloalkany, aromáty, ad. [18].

V současné době jsou minerální oleje stále nejpoužívanější izolační kapalinou v elektrotechnice. Najdou uplatnění hlavně u transformátorů jako chladicí a izolační médium, kde se sleduje hodnota vysoké dielektrické pevnosti, odolnost proti stárnutí (oxidaci), nízká viskozita, vlastnosti při nízkých teplotách.

Při použití minerálního oleje v transformátorech je důležité, aby olej uvnitř trafů cirkuloval. Tím dochází k lepšímu odvodu tepla z jádra transformátoru. Teplota kolujícího oleje uvnitř trafů se pohybuje okolo 80-100 °C.

Olej je potřeba pravidelně udržovat, aby nedocházelo k oxidaci a k usazování nečistot na dno transformátoru [21].

Další využití je např. ve stykačích a spínačích, jako samozhášecí prostředek. Dále v kondenzátorových aplikacích, kde se vyznačují nízkou relativní permitivitou a hořlavostí a v kabelových aplikacích, kde mají oleje naopak vysokou viskozitu a chrání tak kabel proti průrazu [19].

Minerální oleje mají ovšem i své nevýhody, mezi ty hlavní patří navlhavost a oxidace na vzduchu. Oleje potom rychleji stárnou a vnikají kaly a náchylnost na hoření a výbušnost [21].

4. SYNTETICKÉ KAPALINY

Kapaliny syntetického původu se dělí hlavně podle svého vzniku. Mohou být i na přírodní bázi, kde se snaží vykompenzovat nedostatky rostlinných olejů. Syntetické kapaliny jsou v mnoha případech lepší než oleje minerální, čemuž nasvědčuje např. nehořlavost, vysoká tepelná stabilita a uspokojivé chemické vlastnosti. Jako náhrada za minerální oleje se používají v případě, že mají výhodnější vlastnosti oproti olejům minerálním.

Podle článku [18] je vhodným výběrem alkylů při syntéze molekuly alkylesteru dáno, že dochází k eliminaci nestability typické pro přírodní triacylglyceroly a tudíž ke zvýšení termicko-oxidační stability.

Syntetické kapaliny se vyrábí tzv. „Fischer-Tropsch“ procesem. Tento proces byl vyvinut během druhé světové války v Německu [32].

Důležitými měřítky u syntetických olejů jsou např. index viskozity, kde se posuzuje viskozita oleje při nízké a vysoké teplotě. Druhým měřítkem je TBN číslo, které ukazuje jak je olej zásaditý nebo kyselý. To je důležité při použití u náchylných materiálů jako je guma či kov, kde se musí předcházet korodování. Používají se oleje, kde je číslo TBN vysoké. V automobilovém průmyslu je to v rozmezí 7-15.

Dalšími měřítky jsou bod tuhnutí – olej musí být vždy tekutý a bod vzplanutí, kdy se směs se vzduchem nesmí vznikat zápalná směs.

Sledují se i měřítka jako těkavost, čistící vlastnosti a váha oleje.

Syntetické kapaliny můžeme dělit na [18]:

Kapaliny vzniklé polymerizací uhlovodíků (polybutény) – jsou nepolární a ekologicky nezávadné. Vznikají jako spodiny při polymerizaci nenasyčených uhlovodíků butylenů [21]. Vykazují odolnosti proti oxidaci a záření, mají dobré elektroizolační vlastnosti a jsou stabilní při vyšších teplotách (nad 90 °C).

Používají se v kabelových aplikacích a jako impregnace ve svítkových kondenzátorech.

Chlorované uhlovodíky – jsou ekologicky a zdravotně závadné z důvodu, že pro dosažení jejich elektrotechnických vlastností musí být použit chlór. Patří mezi ně např. pentachlordifenyl s elektrickou pevností 110 kV.cm^{-1} . Předností je jejich nehořlavost, ale kvůli jejich negativnímu vlivu na lidské zdraví byly zakázány [21].

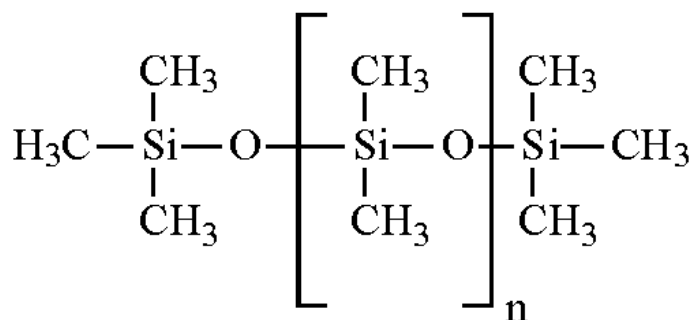
Fluorované sloučeniny – fluor v kapalině je toxický, proto se na něj musí brát zřetel při jejich používání.

Při teplotě do $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je kapalina velice stabilní – nehoří, nevybuchuje a má velmi dobrou stabilitu jak chemickou tak i tepelnou. I když mají tyto sloučeniny téměř dvakrát větší elektrickou pevnost než u chlorovaných sloučenin, tak při možných výbojích vzniká kyselina, která působí agresivně na kovy a izolační systémy [21].

Jelikož mají dobré samozhášecí účinky, tak se používají jako náplň do transformátorů a výkonových spínačů.

Organické estery – při vysokých frekvencích mají malý činitel dielektrických ztrát. Jsou to oleje, které mají vysoký bod vzplanutí a vyšší viskozitu, než ostatní minerální oleje. Připravují se esterifikací mezi alkoholem a karboxylovou kyselinou. Skládají se z vodíku, uhlíku a kyslíku. Jejich velkou výhodou je ekologická nezávadnost. Používají se ve vysokofrekvenčních transformátorech. Mezi nejčastější zástupce této skupiny je olej MIDEL 7131.

Silikonové kapaliny – velkými přednostmi silikonových olejů jsou např. nízký bod tuhnutí, nehořlavost, netoxičnost, tepelná stálost a výborné elektroizolační vlastnosti. Z chemického hlediska jsou to organokřemičité makromolekulární látky obsahující organický radikál. Typickým příkladem silikonu je polydimethylsiloxan, kde na každý atom jsou vázány dvě metylové skupiny.



Obrázek 15) Příklad struktury polydimethylsiloxanu

4.1 Syntetické kapaliny na organické bázi

Kapaliny jako MIDEL byli vyvinuty kvůli nedostatkům minerálních olejů u transformátorové techniky. Jsou upraveny tak, aby byly vyhovující i v těch nejtěžších podmínkách. Díky tomu, že jsou na organické bázi jsou i šetrné k životnímu prostředí.

4.1.1 MIDEL 7131

Syntetický ester MIDEL 7131 je založen na organické bázi. Je celosvětově používán především v transformátorech jako izolační a chladicí médium. Mezi jeho hlavní výhody patří např. vysoký bod hoření, malý dopad na životní prostředí, velká odolnost proti vlhkosti ad. Hlavně díky těmto vlastnostem je olej možné používat i v prostředí s vysokým nárokem na čistotu prostředí (v blízkosti vodních toků). Hodně olejů používaných v transformátorech mají problém s vytvářením koroze. Midel je ošetřen tak, aby se v něm koroze nevytvářela.

Olej má vysoký bod hoření, proto je možné ho použít v rizikových oblastech jako jsou tunely a stavby, kde je odvod případného kouře náročný. Kapalina je vysoce stabilní při extrémních změnách teplot. Díky tomu, že se s kapalinou může pracovat při vysokých teplotách v delším časovém rozsahu, tak je možné ušetřit na rozměrech transformátorů. Některé úspory se pohybují až okolo 30 % na velikosti transformátoru.

Midel 7131 se používá hlavně i pro jeho dobrý vliv na izolační papír uvnitř transformátoru. Ošetřuje ho jak z izolačního hlediska, tak i z hlediska pevnosti a životnosti. Papír je v transformátoru důležitý aby odizoloval „živé“ části transformátoru a nedocházelo ke zkratům a výbojům. V nejhorších případech může dojít i k úplnému zhroutení transformátoru. Proto je důležité, aby byl papír 100 % funkční.

Uplatnění oleje Midel 7131 je nejen u transformátorů, ale i u tyristorů nebo ve spínačích [25].

4.2 MIDEL eN

Společnost Midel reagovala na poptávku nezávadných olejů tím, že vyvinula olej ze semen rostlin. Vlastnosti má podobné jako MIDEL 7131 s tím rozdílem, že výroba oleje eN je jednodušší. Olej můžeme používat v místech, kde je kladen veliký důraz na čistotu prostředí. Jeho toxicita je téměř nulová, takže se může používat v prostorech, kde je horší přísun vzduchu. Jeho tepelná stabilita dosahuje stejně jako u předešlého oleje skvělých hodnot.

Oba oleje jsou označovány jako oleje, které jsou bezúdržbové. Firma Midel, která tyto oleje vyrábí je označila za oleje, které stačí nalít a vyplnit s ním transformátor a dál se o něj nestarat („fill and forget fluid“) [26].

5. DŮLEŽITÉ VLASTNOSTI OLEJŮ

Jak již bylo psáno výše, je známo, že biologicky odbouratelné jsou oleje na organické bázi. Ze skupiny syntetických olejů jsou to organické estery jako je olej MIDEL 7131 nebo samotné rostlinné oleje, které jsou z 100 % přírodní.

Na tyto oleje bude kladen důraz hlavně na jejich toxicnost a následnou odbouratelnost při havárii. Základními požadavky pro elektrotechniku jsou dobré elektrické, tepelné a chemické vlastnosti.

U izolačních a chladicích kapalin se nejčastěji sledují následující vlastnosti:

Hustota – u kapaliny se sleduje změna hustoty kapaliny, resp. četnost nežádoucích produktů kapaliny.

Viskozita – pro použití u transformátorů se hodí spíše kapalina s nižší viskozitou, aby odvod tepla a vyplnění jádra transformátoru bylo dostatečné. Příčinou růstu viskozity může být např. stoupající molekulová hmotnost. Za snížení můžou např. alkany.

Rezistivita – je převrácenou hodnotou vodivosti, takže ji ovlivňují cizí částice nebo vlhkost v kapalině. Je závislá i na teplotě, kdy se mění viskozita a tedy i pohyb částic v kapalině.

Ztrátový činitel – u polárních kapalin je to míra ztrát způsobena vodivostí dielektrika a polarizací nesymetricky rozptýlených dipólů. U nepolárních kapalin jsou ztráty způsobeny pouze iontovou vodivostí. Nepolární dielektrika jsou tedy méně ztrátové než polární.

Relativní permitivita – určuje podíl kapacity nádoby naplněné zkušebním vzorkem a nádoby naplněné vzduchem.

Tepelná stabilita (bod vzplanutí a tuhnutí) – Bod vzplanutí je teplota, kdy olej dosáhne takové teploty, že směs se vzduchem po přiblížení zkušebního plamene vzplane a zase zhasne.

Bod hoření je stejný s tím rozdílem, že olej nezhasne ale dále hoří. Bodem tuhnutí se rozumí taková teplota oleje, kdy při nízkých teplotách dokáže kapalina i nadále udržet své vlastnosti bezporuchového stavu. Při nízkých teplotách oleje tuhnou a zvyšují svou viskozitu, dochází tedy ke snížení chladicího účinku.

Elektrická pevnost – rozumí se tím odolnost materiálu proti elektrickému výboji. U kapalin, které neobsahují žádné příměsi dojde k průrazu na základě nárazové ionizace – po připojení el. pole se začnou volné ionty v kapalině pohybovat od jedné elektrody k druhé. Se zvyšováním napětí se ionty začnou pohybovat rychleji až dojde k průrazu.

Elektroizolační kapaliny ale bez příměsi nenajdeme, tudíž může nastat průraz vlivem elektrického náboje, přes vodivý kanálek pomocí částice, která putuje mezi elektrodami.

Aditiva – jsou to složky, které se do olejů přidávají, aby se zlepšily některé z jejich vlastností. U elektrotechniky by to měla být např. schopnost bránit se oxidaci nebo měnit vlastnosti viskozity.

Vliv na životní prostředí – vedle elektroizolačních a chladicích vlastností olejů, je vliv na životní prostředí druhou závažnou otázkou.

Aby si olej uchoval své vlastnosti v čase je potřeba, aby se do něj přidávaly určité chemické látky, které mohou mít vliv na životní prostředí.

V minulém století byl problém s polychlorovanými bifenyly – PCB. Když se ukázalo, že mají karcinogenní účinky na lidský organizmus, tak bylo zakázáno jejich používání.

6. MĚŘENÍ KAPALIN

6.1 Elektrické vlastnosti kapalin

Kapaliny mohou být z hlediska elektrického měření děleny na dva způsoby. Mohou být měřeny elektrické veličiny a neelektrické veličiny kapalin.

Mezi elektrické veličiny izolačních kapalin patří relativní permitivita, ztrátový činitel, vnitřní rezistivita, povrchová rezistivita a elektrická pevnost.

U dielektrik mohou nastat fyzikální jevy jako jsou dielektrická polarizace, elektrická vodivost, dielektrické ztráty a elektrický výboj.

Diplomová práce je zaměřena na měření neelektrických veličin, proto elektrické veličiny kapalných izolačních kapalin nebudou dále zmiňovány.

6.2 Neelektrické vlastnosti kapalin

Neelektrické vlastnosti kapalin popisují jaké má vlastnosti kapalina, aniž by na ní působilo elektrické pole. Většina těchto vlastností je závislá na teplotě.

Mezi neelektrické veličiny patří zejména hustota kapaliny, viskozita kapaliny, tepelná vodivost kapaliny, tepelná kapacita kapaliny, ad.

6.2.1 Hustota kapalin

Hustota kapaliny je závislost hmotnosti a objemu nádoby, ve které se kapalina nachází. Označuje se řeckým písmenem ρ [ró].

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

kde m je hmotnost a V objem kapaliny.

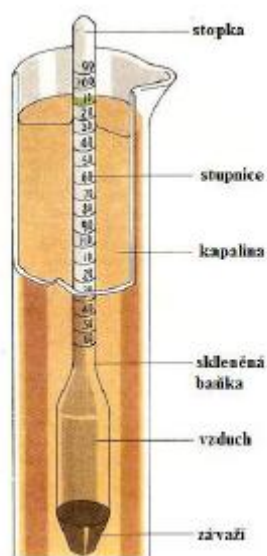
Hustota kapalin je závislá na změně teploty, to je dáno objemovou teplotní roztažností β dané kapaliny. S rostoucí teplotou objem kapaliny roste, kde vztah pro výpočet objemu je považován za lineární [3].

$$V = V_0[1 + \beta(t - t_0)], \quad (2)$$

kde V_0 je objem kapaliny při počáteční teplotě, β je objemová teplotní roztažnost, t_0 je počáteční teplota a t je koncová teplota.

Metody měření hustoty

Nejjednodušším způsobem jak změřit hustotu kapaliny je pomocí hustoměru, který pracuje na principu Archimédova zákona. Hustoměr měří výšku ponoru a vyrovnání vztlakové a tíhové síly. Po ustálení se odečítá hodnota na rysce přímo v (g/cm^3).



Obrázek 16) Měření hustoty pomocí hustoměru [3]

Na principu Archimédova zákona pracují i automatické váhy, které pro určení hustoty kapaliny potřebují ponorné tělísko s definovanou hmotností a hustotou [3].

Při znalosti objemu ponořeného tělíska pak platí vztah:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} + \rho_V, \quad (3)$$

kde m_2 je hmotnost ponorného tělíska na vzduchu a m_1 je hmotnost tělíska v kapalině, V je objem ponorného tělíska, ρ_V je hustota vzduchu.



Obrázek 17) Váha na měření hustoty pomocí ponorného tělíska [3]

Dalším možným způsobem měření hustoty kapaliny je např. Ultrazvukovým hustoměrem. Ten pracuje na principu šíření ultrazvukových vln v kapalině. Pro kapaliny s konstantní teplotou je rychlost šíření vln dána rovnicí:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (4)$$

kde C je modul objemové pružnosti prostředí a ρ je hustota měřené kapaliny.

Zařízení se skládá z vysílače ultrazvukových vln a přijímače, který tyto vlny přijímá. Měří se čas za který ultrazvukové vlny projdou skrz měřenou kapalinu. Zařízení dále disponuje teplotním senzorem, který hlídá stav teploty k danému šíření ultrazvukových vln [3].



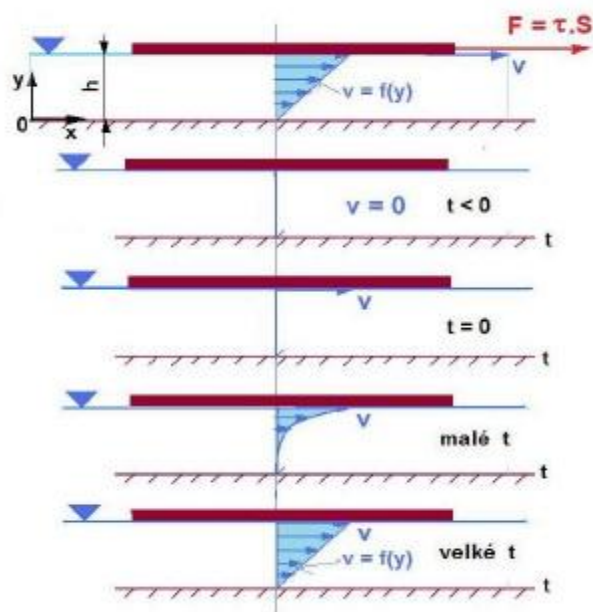
Obrázek 18) Ultrazvukový hustoměr

6.2.2 Viskozita kapalin

Je jednou z nejdůležitějších veličin, která popisuje vlastnosti reálných kapalin [3]. U ideální kapaliny se dá předpokládat, že v ní neexistují žádná tečná tzv. smyková napětí. U reálné kapaliny to platí jen za předpokladu, že jsou jednotlivé části kapaliny vůči sobě v klidu. Ke tření mezi kapalinami dochází v případě, že mají dvě vůči sobě posouvající se vrstvy kapaliny různou rychlost [9].

První, kdo předvedl tuto teorii v praxi, byl Newton. Jeho experiment je dán vztahem:

$$F = \tau \cdot S = \eta \frac{v}{h} S \quad (5)$$



Obrázek 19) Vznik smykového napětí v tekutině podle Newtona [9]

Z obrázku 19) je patrné, že mezi dvěma velkými rovnoběžnými deskami se nachází kapalina, dolní deska se nepohybuje, kdežto horní deska o dané ploše plave na tenké vrstvě kapaliny a může se po hladině pohybovat. V čase $t = 0$ se horní deska uvede do pohybu ve směru x konstantní rychlostí v . Předpokládá se, že částice tekutiny vzhledem k pevnému povrchu desky se nepohybují. S postupem času se hybnost tekutiny zvětšuje a vytváří se rychlostní profil [9].

Newtonova kapalina

Je taková kapalina, která při laminárním proudění vykazuje lineární závislost mezi tečným napětím a rychlostním gradientem a řídí se Newtonovským zákonem. Je dána vztahem:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (6)$$

kde τ je tečné napětí vznikající při prodění kapaliny, η je dynamická viskozita a $\frac{dv}{dx}$ je gradient rychlosti ve směru kolmém ke směru proudění.

NeNewtonské kapaliny

Jsou to kapaliny u kterých neplatí Newtonovy zákony. Nejsou závislé pouze na tlaku a teplotě, ale jsou ovlivněny i jinými faktory. Neplatí pro ně Newtonův zákon. Mezi tyto kapaliny patří všemi známá a užívaná voda, ale jsou zde i např. taveniny polymerů, suspenze, různé plasty apod. [3].

Jejich viskozita je dána vztahem:

$$\tau = \eta \cdot D, \quad (7)$$

kde τ je tečné napětí a D je gradient rychlosti.

Vliv teploty a tlaku na viskozitu

Viskozita kapalin je závislá na teplotě a tlaku. Dalo by se říci, že závislost na teplotě je velká a s rostoucí teplotou viskozita klesá. Tlak se většinou zanedbává, ale lze říci, že s rostoucím tlakem vzrůstá. Rozhodujícím faktorem určujícím velikost viskozity je tedy teplota. Vztah, který určuje celkovou viskozitu při stálém tlaku na teplotě, je dán:

$$\eta = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right), \quad (8)$$

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

Kinematické a dynamické veličiny, které charakterizují proudění kapalin, se využívají ke stanovení viskozity.

Dynamická viskozita

Dynamická viskozita vyjadřuje sílu nutnou k pohybu jednotkové plochy uvnitř kapaliny, která se pohybuje danou rychlostí proti druhé rovnoběžné vrstvě vzdálené 1 m. Značí se řeckým písmenkem η [éta].

Jednotkou dynamické viskozity je ($N \cdot m^{-2} \cdot s$) neboli (Pa.s). Viskozita laminárního proudění kapaliny, kde je gradient rychlosti 1 s^{-1} vzniká tečné napětí 1 Pa. Další jednotkou může být Poise, ta odpovídá viskozitě 0,1 Pa.s.

Kinematická viskozita

Je označována řeckým ν [ný] a je to míra odporového toku kapaliny pod vlivem gravitace. Je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny. Jednotkou kinematické viskozity je ($m^2 s^{-1}$).

Poiseuilleův vztah

Proudí-li newtonská kapalina malou rychlostí úzkou trubicí, je rozložení vektoru rychlosti v osovém řezu parabolické a proudění je laminární.

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot t \quad (9)$$

Je to vztah mezi objemem kapaliny protečeným trubicí za čas t a úbytkem tlaku Δp na délce L trubice o poloměru r [10].

Stokesův vztah

Při pohybu tělesa v kapalině klade kapalina jeho pohybu odpor, který je při pomalém proudění přímo úměrný rychlosti. Pro nepříliš veliké rychlosti pohybu koule (tělesa) při laminárním obtékání platí vztah:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (10)$$

Pokud padá koule o dané hustotě kapalinou dolů, která má svou hustotu, tak na kouli působí vztlaková síla, tedy síla která kouli nadlehčuje:

$$F' = mg - V\rho g = \frac{4}{3}\pi r^4(\rho_k - \rho)g \quad (11)$$

6.3 Metody měření viskozity

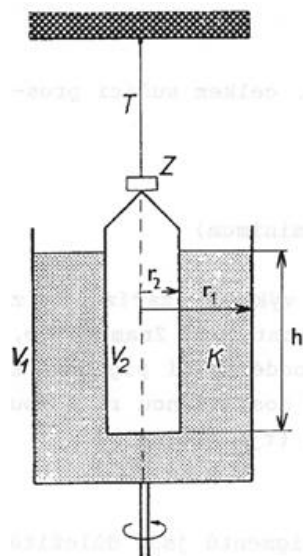
Viskozitu kapalin můžeme měřit několika způsoby:

- Rotačním viskozimetrem
- Pádovým viskozimetrem
- Vibračním viskozimetrem
- Průtokovým viskozimetrem

Základní podmínkou pro měření viskozity je, že proudění kapaliny všemi typy viskozimetrů musí být laminární [10]. Nenewtonské kapaliny lze správně měřit jen speciálními kapilárními a rotačními viskozimetry.

6.3.1 Rotační viskozimetry

Toto zařízení pracuje na principu pohybu jedné plochy a brzdného účinku měřené kapaliny při různých rychlostech otáčení, takže se kapalina podrobuje smyku mezi dvěma definovanými plochami. Nejběžnější typ rotačního viskozimetru s dvěma souosými válci V_1 a V_2 , mezi kterými je kapalina K , je znázorněn na Obrázku 17). Jeden z válců V_1 se při měření uvede do rotace, kde při stálé rychlosti rotace se sleduje moment síly M působící na druhý válec V_2 .



Obrázek 20) Základní typ rotačního viskozimetru

Pro tento viskozimetr platí vztah:

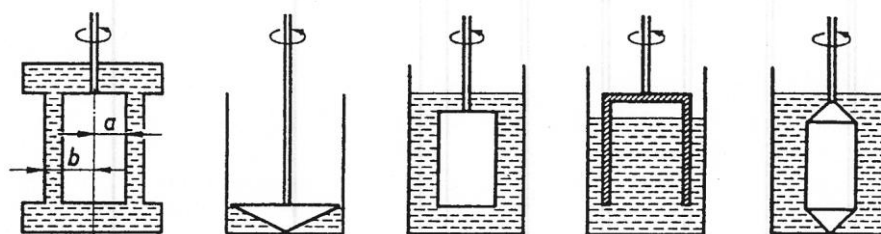
$$\eta = \frac{M(\frac{1}{r_1^2} - r_1^2)}{4\pi \cdot h \cdot \omega} = A \cdot \frac{M}{\omega}, \quad (12)$$

kde A je konstanta přístroje.

Rovnice platí jen v případě, že je stabilní laminární tok ve štěrbině a zanedbávají se koncové a hranové efekty [7].

V komerčně dostupných viskozimetrech se otáčení válce řídí elektronicky, což je jednodušší pro další zápis či zpracování výsledků.

U rotačních viskozimetrů může nastat problém se smykovou deformací v prostoru mezi válci, kde je běžně uváděná hodnota 20 % mezi oběma povrchy. Dalším problémem je i ohřev vzorků při rotaci vnitřního válce, s rostoucí rotací válce roste i teplota vzorku a proto se mění i viskozita.



Obrázek 21) Různé úpravy rotačních viskozimetrů

6.3.2 Pádové viskozimetry

Pracuje na principu pádu definovaného tělíska. Nejjednodušším viskozimetrem je Stokesův viskozimetr. Podle Stokese platí zákon pro rychlost pádů tělíska.

$$v = \frac{F}{6\pi\eta \cdot r}, \quad (13)$$

$$F = \frac{3}{4\pi} \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g, \quad (14)$$

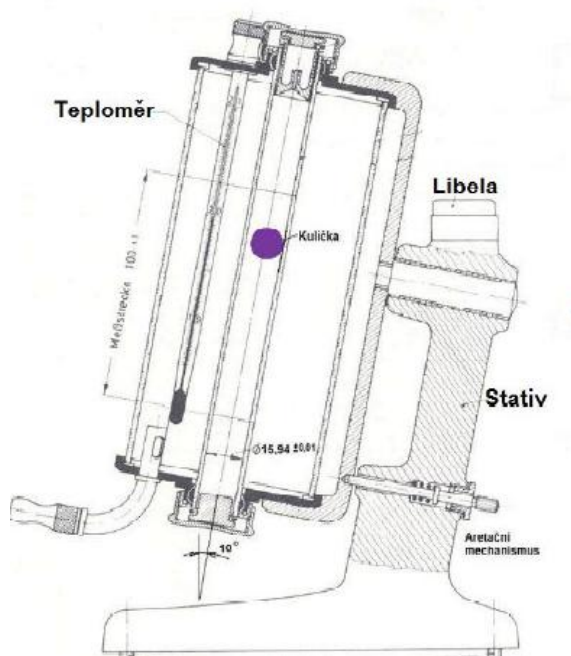
Kde ρ a ρ_0 jsou hustoty kapaliny a tělíska a r je poloměr tělíska.

Pro stanovení viskozity platí vztah:

$$\eta = 2g \cdot r^2 \cdot \frac{\rho - \rho_0}{9v} \quad (15)$$

Dalším zařízením, které pracuje na tomto principu, je Höpplerův viskozimetr. Ten používá jako pádové tělísko kuličku (kovovou nebo skleněnou), která padá pod definovaným úhlem 10° skleněnou trubicí. Ta má průměr o něco větší než je samotná kulička.

Viskozimetr má jednoduchou konstrukci - kalibrovanou skleněnou trubicí, ve které padá kulička v měřené kapalině. Trubička je opatřena dvěma ryskami, mezi kterými se měří doba pádu kuličky [9].



Obrázek 22) Pádový Höpplerův viskozimetr [9]

6.3.3 Vibrační viskozimetry

Princip vibračního viskozimetru spočívá ve vibraci čidel (destiček) v kapalině, kde v závislosti na viskozitě kapaliny dochází k útlumu vibrací. Měřicí uspořádání a znázorněný směr kmitů destiček je znázorněno na obrázku 20). Snímací destičky jsou spojeny s pružinovou destičkou, která vibruje jednotnou frekvencí. Tyto kmity jsou buzeny elektromagnetem, která je součástí elektromagnetického pohonu. Amplituda se mění v závislosti třecí síly, která vzniká mezi snímací destičkou a vzorkem kapaliny. Vibrační viskozimetr ovládá elektrický proud vibrující pružinové destičky za účelem vytvoření jednotkové amplitudy. Řídicí síla odpovídající viskozitě je přímo úměrná součinu viskozity a hustoty měřeného vzorku kapaliny. Když vibruje pružinová destička konstantní frekvencí, je vytvořena jednotková amplituda pro vzorky s rozdílnou viskozitou, řídicí elektrický proud je také přímo úměrný součinu viskozity a hustoty každého vzorku. Při měření vibračním viskozimetrem je fyzikální veličina detekována jako součin viskozity a hustoty. Hodnota součinu viskozity a hustoty je zobrazena přímo na displeji přístroje jako zdánlivá viskozita. Absolutní (dynamickou) viskozitu je možné přepočítat pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{\eta_{zd}}{\rho}, \quad (16)$$

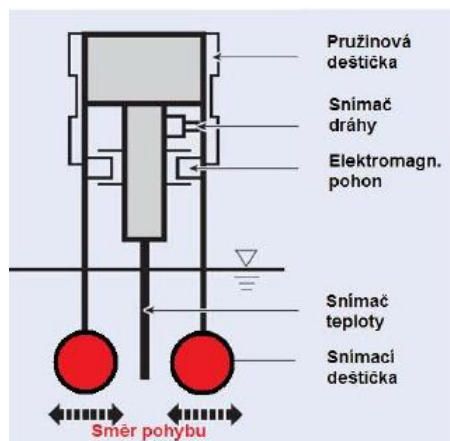
kde η_{zd} je zdánlivá viskozita naměřená přístrojem a ρ je hustota vzorku.

Výše uvedený popis principu vibračního viskozimetru se týká přístroje od firmy A&D.

Měří se prakticky třemi způsoby:

- příkon oscilace s konstantní amplitudou a frekvencí
- doba útlumu po vypnutí přístroje
- rezonanční frekvence

Rezananční přístroje využívají k měření různých tvarů těles. Jsou to např.: deska, válec, kruhový terč apod.

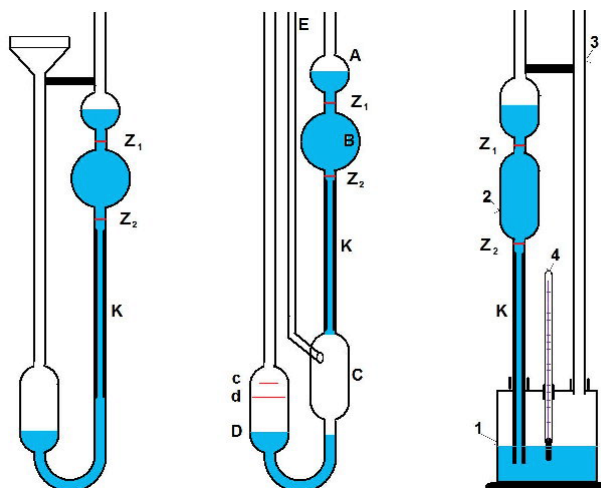


Obrázek 23) Složení vibračního viskozimetru

6.3.4 Průtokové viskozimetry

Fungují na principu stálého tlakového rozdílu. Měřenou veličinou je objemový průtok. Velikost tlaku určuje buď hydrostatický tlak sloupce kapaliny, tlak inertního plynu na hladinu, a nebo píst, který je ve výtlačných viskozimetrech. V praxi nemusí být viskozita měřena přímo, ale na základě srovnání s referenční kapalinou o známé viskozitě, která je dána vztahem:

$$v = \frac{t}{t_0} v_0 \quad (17)$$



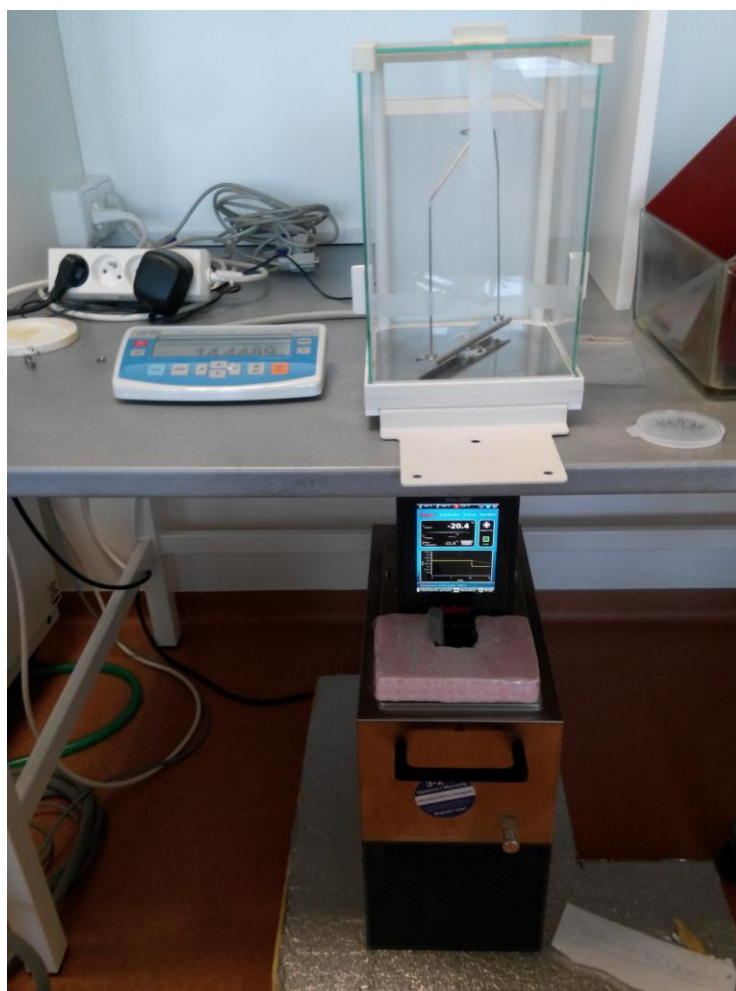
Obrázek 24) Průtokové kapilární viskozimetry [9]

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7.1 Měření hustoty různých vzorků olejů

Měření bylo provádělo v laboratořích na fakultě FEKT, ústavu elektrotechnologie na certifikovaných zařízeních určených pro měření váhy pomocí ponořeného tělíska do kapaliny.

Měření hustoty bylo rozděleno do několika fází. Nejdříve se pomocí vah Radwag XA 310/X a termostatu HUBERT Pilot one 181510 změřila váha tělíska ponořeného do různých olejů, které se ohřívaly v širokém teplotním rozsahu.



Obrázek 25) Zařízení na měření váhy pomocí ponorného tělíska Radwag XA 310/X (nahore) a termostát HUBERT Pilot one (dole)

Do odměrného válce o objemu 200ml bylo nalito 80ml kapaliny. Válec s kapalinou byl následně vložen do termostatu HUBERT a zakryt, aby se do kapaliny nedostala žádná nečistota či vlhkost, která by měření znehodnotila.

Při měření bylo dbáno na přesnost odečtení hodnot hmotnosti váhy tělíska při dané teplotě, která se ověřovala externím teploměrem Greisinger. Během měření bylo potřeba dbát na to, aby se tělísko, které bylo ponořené do kapaliny, nedotýkalo stěny odměrného válce. V tomto případě by hodnoty váhy byly nepřesné.

Tělísko, které je ze skla má daný objem $10,018 \text{ g/cm}^3$. Podle vzorce

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} + \rho_v \quad (18)$$

byla vypočítána hustota pro jednotlivé kapaliny při různých teplotách. Tyto hodnoty jsou zapsány v kde ρ_0 je hustota při počáteční teplotě, β je teplotní součinitel objemové roztažnosti a $\Delta\theta$ je rozdíl teplot.

Tabulka 3).

Jednotlivé hustoty s pomocí koeficientu β lze počítat i se vztahem:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \Delta v}, \quad (19)$$

kde ρ_0 je hustota při počáteční teplotě, β je teplotní součinitel objemové roztažnosti a $\Delta \vartheta$ je rozdíl teplot.

Tabulka 3) Vypočítané hodnoty hustot kapalin v závislosti na teplotě

	rýžový olej	kyselina olejová	MOGUL trafo D	olivový olej	MEŘO	sojový olej	slunečnicový olej	kyselina linolová
θ (°C)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)	ρ (kg/m³)
-20	-	-	890,8	-	917,0	-	-	-
-15	-	-	887,5	-	913,7	-	946,0	-
-10	-	-	883,4	942,4	910,8	950,2	942,0	-
-9,5	-	-	-	-	-	-	-	900,1
-9	-	-	-	-	-	947,4	-	-
-7	-	-	-	-	-	945,2	-	-
-5	-	-	880,1	931,2	906,3	944,0	938,6	897,0
0	-	-	875,7	927,4	902,0	939,6	934,5	893,0
1,4	932,9	-	-	-	-	-	-	-
3	932,2	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	906,0	-	-	-	-	-	-
5	930,4	905,2	872,8	923,8	898,2	936,6	931,6	889,5
6	-	904,3	-	-	-	-	-	-
7	929,1	903,5	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	926,9	901,3	867,9	921,2	893,8	933,4	928,3	885,8
15	922,9	898,1	867,8	917,8	890,2	930,1	924,9	882,3
20	920,7	894,2	864,0	913,9	887,3	923,6	921,7	877,3
25	917,9	890,9	861,0	911,9	883,7	919,9	918,4	875,1
30	915,0	888,1	857,7	907,3	876,8	916,9	913,8	872,1
40	907,4	881,2	851,3	900,4	869,7	910,2	907,6	859,6
50	900,9	874,4	844,7	894,3	862,7	903,7	900,7	851,6
60	893,9	867,0	838,1	887,9	855,8	897,6	894,1	844,6
70	887,6	860,0	831,8	881,1	847,8	889,9	887,5	832,8
80	881,0	853,8	826,3	874,0	842,2	883,3	880,9	831,9
90	874,1	847,1	819,1	862,8	834,4	873,6	876,7	814,0

Abychom zjistili jak se kapalina chová při teplotních změnách, bylo nutné odvodit ze vztahu (2) vztah pro výpočet teplotního součinitele objemové roztažnosti β .

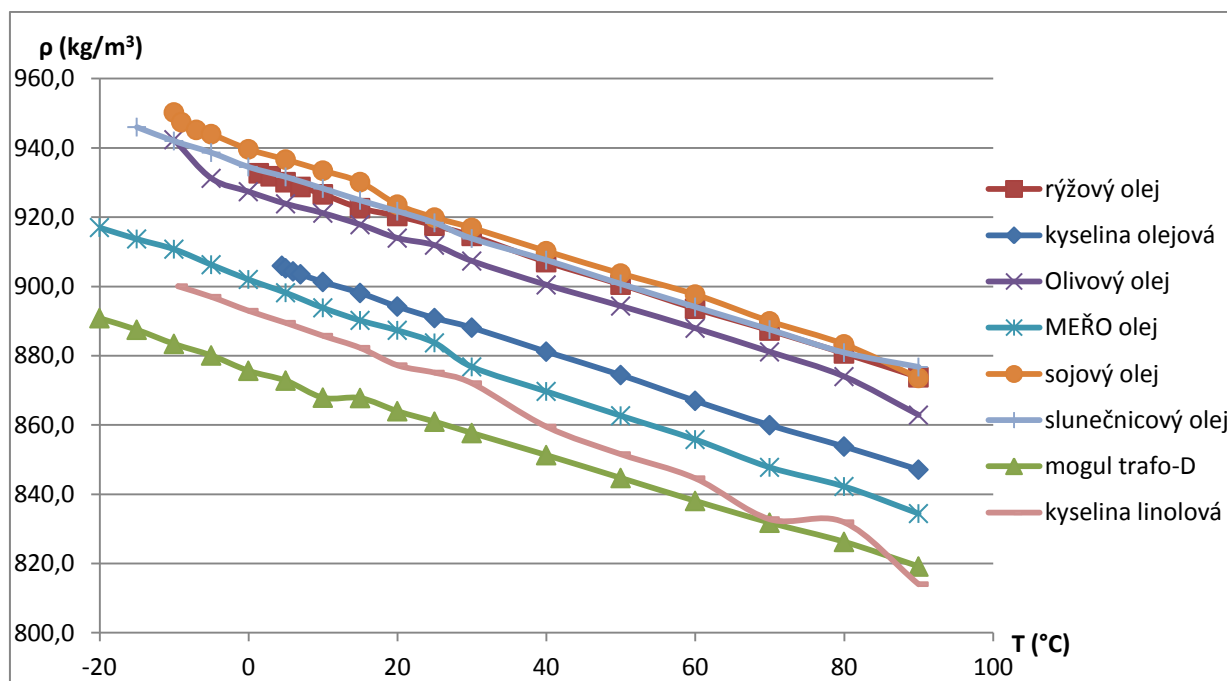
$$\beta = \frac{\rho_0}{\rho \cdot \Delta\vartheta} - \frac{1}{\Delta\vartheta}, \quad (20)$$

kde ρ je hustota vzorku, ρ_0 je počáteční hustota vzorku, $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot v počátečním a koncovém stavu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4).

Tabulka 4) Vypočítané a určené hodnoty teplotního součinitele objemové roztažnosti

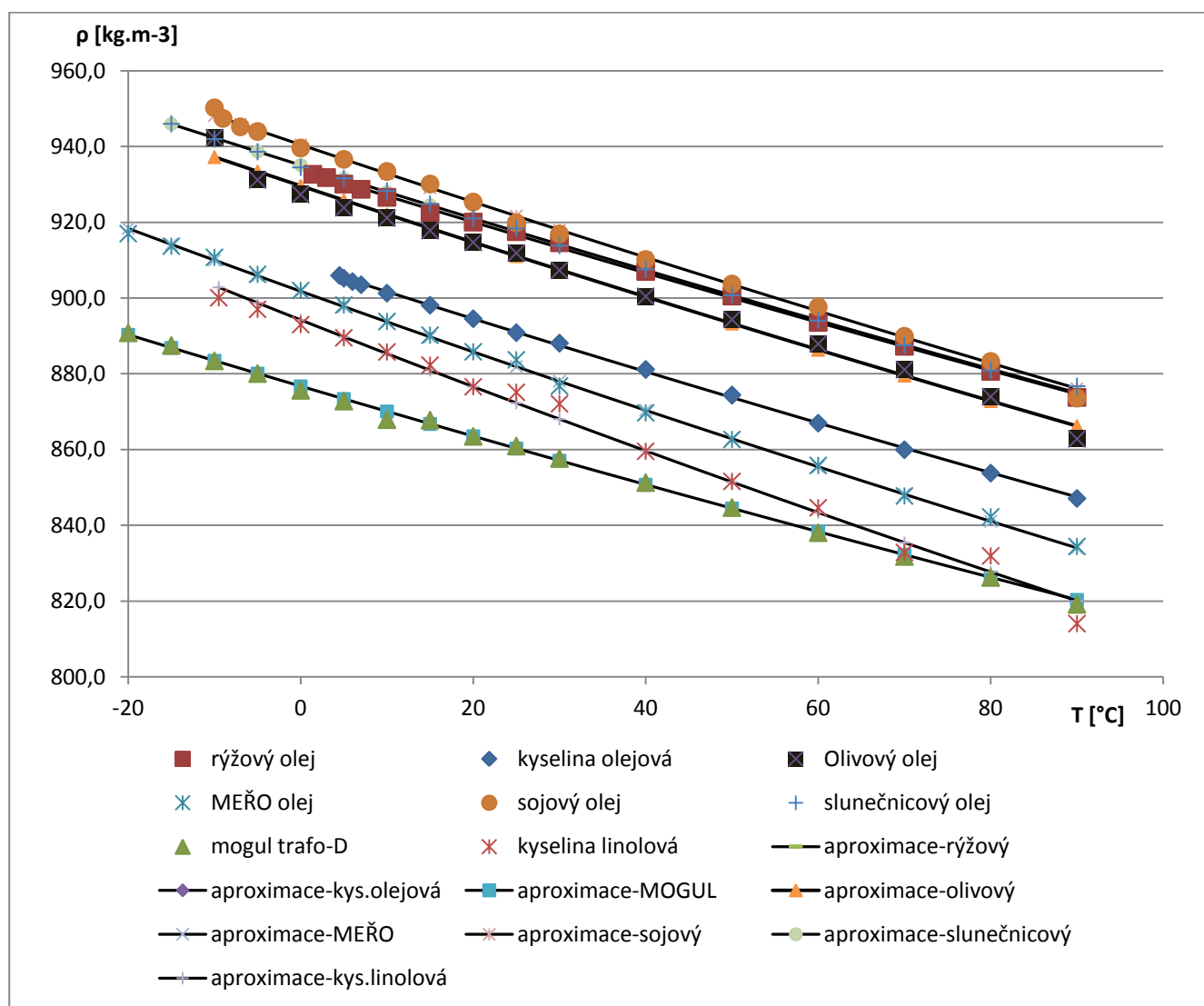
Název kapaliny	vypočítaný koeficient β (K ⁻¹)
rýžový olej	7,416E-04
kyselina olejová	7,942E-04
MOGUL trafo D	7,522E-04
olivový olej	8,000E-04
MEŘO	8,866E-04
sojový olej	8,034E-04
slunečnicový olej	7,529E-04
kyseliny linolová	9,856E-04

Všechny naměřené a vypočítané hodnoty hustot byly vloženy do grafu, který znázorňuje jejich chování při stoupající teplotě. Rozsah měření byl prováděn v rozmezí od záporných teplot, kde max. hodnota nepřesáhla -20 °C do maximálních kladných teplot 90 °C. Závislost jednotlivých hustot kapalin je zobrazena na Obrázek 27).



Obrázek 26) Závislost hustoty kapalin na teplotě všech vzorků změřených na vahách

V MS Excel byla vypočítána aproximace jednotlivých olejů pomocí metody nejmenších čtverců. Jako pevná hodnota byla brána vypočítaná hodnota bety, ρ_0 a vztažná teplota, což byla 20 °C. Hodnoty byly dosazeny do vzorce (19). Díky funkci „řešitel“ jsme dostali hodnoty na proložení grafu přímkou podle ideálních hodnot. Obrázek 27) znázorňuje body naměřených hustot v závislosti na teplotě a přímky, které znázorňují aproximaci pomocí metody nejmenších čtverců.



Obrázek 27) Závislost hustoty olejů (bodově) a hustot vypočítané pomocí aproximace (přímka)

Tabulka 5) Použité přístroje a materiál při měření hustoty

Přístroj, materiál:	Označení:
Váhy Radwag	XA 310/X
Termostat Hubert	Pilot one 181510
externí teploměr Greisinger	GMH 3710
Chladicí/ohřívací médium	nemrznoucí směs/destilovaná voda
Standardní tělísko	$V = 10,018 \text{ cm}^3$
Odměrný válec Simax	$100 \text{ ml} \pm 2 \text{ cm}^3$

7.1.1 Výsledky

Z měření hustot kapalin lze jednoznačně říci, že nejmenší hustotu v celém rozsahu teplot měl ropný olej MOGUL s označením TRAFO–D. Jde o neinhibovaný transformátorový olej získaný z parafinické ropy. Tento olej vykazoval nízkou hustotu i při nízkých teplotách pod -20 °C a to $890,8 \text{ kg/m}^3$. Naopak jako nejvíce hustý olej se ukázal být olivový, který v záporných teplotách nabýval hodnoty až $942,4 \text{ kg/m}^3$.

7.2 Měření viskozity různých vzorků olejů

7.2.1 Měření pomocí vibračního viskozimetru

Měření byla prováděna na fakultě FEKT na ústavu elektrotechnologie. Byl použit vibrační viskozimetr od firmy B&D typu SV-10.



Obrázek 28) Vibrační viskozimetr SV-10

Před samotným měřením bylo potřeba viskozimetr kalibrovat. To bylo provedeno podle návodu, který je k přístroji přiložen.

Jelikož se kapaliny měří v širokém teplotním rozsahu, tak je potřeba přístroj kalibrovat tzv. dvoubodově. To znamená, že se měří dvě kapaliny jedna je obyčejná voda při 25 °C a druhá standardní kapalina s danou viskozitou při 25 °C. Během kalibrace je potřeba dávat zvýšenou opatrnost právě na teplotu obou kapalin – teplota musí být 25 °C, jinak je kalibrace provedena špatně a přístroj by potom vykazoval výchyly měření.

Při kalibraci byla nejdříve změřena voda, hodnota hustoty vody při 25 °C je $0,997 \text{ g/cm}^3$. Tato hodnota se musí převést do zdánlivé viskozity, kterou měří přístroj. Dynamická viskozita vody je 0,8937 mPa.s. Pomocí upraveného vzorce (16) je výsledná zdánlivá viskozita 0,891 mPa.s. Tato hodnota byla zapsána do přístroje. Poté se změřila standardní kapalina, opět musela mít 25 °C. Byla použita kapalina Brookfield s viskozitou 49,4 mPa.s. Po změření a opravení hodnoty druhé kapaliny, byl přístroj připraven k měření.

Při měření pro kladné teploty tj. rozsah od 25 °C do 90 °C byl použit sterilizátor, ve kterém byl vzorek zahřán na teplotu zhruba 110 °C. Během přenosu k viskozimetru vzorek zchladl na požadovanou teplotu 90 °C od které probíhalo měření. Viskozimetr byl spuštěn pomocí programu na měření viskozity, který byl nainstalovaný v PC.

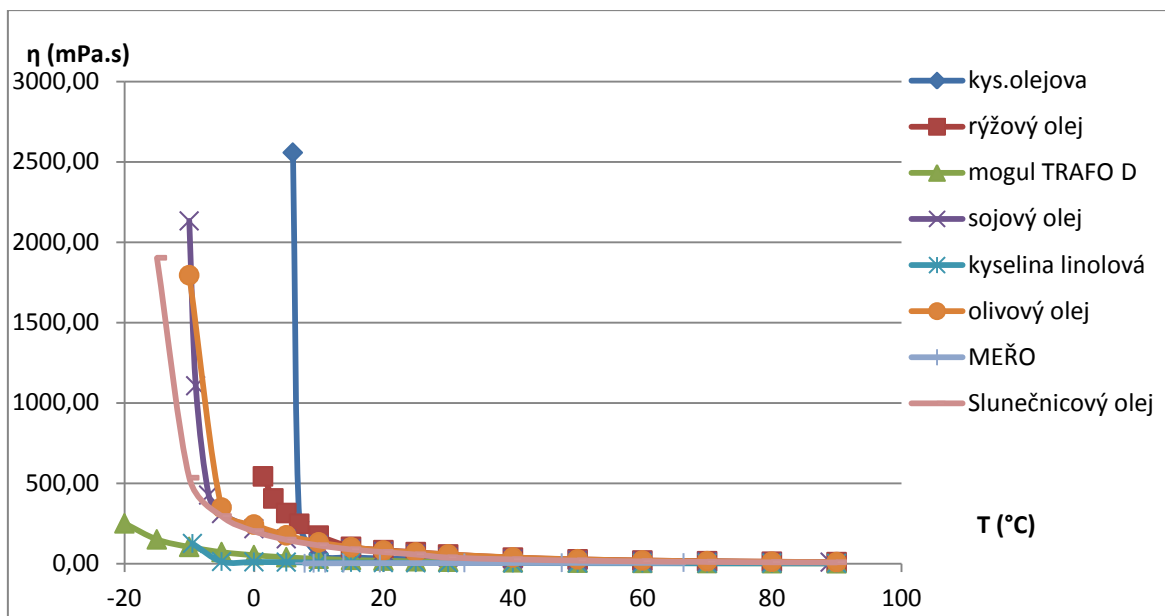
Po vložení vzorku do viskozimetru a spuštění programu, kapalina pomalu chladla až po teplotu 25 °C.

Pro záporné hodnoty byl použit mrazicí box Elcold. Bylo potřeba vzorky sledovat, protože každý vzorek má svou individuální teplotu tuhnutí. Vzorky byly zchlazeny zhruba o 10 °C pod jejich bod tání, aby při přenosu a následném vložení do viskozimetru byla hodnota viskozity co nejvyšší. Po zapnutí programu kapalina pomalu

tála a ohřívala se okolní teplotou až do teploty 20 °C.

Naměřené hodnoty viskozit byly protříděny a zapsány. Byl proveden přepočet pomocí vzorce (16) ze zdánlivé viskozity na dynamickou a tyto hodnoty zapsány do tabulky 8).

Z hodnot uvedených v tabulce byl vytvořen graf, který znázorňuje chování dynamické viskozity kapalin na rozsahu teplot od -20 °C do 90 °C.



Obrázek 29) Závislost dynamické viskozity na teplotě pro všechny vzorky

Dynamická viskozita byla aproximována pomocí vzorce (21) k hodnotám dvou neznámých, které jsou v roli materiálových konstant bylo docíleno pomocí vzorců (22) a (23). Aproximovalo se opět pomocí metodou nejmenších vzorců v MS Excel zlomocí nástroje „řešitel“.

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T}, \quad (21)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty a T je teplota.

$$A = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (22)$$

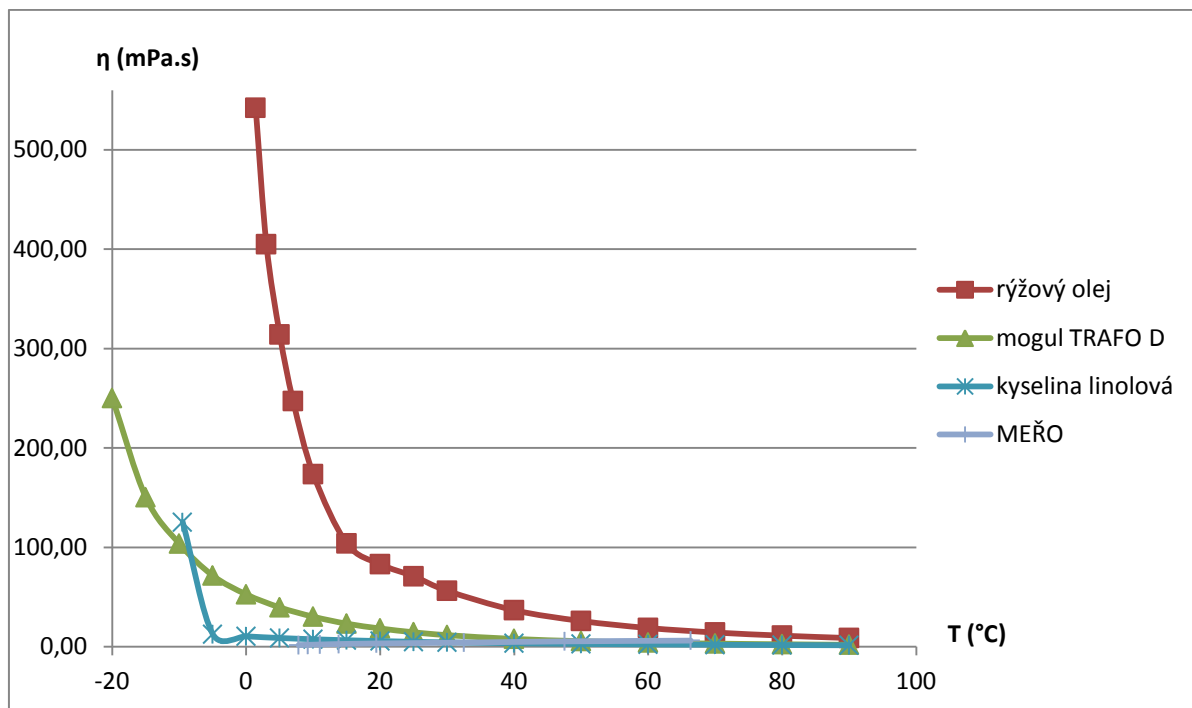
$$B = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (23)$$

kde n je celkový počet proměnných, x_i je převrácená hodnota teploty a y_i je logaritmus dynamické viskozity.

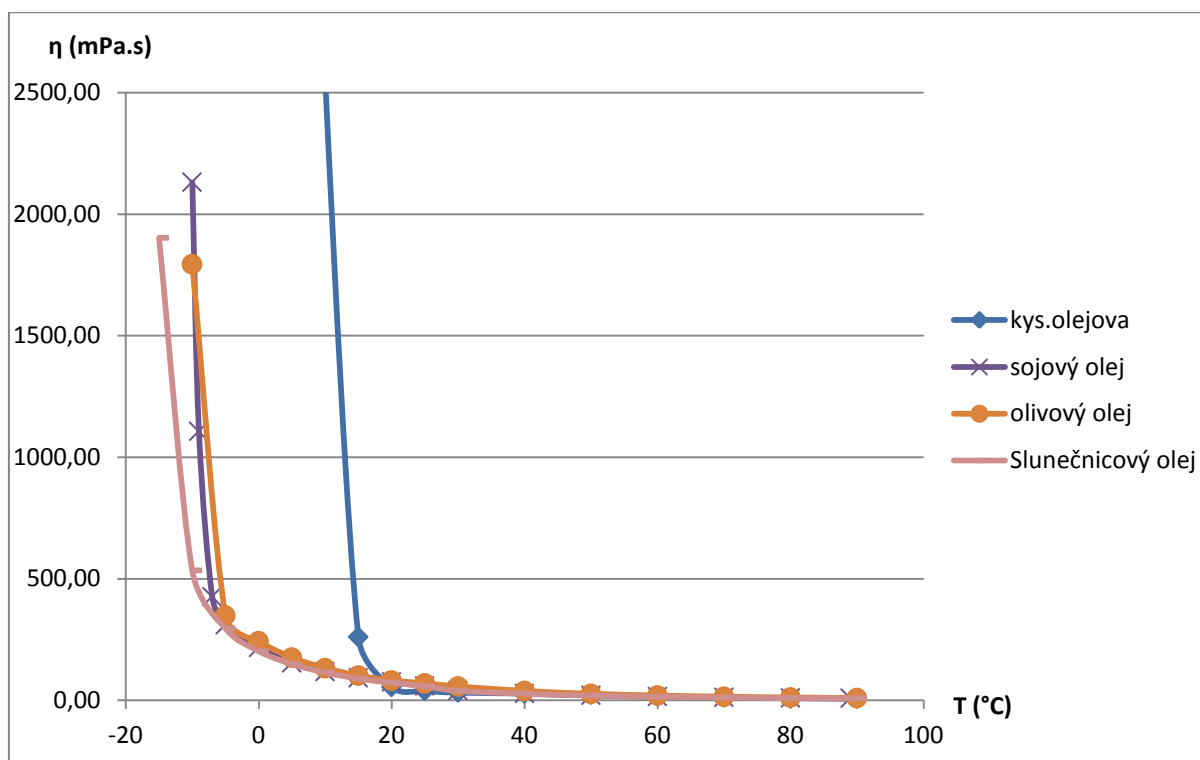
Tabulka 6) Hodnoty dynamických viskozit vzorků v závislosti na teplotě

	rýžový olej	kyselina olejová	MOGUL trafo D	olivový olej	MEŘO	sojový olej	slunečnicový olej	kyselina linolová
T (°C)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)	η (mPa.s)
-20	-	-	250,3	-	66,4	-	-	-
-15	-	-	150,5	-	47,5	-	1902,6	-
-10	-	-	103,8	1794,0	32,5	2132,0	534,1	-
-9,5	-	-	-	-	-	-	-	125,3
-9	-	-	-	-	-	1106,4	-	-
-7	-	-	-	-	-	426,2	-	-
-5	-	-	71,7	348,3	19,5	310,6	295,8	12,6
0	-	-	52,8	242,8	13,8	216,7	202,3	10,5
1,4	542,3	-	-	-	-	-	-	-
3	405,1	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	4979,6	-	-	-	-	-	-
5	314,2	4819,5	39,7	175,6	11,0	153,8	149,2	8,82
6	-	2556,8	-	-	-	-	-	-
7	247,2	260,5	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	173,7	54,9	30,3	131,9	9,2	117,8	114,2	7,56
15	104,0	38,8	23,3	101,5	7,8	92,6	89,3	6,56
20	83,1	31,8	18,5	81,2	6,8	75,8	72,5	5,75
25	70,9	28,3	14,7	69,4	6,3	58,8	57,6	5,00
30	56,3	23,6	11,8	56,6	5,5	39,9	38,9	4,41
40	36,8	16,7	8,0	38,1	4,2	27,9	27,2	3,53
50	26,0	12,1	5,8	26,5	3,3	20,4	19,8	2,85
60	18,9	9,1	4,3	19,3	2,7	15,4	14,9	2,37
70	14,4	7,1	3,3	14,5	2,2	12,0	11,6	2,01
80	11,2	5,6	2,6	11,3	1,9	9,6	9,2	1,71
90	8,8	4,7	2,1	9,0	1,6	8,7	8,3	1,50

Pro lepší přehlednost je závislost pro oleje, kde teplota nesahala pod bod mrazu oddělena. Viz. Obrázek 30) a 31).

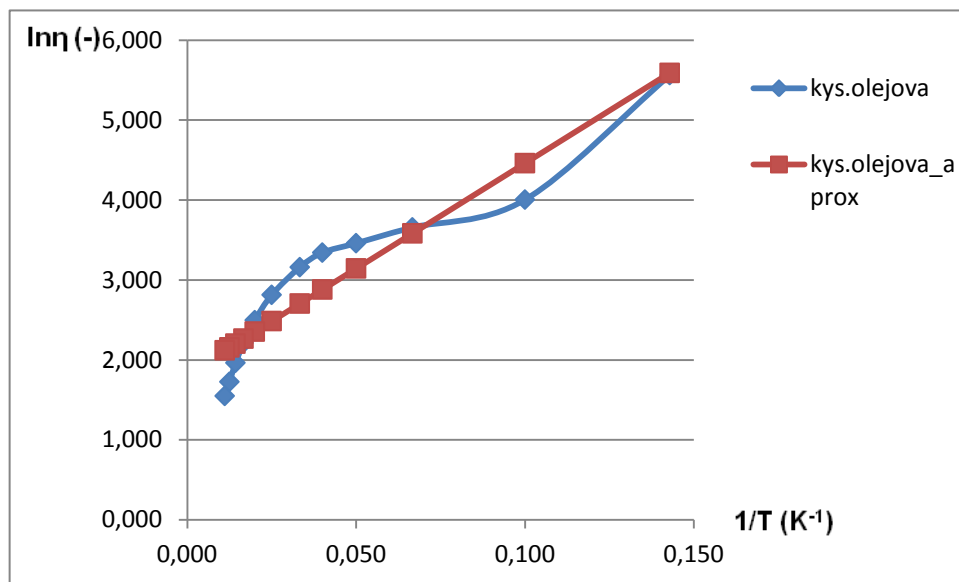


Obrázek 30) Závislost dynamické viskozity na změně teploty pro rýžový, mogul, MEŘO olej a kyselinu linolovou

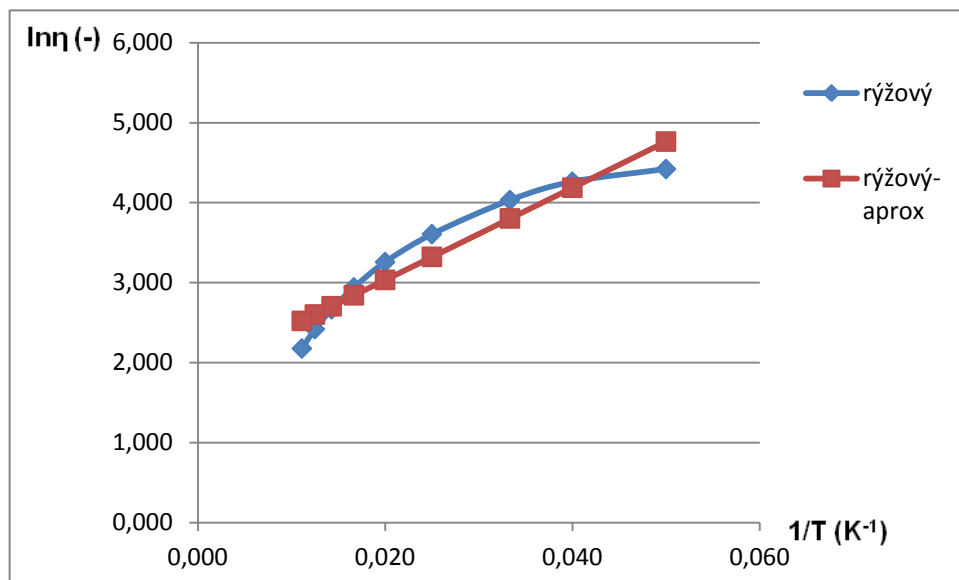


Obrázek 31) Závislost dynamické viskozity na změně teploty pro sojový, olivový, slunečnicový olej a pro kyselinu olejovou

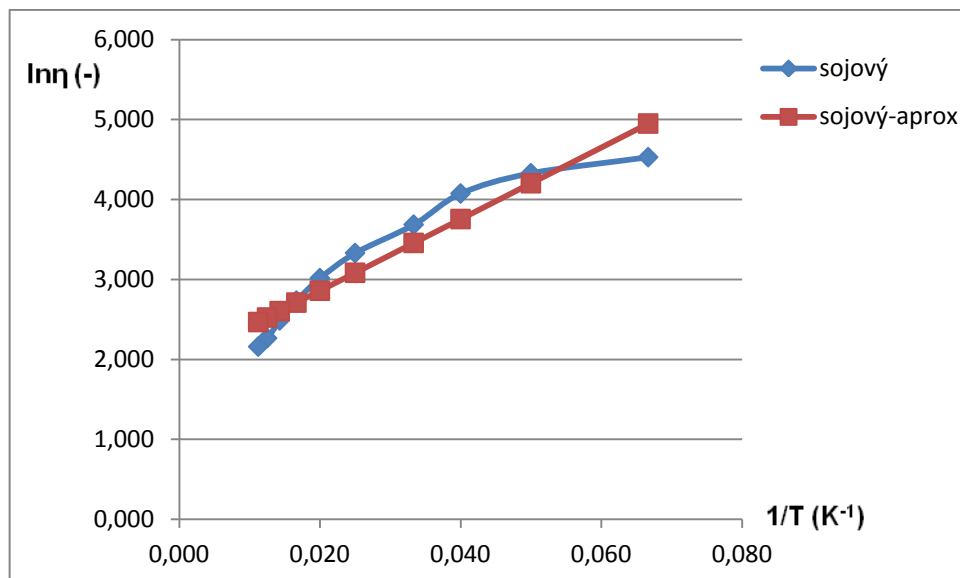
Následující obrázky ukazují vybrané části dynamické viskozity a výpočtu pomocí aproximace. Byly vybrány jen ty části, kde olej měl „normální“ viskozitu, tj. viskozita, kde nedocházelo k polymerování. Pro svou nepřehlednost nejsou další části zobrazeny.



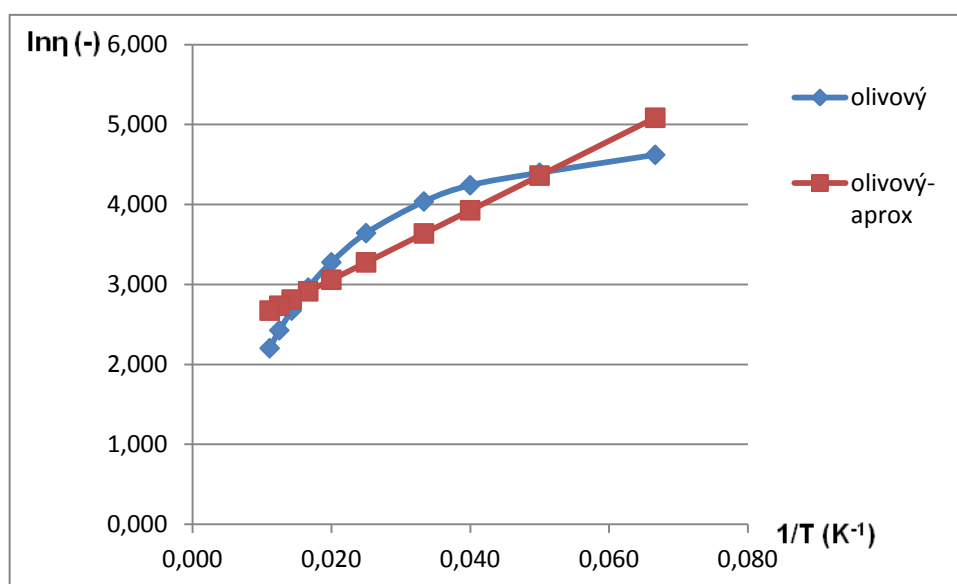
Obrázek 32) Závislost logaritmu dynamické viskozity kys. olejové na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



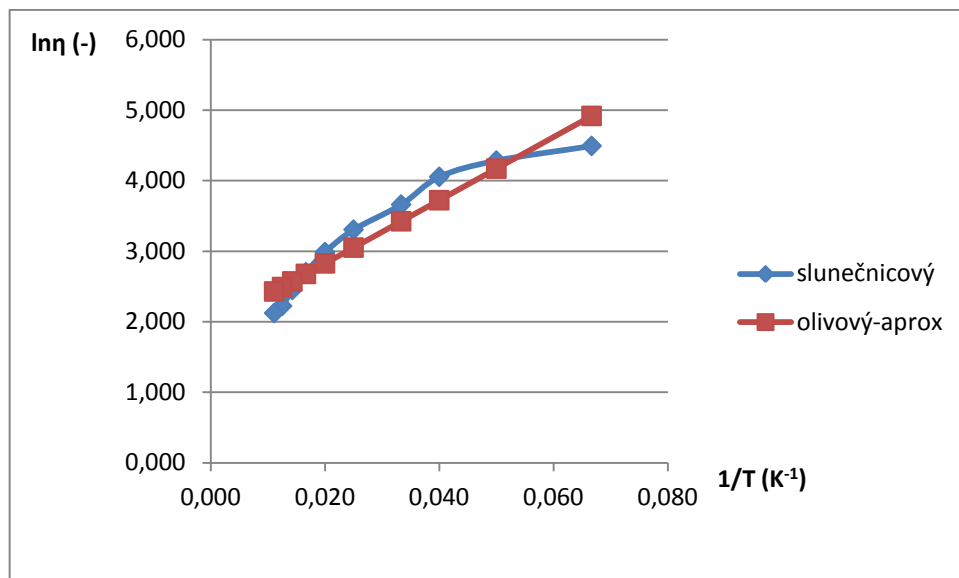
Obrázek 33) Závislost logaritmu dynamické viskozity rýžového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



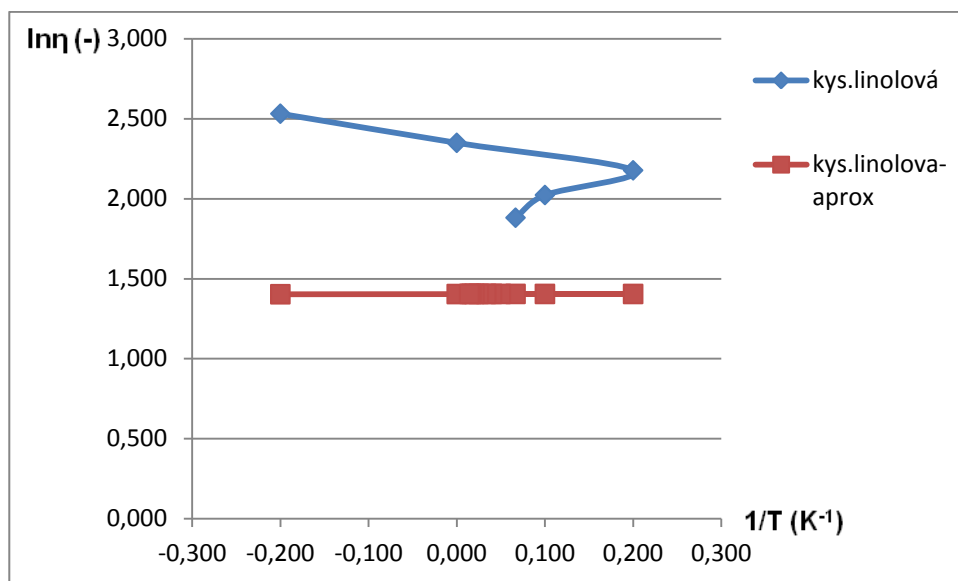
Obrázek 34) Závislost logaritmu dynamické viskozity sojového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



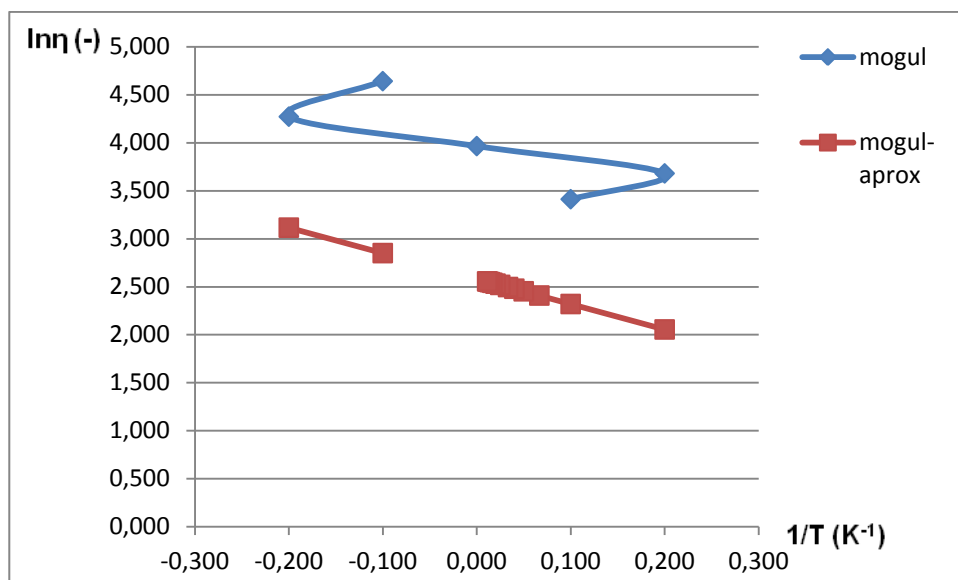
Obrázek 35) Závislost logaritmu dynamické viskozity olivového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



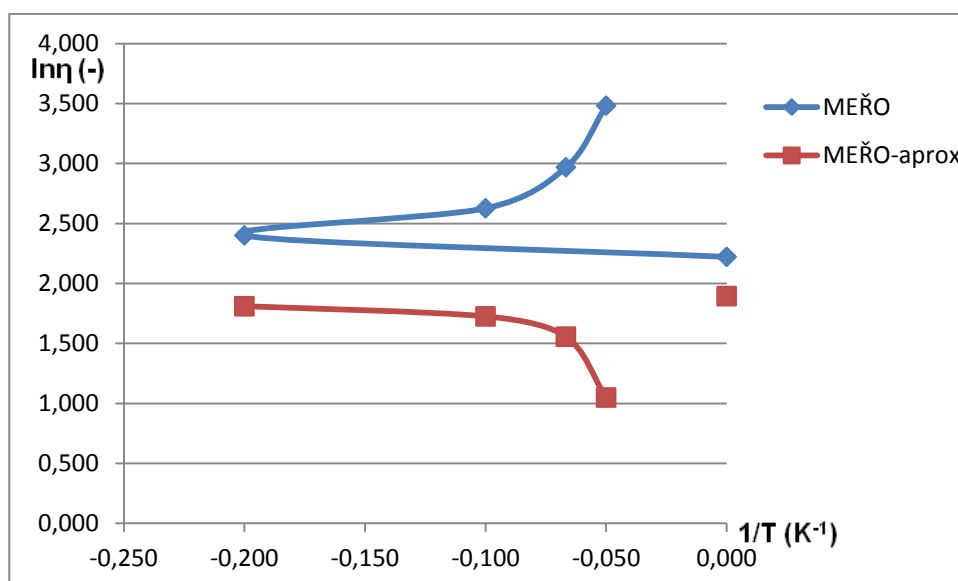
Obrázek 36) Závislost logaritmu dynamické viskozity slunečnicového oleje na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



Obrázek 37) Závislost logaritmu dynamické viskozity kyseliny linolové na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



Obrázek 38) Závislost logaritmu dynamické viskozity mogulu trafo D na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou



Obrázek 39) Závislost logaritmu dynamické viskozity mogulu trafo D na převrácené hodnotě teploty s aproximační křivkou

Tabulka 7) Použité přístroje a materiál při měření viskozity

Přístroj, materiál:	Označení:
Vibrační viskozimetr	SV-10 vč.1480
Síťová brána Agilent technology	E5810B
externí teploměr Greisinger	GMH 3710
Sterilizátor STERICELL	BMT
Sterilizátor STERICELL	55 STAN
Brookfield standardní kapalina	fluid 50, visco 49,4
Mrazicí box elcold 130l	UNI 11/ EL 11LT
Injekční stříkačky Chirana	20 – 23ml
PC	Office Pro 2000N MDI
Program pro měření viskozity	Měření VISCO SV 10

7.2.2 Výsledky

Kapalina, která si uchovala nižší viskozitu i při záporných teplotách byl trafo olej MOGUL. Z rostlinných olejů to byl olivový, slunečnicový a sojový olej. Tyto rostlinné oleje jsou použitelné pouze do teploty okolo -10 °C, kdy jejich viskozita začíná prudce stoupat. Kyselina linolová, jedna ze složek rostlinných olejů, měla hraniční teplotu taky okolo -10 °C.

7.3 Měření pomocí Höpplerova viskozimetru

V této části bude popsáno měření pomocí Höpplerova viskozimetru, se kterým byly měřeny dvě kapaliny – MEŘO a sojový olej.

Měření probíhalo v laboratořích na ústavu elektrotechnologie. Pro měření viskozity byl použit Höpplerův viskozimetr s termostatem Hubert. Jako chladicí a zahřívací médium byl zvolen olej Midel 7131, který vykazuje dobré nemrznoucí a nehořlavé vlastnosti. Použité přístroje a materiál jsou sepsány v tabulce 9).

Tabulka 8) Použité přístroje a materiál

Přístroj, materiál:	Označení:
Höpllerův viskozimetr	B3
Termostat Hubert	CC – K6 - NR
Čidlo externí teploměr Hubert	Pt100, průměr 6 mm
Lázeň chladicí Hubert nerez	
Chladicí/ohřívací médium	Midel 7131
Souprava kuliček	BC 4288/802338
Stopky olympia sport	

7.3.1 Měření dynamické viskozity oleje MEŘO

Pro měření oleje MEŘO byla zvolena lehčí, tedy skleněná kulička s předem definovanou hmotností, průměrem a hustotou. Konstanta K byla zprůměrována ze dvou zadaných hodnot. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10).

Tabulka 9) Hodnoty skleněné kuličky

Skleněná kulička	
Průměr	15,62 mm
Hmotnost	4,45650 g
Hustota	2,227 g/cm ³
Konstanta K	0,074019 mPa.cm ³ /g

Veškeré hodnoty byly převzaty z kalibračního listu pro Höpllerův viskozimetr B3 od firmy mLw.

Do viskozimetru a termostatu Hubert byl nalit olej Midel 7131, který koloval pomocí zabudovaného čerpadla v termostatu přes hadice do viskozimetru a zpět do termostatu. Do měřicí nádoby uprostřed viskozimetru bylo nalito téměř 38 ml oleje MEŘO, který byl měřen. Rozsah teplot byl nastaven od 10 °C do 90 °C.

Naměřené hodnoty, tedy časy za které kulička protнула obě rysky na měřicí nádobě při změnách teplot, jsou uvedeny v tabulce 11) společně s hodnotami hustot, dynamické a kinematické viskozity.

Tabulka 10) Naměřené a vypočtené hodnoty pro olej MEŘO

olej MEŘO									
T (°C)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	t5 (s)	průměr t (s)	ρ (g.cm ⁻³)	η ₁ (mPa.s)	η ₂ (mm ² /s)
10	106	105	108	107	107	106,6	0,894	14,85	16,62
20	78	79	79	81	82	79,8	0,887	11,12	12,44
30	61	61	61	60	62	61	0,877	8,5	9,51
40	49	49	49	48	49	48,8	0,870	6,8	7,61
50	39	39	39	38	39	38,8	0,863	5,41	6,05
60	31	31	31	31	31	31	0,856	4,32	4,83
70	26,8	26,4	26,5	26,7	26,5	26,6	0,848	3,7	4,14
80	22,8	22,5	22,8	22,7	22,1	22,6	0,842	3,15	3,52
90	20,1	20	19,9	19,9	19,9	20	0,834	2,78	3,11

Hustota byla vypočtena pomocí vztahu (18), změřené na vahách Radwag a termostatu HUBERT. Dynamická viskozita byla vypočtena pomocí vztahu:

$$\eta_1 = t(\rho_k - \rho) \cdot K, \quad (24)$$

kde t je průměrný čas za který kulička protнула risky na viskozimetru, ρ_k je hustota kuličky, ρ je hustota kapaliny a K je konstanta kuličky.

Kinematická viskozita pomocí vztahu

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\rho}, \quad (25)$$

kde η_1 je dynamická viskozita a ρ je hustota kapaliny.

7.3.2 Měření dynamické viskozity sojového oleje

Olej byl měřen předešlou metodou jako u oleje MEŘO. Rozdíly jsou vypsány.

Pro měření rafinovaného sojového oleje byla zvolena těžší, tedy kovová kulička s předem definovanou hmotností, průměrem, hustotou. Hodnoty pro kuličku jsou uvedeny v Tabulce 12).

Tabulka 11) Hodnoty kovové kuličky

Kovová kulička	
Průměr	15,54 mm
Hmotnost	16,045 g
Hustota	8,144 g/cm ⁻³
Konstanta K	0,13366 mPa.cm ³ /g

Veškeré hodnoty byly převzaty z kalibračního listu pro Höpplerův viskozimetr B3 od firmy mLw.

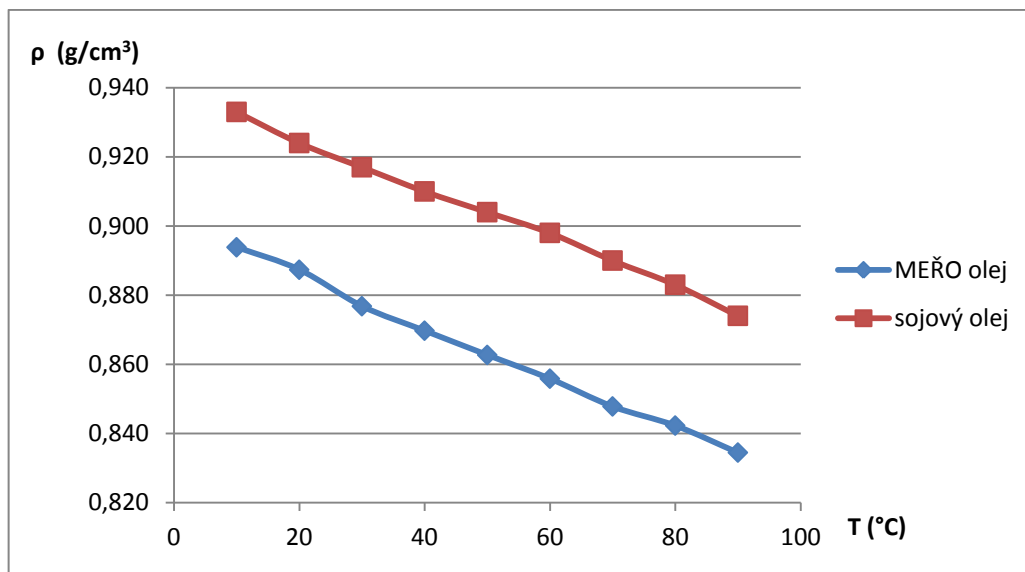
Postup měření je stejný jako pro olej MEŘO, kdy nám jako chladicí a zahřívací médium sloužil Midel 7131. Termostat byl nastaven na rozsah teplot od 10 °C do 90 °C.

Naměřené hodnoty, tedy časy za které kulička protнула obě rysky na měřicí nádobě při změnách teplot, jsou uvedeny v Tabulce 13) společně s hodnotami hustot, dynamické a kinematické viskozity.

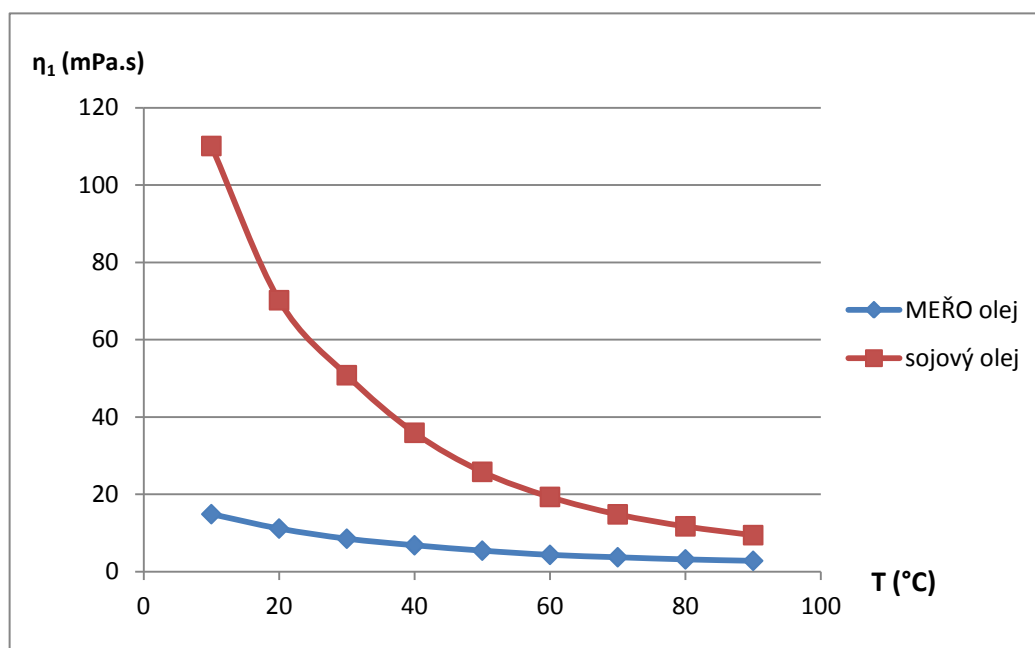
Tabulka 12) Naměřené a vypočítané hodnoty pro sojový olej

Sojový olej									
T (°C)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	t5 (s)	průměr t (s)	ρ (g/cm ³)	η (mPa.s)	η (mm ² /s)
10	110	111	114	112	110	111,4	0,933	110,1	117,9
20	73	72	72	71	71	71,8	0,924	70,2	76,0
30	51,4	52	52,4	53,2	52,7	52,34	0,917	50,8	55,4
40	37,4	37,4	36,9	37,1	37,4	37,24	0,910	35,9	39,4
50	26,9	26,9	27	26,9	27,3	27	0,904	25,8	28,6
60	20,3	20,3	20,2	20,3	20,3	20,28	0,898	19,3	21,5
70	15,6	15,6	15,7	15,7	15,9	15,7	0,890	14,8	16,6
80	12,5	12,2	12,5	12,6	12,7	12,5	0,883	11,7	13,2
90	10,1	10,2	10,2	10,2	10,2	10,18	0,874	9,42	10,8

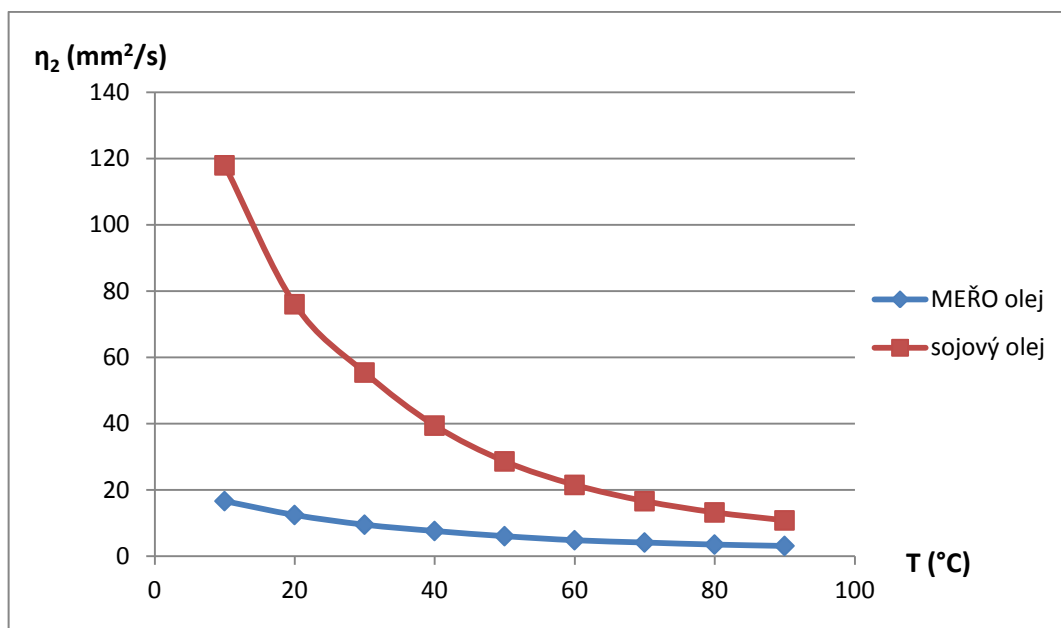
Vzorce a výpočty byly realizovány podobně jako výpočet pro MEŘO olej. Hustota byla vypočtena pomocí vztahu (18). Dynamická viskozita byla spočtena pomocí vztahu (24), s tím rozdílem, že hustota kuličky byla 8,144 g/cm³ a kinematická viskozita pomocí vztahu (25).



Obrázek 40) Hustota MEŘO a sojového oleje v závislosti na teplotě



Obrázek 41) Závislost dynamické viskozity na teplotě pro MEŘO a sojový olej



Obrázek 42) Závislost kinematické viskozity na teplotě pro MEŘO a sojový olej

ZÁVĚR

Hlavním tématem Diplomové práce byly rostlinné oleje a jejich použití v technice, především potom v elektrotechnickém průmyslu. V teoretické části se práce zabývá popisem a dělením rostlinných olejů. Zde je uvedeno první dělení na vysychavé a nevysychavé oleje. Pozornost byla věnována i pěstování a distribuci olejnin, ze kterých se samotný rostlinný olej zpracovává. Je potřeba se zmínit, že nejvíce spotřebovaný olej na celém světě je palmový olej, který zaujímá 25% veškeré spotřeby. V České republice je na prvním místě řepkový olej, který se z velké části používá na výrobu bio paliva zvané MEŘO. Methyl ester řepkového oleje nebo-li MEŘO je podrobněji popsán v kapitole 1.2 spolu s dalšími oleji, které se často vyskytují obchodních řetězcích. Jejich nejběžněji uváděné vlastnosti jako je hustota a teplota vznícení jsou uvedeny v tabulce 1). Dále je v práci uvedeno jaké mohou mít rostlinné oleje složky – estery, triglyceridy a mastné kyseliny, kde se rostlinné oleje používají a jaké mají využití v energetice. Nedílnou součástí práce je popis neelektrických měření, které budou použity v experimentální části.

Poslední část Diplomové práce je zaměřena na experiment, kde se měřila hustota a viskozita vzorků kapalin na dvou přístrojích. Hustota byla měřena pomocí vah Radwag a termostatu HUBERT. Měřilo se 8 vzorků kapalin. Čtyři kapaliny byly rostlinné oleje (olivový, sojový, rýžový a slunečnicový olej), dvě kapaliny byly nenasycené mastné kyseliny (kys. olejová, kys. linolová), a po jedné kapalině byl olej MEŘO (bio palivo) a naftový olej MOGUL trafo D. V Tabulce 3) jsou uvedeny vypočítané hustoty pro jednotlivé kapaliny. Z obrázků 26) až 27) lze vyčíst, že nejméně hustým olejem po celém rozsahu teplot byl naftový neinhibovaný olej MOGUL trafo D, který nezuhnul ani při teplotě pod -20°C . Naopak nejvíce hustým byl sojový olej, ten začal tuhnout už při -10°C . Zvýšená pozornost byla dbána na dvě složky nenasycených mastných kyselin kyselinu linolovou a kyselinu olejovou. Kyselina olejová, která začala tuhnout už při kladných teplotách (okolo $4,5^{\circ}\text{C}$) měla při pokojové teplotě 25°C hustotu $890,9 \text{ kg/m}^3$. Což předčí i olivový nebo sojový olej, který se používá jako přísada do transformátorového oleje Envirotemp. Kyselina linolová začala polymerovat při zhruba -10°C . Její hustota byl nízká po celém rozsahu teplot a až při hraniční teplotě -10°C začala prudce stoupat. Hustota při 25°C byla $875,1 \text{ kg/m}^3$ což je nejnižší hustota ze všech přírodních kapalin, které byly měřeny. Mezi důležité ukazatele chování kapaliny při teplotě je teplotní součinitel objemové roztažnosti nebo-li koeficient beta. Vypočítané výsledky koeficientu beta jsou uvedeny v tabulce 4), kde nejvyšší betu má sojový a olivový olej. Díky hodnotám beta mohly být funkce hustot na teplotě aproximovány. Díky této matematické úpravě je možné vidět jak by měli průběhy v ideálním případě vypadat. Tyto průběhy jsou znázorněny na obrázku 27) a lze z nich

vyčíst, že hustoty všech kapalin byli velmi blízko této ideální hodnotě, přiblíženy.

Dalším krokem v měření bylo zjištění dynamické viskozity jednotlivých kapalin. K měření byl použit vibrační viskozimetr typu SV-10, který se byl řízen pomocí počítačového softwaru. Hodnoty byly zpracovány do MS Excell. Jelikož viskozimetr zapisoval hodnoty po vteřině a rozsah teplot byl veliký, bylo potřeba vzít v úvahu jen ty hodnoty teplot, pro které byla vypočítána hustota. Naměřené a vypočítané hodnoty dynamické viskozity jsou uvedeny v tabulce 8). Z tabulky a z grafů, které jsou znázorněny na obrázcích 29) až 31) lze vyčíst, že nejvíce viskózní kapalina už při kladných teplotách byla kyselina olejová, která vykazovala téměř 5 Pa.s při teplotě 4,5°C. Druhou, hodně viskózní kapalinou, byl slunečnicový olej s viskozitou 1902,6 mPa.s, ale až při teplotě -15°C, takže jeho použití je daleko širší. Nejméně viskózní kapalinou se zdá být MEŘO olej, který při -20°C sice tuhnul, takže se jako palivo použít nedá, ale jeho viskozita byla na 66,4 mPa.s. Na obrázcích 32) až 39) jsou znázorněny dynamické viskozity s aproximační křivkou, která byla matematicky vypočtena. Naměřené hodnoty se s touto křivkou moc neshodují. V nízkých teplotách se matematická interpretace nedělala, protože funkce byla nepřehledná. Zejména potom u Mogulu, kyseliny linolové a MEŘO oleje.

V rámci semestrálního projektu byla měřena dynamická viskozita na Höpplerově viskozimetru. Byly měřeny dvě kapaliny – sojový olej a MEŘO olej. Naměřené a vypočítané hodnoty MEŘO oleje jsou uvedeny v tabule 11), kde byla dopočítána i kinematická viskozita, která je uváděna v produktových listech výrobce. Hodnoty pro sojový olej jsou uvedeny v tabulce 13). Hodnoty hustot byly použity stejné jako naměřené v kapitole 7.1. Ve srovnání viskozit s měřením na vibračním viskozimetru jsou hodnoty na Höpplerově viskozimetru méně přesné, protože může nastat zpoždění ve stisknutí stopek při protnutí rysky kuličkou anebo příliš rychlý pád kuličky. Když porovnáme hodnoty pro 30°C tak pro Höpplerův viskozimetr je hodnota viskozity sojového oleje 50,8 mPa.s a u vibračního viskozimetru je to 39,9 mPa.s. Pro MEŘO olej je to u Höpplerova viskozimetru 8,5 mPa.s a u vibračního viskozimetru 5,5 mPa.s. Je tedy vidět, že vibrační viskozimetr je při správné kalibraci přesnější.

Závěrem lze tedy říci, že z hlediska hustoty a viskozity byl na tom nejlíp olej MOGUL typu Trafo-D (měl přiměřenou viskozitu jak ve vysokých teplotách tak i v nízkých). Z hlediska toxicity je ovšem nejhorší, protože je ropným výrobkem.

Co se týče přírodních kapalin, tak jako nejodolnější kapalinou vůči mrazu se ukázal olej MEŘO. Dále to byl olivový, slunečnicový a sojový olej. Jako nejvhodnější kapalinou pro elektrotechniku byl volil slunečnicový a sojový olej, protože obsahují nejvíce nenasycených mastných kyselin, které zlepšují oxidační stabilitu. Z těchto dvou olejů má lepší odolnost proti teplotě sojový olej (bod vzplanutí 324°C).

LITERATURA

- [1] MAKÓWKA, T. *Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [2] TUREK, J. *Možnosti ověření vlastností izolačních kapalin*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2012. 55s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Prosr, Ph.D.
- [3] MÍKA, P. *Dynamická viskozita elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 40 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [4] SIEMENS. *Vegetable oil transformer for ultra-high voltages* [online]. 6.7.2013, [cit.2013-10-22]. Dostupné na:
<https://www.siemens.com/innovation/en/news/2013/e_inno_1321_2.htm>
- [5] CARGILL. *Dielectric Fluids – Envirottemp FR3 Fluid*. 2013. Dostupné na:
<<http://www.cargill.com/wcm/groups/public/@ccom/documents/document/na3076871.pdf>>
- [6] ABB. *BIOTEMP – the greener, safer, Longer-life transformer oil* [online]. 2013, [cit.2013-10-22]. Dostupné na:
<<http://www.abb.com/cawp/seitp202/b6e0c46c231194d0c12578f70047ce19.aspx>>
- [7] 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.
- [8] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava: Vysoká škola báňská, Fakulta strojní. 2010. 66 s.
- [9] SOUČEK, J. *Výzkum technologie MEŘO* [online]. 2013. Dostupné na:
<<http://www.soucek.pro/jiri/odborne-aktivita/podnikatelska-cinnost/vyzkum-technologie-mero/>>
- [10] SKOUMALOVÁ, L., VAJER, L. *Zpracování bionafty*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. 2001. 18 s.
- [11] NOUREDDINI, Hossein., TEOH, B.C., CLEMENTS, L. Davis. *Densities of Vegetables Oils and Fatty Acids* [online]. 12.1.1992, [cit. 2013-10-24]. Dostupné na:
<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=chemical_biomaterials>

- [12] NOUREDDINI, Hossein., TEOH, B.C., CLEMENTS, L. Davis. *Viscosities of Vegetables Oils and Fatty Acids* [online]. 12.1.1992, [cit. 2013-10-24]. Dostupné na: http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=chemeng_biomaterials
- [13] SHAS, Z.H., TAHIR, Q.A. *Dielectric properties of vegetace Oils* [online]. 19.5.2011, [cit. 2013-10-26]. Dostupné na: <http://www.banglajol.info/bd/index.php/JSR/article/view/7049/6306>
- [14] HAMMOND, Earl G., JOHNSON, Lawrence A.,SU, Caiping., WANG, Tong., WHITE, Pamela J. *Soybean oil* [online]. 2005, [cit. 2013-10-26]. Dostupné na: <http://pharosproject.net/uploads/files/cml/1360080729.pdf>
- [15] AGROFERT. *Obnovitelné zdroje a paliva v koncernu Agrofert* [online]. 2012-2013, [cit. 2013-11-10]. Dostupné na: <http://www.agrofert.cz/?1455/obnovitelné-zdroje-a-paliva-v-koncernu-agrofert>
- [16] PREOL. *Produktový list – Methylester řepkového oleje (MEŘO)*. 2.12.2013. Dostupné na: http://www.preol.cz/admin/files/pdf/PL-2013/01_PL_MERO.pdf
- [17] KOLCUNOVA , Iraida, VANČOVÁ, Viera. *Vplyv viskozity na elektroizolačné vlastnosti rastlinných olejov* [online]. Technická univerzita v Košiciách. 2009, [cit. 2013-11-15]. Dostupné na: <http://web.tuke.sk/fei-kee/jses/uploads/File/jses-07-2009.pdf>
- [18] TRNKA P., POLANSKÝ R. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír*. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. [cit. 2014-04-15]. Dostupné na: <https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [19] 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.
- [20] IRZ. Ministerstvo životního prostředí České republiky. *Naftalen*. [online]. Dostupné na: <http://www.irz.cz/node/70>
- [21] KAVALÍR Jiří. *Zhodnocení dopadu elektroizolačních kapalin na životní prostředí*. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. 2011. 57s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [22] PETROLEUM. *Cykloalkany*. 2007-2014. [online]. Dostupné na: <http://www.petroileum.cz/ropa/cykloalkany.aspx>

- [23] BEZPEČNOST POTRAVIN. *Minerální oleje*. [online]. Dostupné na: <http://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/92469.aspx>
- [24] TOULOVÁ, Jana. *Vlastnosti kapalin na bázi organických esterů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2012. 59s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [25] MIDEL. *Proteties of Midel Esters*. [online]. Dostupný na: <http://www.midel.com/applications/distribution>
- [26] MIDEL EN. *Greater Environmental Protection*. 2012. [online]. Dostupný na: http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_Greater_Environmental_Protection.pdf
- [27] MIDEL EN. *Natural Ester Dielectric Insulating Fluid Overview*. 2014. [online]. Dostupný na: http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf
- [28] MIDEL 7131. *Dielectric Insulating Fluid Overview*. 2010. [online]. Dostupný na: http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf
- [29] LACHNER. *Bezpečnostní list - kyselina olejová*. 2013. [online]. Dostupný na: http://www.lach-ner.com/files/67701-080_Kyselina_olejova_min_70_CZ.pdf
- [30] MOSS, G.P. *Nomenclature of Lipids*. Queen Mary University of London. Department of Chemistry. [online]. Dostupné na: <http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/lipid/>
- [31] Synthetic Oil Technology.[online]. Dostupné na: <http://www.synthetic-oil-technology.info/>
- [32] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČR. *Situační a výhledová zpráva – olejnin*. Praha. 2013. [online]. Dostupné na: http://eagri.cz/public/web/file/277547/SVZ_Olejnin_2013.pdf
- [33] ARNOLD, M. James. Patent. *Vegetable oil extended polyurethane systems*. 1983. [online]. Dostupný na: <http://www.google.com/patents/US4375521>
- [34] SINPOL. Polyoly pro formulaci pěn. 2014. [online]. Dostupný na: <http://www.sinpol.cz/index.php/cs/produkty/polyoly-pro-formulaci-pen>
- [35] PETROVIC Zoran, GUO Andrew, JAVNI Ivan. Patent. *Process for the preparation of vegetace oil-based polyols and electroninsulating casting compounds creater from vegetace oil – based polyols*. 1998. [online]. Dostupný na: <http://www.google.com/patents/US6107433>

- [36] YI-CHUN Li, YIH-SHING Duh, JING-MING Hsu, CHEN-SHAN Kao. *Thermal Instability of Organic Esters and Ethers with Deposited Lithium-ion Battery*. Taiwan: National United University. Department of safety Health and Environmental Engineering. Dostupný na: <file:///C:/Users/Petr/Dropbox/Diplomka/jine%20diplomky/72.pdf>
- [37] HOSIER I.L., GUUSHAA A., VAUGHAN A.S. SWINGLER S.G. *Selection of suitable vegetable oil for high voltage insulation applications*. Southampton: University of Southampton. 2009. Dostupný na: http://iopscience.iop.org/1742-6596/183/1/012014/pdf/1742-6596_183_1_012014.pdf
- [38] SMART M.C., RATNAKUMAR B.V., WHITEANAC L.D. *Performance of low temperature electrolytes in experimental and prototype Li-ion Cells*. Pasadena: California Institute of Technology. Dostupné na: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/41350/1/07-1816.pdf>
- [39] CHOWDHURY K., BANU L.A., KHAN S., LATIF A. *Studies on the Fatty Acid Composition of Edible Oil*. Bangladesh. 2007.
- [40] BAMBASOVÁ Lenka. *Změny obsahu mastných kyselin v rostlinných olejích během skladování*. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta chemická. 2008. 88s. Vedoucí diplomové práce Ing. Eva Vítová, Ph.D.
- [41] KERR M. Robert. *Biodiesel Production Techniques*. Oklahoma State University. Dostupné na: <http://www.fapc.biz/files/factsheets/fapc150.pdf>
- [42] STOCKTON P. David, BLAND R. John JR., MCCLANHAN Todd, WILSON Jim, HARRIS L. David, MCSHANE Patric. *Seed-oil-based coolants for transformers* 2009. [online]. Dostupný na: <http://www.spxtransformersolutions.com/assets/documents/IEEEmag09.pdf>
- [43] COOPER POWER SYSTEMS. *Oxidation stability of Envirotemp FR3 Fluid as measured by power factor valued oxidation*. 2005. [online]. Dostupný na: <http://www.spxtransformersolutions.com/assets/documents/38-CP0502PFVORReport.pdf>
- [44] KOVAČIKOVÁ Barbora. *Thermo-oxidative stability of mixtures of vegetable oils*. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta chemická. 2010. 64s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jana Zemanová, Ph.D.
- [45] MCSHANE Patric, COOPER POWER SYSTEMS. *Utilities Turning to Vegetable Oil-based Transformer Fluids*. 2006. [online]. Dostupný na: http://www.elc.com/articles/powergrid_international/print/volume-11/issue-4/departments/getting-equipped/utilities-turning-to-vegetable-oil-based-transformer-fluids.html

PŘÍLOHY

Rýžový olej									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdíl	suma
14,0126	1,4	9,33	0,933	932,7	7,27E-04	7,41E-04	932,9	0,1	4,9
14,0212	3	9,32	0,932	931,8	7,42E-04		931,8	0,0	
14,0384	5	9,31	0,930	930,1	7,19E-04		930,4	0,1	
14,0522	7	9,29	0,929	928,7	7,17E-04		929,0	0,1	
14,0735	10	9,27	0,927	926,6	7,05E-04		926,9	0,1	
14,1136	15	9,23	0,923	922,6	5,48E-04		923,5	0,8	
14,1361	20	9,21	0,920	920,1	0,00E+00		920,1	0,0	
14,1642	25	9,18	0,918	917,5	5,50E-04		916,7	0,8	
14,1936	30	9,15	0,915	914,6	5,97E-04		913,3	1,7	
14,2695	40	9,08	0,907	907,0	7,19E-04		906,6	0,2	
14,3346	50	9,01	0,901	900,5	7,23E-04		900,0	0,2	
14,4043	60	8,94	0,894	893,6	7,41E-04		893,6	0,0	
14,4674	70	8,88	0,887	887,3	7,39E-04		887,2	0,0	
14,5336	80	8,81	0,881	880,7	7,46E-04		880,9	0,0	
14,6026	90	8,74	0,874	873,8	7,57E-04		874,7	0,8	

Kyselina olejová									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ [g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdíl	suma
14,2826	4,5	9,06	0,906	906,0	8,13E-04	7,942E-04	905,7	0,1	2,0
14,2899	5	9,05	0,905	905,2	7,87E-04		905,3	0,0	
14,2989	6	9,04	0,904	904,3	7,73E-04		904,6	0,1	
14,3071	7	9,04	0,904	903,5	7,64E-04		903,9	0,1	
14,3294	10	9,01	0,901	901,3	7,48E-04		901,7	0,2	
14,3613	15	8,98	0,898	898,1	7,93E-04		898,1	0,0	
14,4005	20	8,94	0,894	894,6	0,00E+00		894,6	0,0	
14,4338	25	8,91	0,891	890,9	8,25E-04		891,0	0,0	
14,4615	30	8,88	0,888	888,1	7,25E-04		887,5	0,4	
14,531	40	8,81	0,881	881,2	7,59E-04		880,6	0,4	
14,5986	50	8,75	0,874	874,4	7,67E-04		873,7	0,5	
14,6732	60	8,67	0,867	867,0	7,95E-04		867,0	0,0	
14,7436	70	8,60	0,860	860,0	8,05E-04		860,4	0,2	
14,8054	80	8,54	0,854	853,8	7,96E-04		853,9	0,0	
14,8723	90	8,47	0,847	847,1	8,00E-04		847,4	0,1	

Trans.olej MOGUL trafo D									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdíl	suma
14,4341	-20	8,9095	0,891	890,8	7,67E-04	7,522E-04	890,3	0,3	9,3
14,4676	-15	8,876	0,888	887,5	7,73E-04		886,9	0,4	
14,5085	-10	8,8351	0,883	883,4	7,51E-04		883,4	0,0	
14,542	-5	8,8016	0,880	880,1	7,53E-04		880,1	0,0	
14,5863	0	8,7573	0,876	875,7	6,94E-04		876,7	1,1	
14,6147	5	8,7289	0,873	872,8	7,11E-04		873,4	0,3	
14,664	10	8,6796	0,868	867,9	5,06E-04		870,1	4,6	
14,6651	15	8,6785	0,868	867,8	9,87E-04		866,8	1,0	
14,7032	20	8,6404	0,864	863,5	0,00E+00		863,5	0,0	
14,7335	25	8,6101	0,861	861,0	5,91E-04		860,3	0,5	
14,7664	30	8,5772	0,858	857,7	6,80E-04		857,1	0,4	
14,8303	40	8,5133	0,851	851,3	7,17E-04		850,7	0,3	
14,8964	50	8,4472	0,845	844,7	7,42E-04		844,5	0,1	
14,9628	60	8,3808	0,838	838,1	7,59E-04		838,3	0,0	
15,0257	70	8,3179	0,832	831,8	7,63E-04		832,2	0,2	
15,0812	80	8,2624	0,826	826,3	7,51E-04		826,2	0,0	
15,1524	90	8,1912	0,819	819,1	7,74E-04		820,3	1,4	

Olivový olej									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdíl	suma
13,918	-10	9,4256	0,942	942,4	9,78E-04	8,000E-04	937,2	26,5	60,7
14,0297	-5	9,3139	0,931	931,2	7,09E-04		933,4	4,7	
14,0683	0	9,2753	0,927	927,4	6,82E-04		929,6	5,0	
14,1035	5	9,2401	0,924	923,8	6,59E-04		925,8	3,9	
14,1305	10	9,2131	0,921	921,2	6,98E-04		922,1	0,9	
14,1638	15	9,1798	0,918	917,8	6,77E-04		918,4	0,3	
14,2027	20	9,1409	0,914	914,7	0,00E+00		914,7	0,0	
14,2232	25	9,1204	0,912	911,9	6,19E-04		911,1	0,7	
14,269	30	9,0746	0,907	907,3	8,15E-04		907,5	0,0	
14,338	40	9,0056	0,900	900,4	7,93E-04		900,3	0,0	
14,3992	50	8,9444	0,894	894,3	7,60E-04		893,3	1,1	
14,4634	60	8,8802	0,888	887,9	7,54E-04		886,4	2,5	
14,5318	70	8,8118	0,881	881,1	7,63E-04		879,5	2,4	
14,6033	80	8,7403	0,874	874,0	7,77E-04		872,8	1,3	
14,7146	90	8,629	0,863	862,8	8,59E-04		866,2	11,3	

MEŘO									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdí l	sum a
14,1721	-20	9,1715	0,917	917,0	8,50E-04	8,866E-04	918,4	1,9	8,9
14,2051	-15	9,1385	0,914	913,7	8,72E-04		914,2	0,2	
14,2347	-10	9,1089	0,911	910,8	9,13E-04		910,0	0,5	
14,2795	-5	9,0641	0,906	906,3	9,03E-04		905,9	0,1	
14,3222	0	9,0214	0,902	902,0	8,98E-04		901,8	0,0	
14,3606	5	8,983	0,898	898,2	9,18E-04		897,8	0,2	
14,4042	10	8,9394	0,894	893,8	8,97E-04		893,7	0,0	
14,4406	15	8,903	0,890	890,2	9,85E-04		889,8	0,2	
14,4693	20	8,8743	0,887	885,8	0,00E+00		885,8	0,0	
14,5056	25	8,838	0,884	883,7	4,76E-04		881,9	3,3	
14,575	30	8,7686	0,877	876,8	1,03E-03		878,0	1,6	
14,646	40	8,6976	0,870	869,7	9,27E-04		870,4	0,5	
14,7163	50	8,6273	0,863	862,7	8,94E-04		862,9	0,0	
14,7851	60	8,5585	0,856	855,8	8,77E-04		855,5	0,1	
14,8656	70	8,478	0,848	847,8	8,97E-04		848,2	0,2	
14,921	80	8,4226	0,842	842,2	8,62E-04		841,1	1,4	
14,9993	90	8,3443	0,834	834,4	8,80E-04		834,1	0,1	

kyselina linolová									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.c m-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdí l	suma
14,3415	-9,5	9,0021	0,900	900,1	8,85E-04	9,856E-04	902,8	7,5	101,0
14,3722	-5	8,9714	0,897	897,0	9,11E-04		898,7	2,9	
14,4126	0	8,931	0,893	893,0	9,19E-04		894,2	1,5	
14,4474	5	8,8962	0,890	889,5	9,69E-04		889,7	0,0	
14,4848	10	8,8588	0,886	885,8	1,04E-03		885,3	0,2	
14,5198	15	8,8238	0,882	882,3	1,29E-03		880,9	1,9	
14,5702	20	8,7734	0,877	876,6	0,00E+00		876,6	0,0	
14,5915	25	8,7521	0,875	875,1	3,32E-04		872,3	8,1	
14,622	30	8,7216	0,872	872,1	5,16E-04		868,0	16,5	
14,7476	40	8,596	0,860	859,6	9,91E-04		859,6	0,0	
14,8273	50	8,5163	0,852	851,6	9,78E-04		851,4	0,0	
14,897	60	8,4466	0,845	844,6	9,46E-04		843,3	1,7	
15,0152	70	8,3284	0,833	832,8	1,05E-03		835,4	6,6	
15,0243	80	8,3193	0,832	831,9	8,95E-04		827,6	18,4	
15,2035	90	8,1401	0,814	814,0	1,10E-03		820,0	35,6	

Slunečnicový									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdí l	sum a
13,8815	-15	9,4621	0,946	946,0	7,54E-04	7,529E-04	946,0	0,0	1,6
13,9217	-10	9,4219	0,942	942,0	7,42E-04		942,3	0,1	
13,9553	-5	9,3883	0,939	938,6	7,50E-04		938,7	0,0	
13,9968	0	9,3468	0,935	934,5	7,20E-04		935,1	0,4	
14,0256	5	9,318	0,932	931,6	7,58E-04		931,6	0,0	
14,059	10	9,2846	0,928	928,3	7,82E-04		928,0	0,1	
14,0934	15	9,2502	0,925	924,9	8,26E-04		924,5	0,1	
14,1248	20	9,2188	0,922	921,0	0,00E+00		921,0	0,0	
14,1583	25	9,1853	0,918	918,4	5,79E-04		917,6	0,6	
14,2038	30	9,1398	0,914	913,8	7,88E-04		914,2	0,1	
14,2663	40	9,0773	0,908	907,6	7,40E-04		907,4	0,1	
14,3352	50	9,0084	0,901	900,7	7,52E-04		900,7	0,0	
14,4017	60	8,9419	0,894	894,1	7,54E-04		894,1	0,0	
14,4672	70	8,8764	0,888	887,5	7,55E-04		887,6	0,0	
14,5339	80	8,8097	0,881	880,9	7,60E-04		881,2	0,1	
14,5755	90	8,7681	0,877	876,7	7,22E-04		874,9	3,3	

Soyový olej									
m[g]	θ[°C]	m[g]	ρ[g.cm-3]	ρ[kg.m-3]	koef. β	koef. β	ρ[kg.m-3] aprox	rozdí l	sum a
13,8392	-10	9,5044	0,950	950,2	8,73E-04	8,034E-04	948,2	4,1	12,7
13,8673	-9	9,4763	0,947	947,4	8,04E-04		947,4	0,0	
13,8895	-7	9,4541	0,945	945,2	7,78E-04		945,9	0,4	
13,9019	-5	9,4417	0,944	944,0	7,89E-04		944,3	0,1	
13,9456	0	9,398	0,940	939,6	7,59E-04		940,5	0,7	
13,9755	5	9,3681	0,937	936,6	8,03E-04		936,6	0,0	
14,0075	10	9,3361	0,933	933,4	8,66E-04		932,8	0,3	
14,0406	15	9,303	0,930	930,1	1,03E-03		929,1	1,1	
14,1059	20	9,2377	0,924	925,3	0,00E+00		925,3	0,0	
14,1433	25	9,2003	0,920	919,9	1,19E-03		921,6	3,1	
14,173	30	9,1706	0,917	916,9	9,20E-04		918,0	1,1	
14,2405	40	9,1031	0,910	910,2	8,34E-04		910,7	0,3	
14,3052	50	9,0384	0,904	903,7	7,98E-04		903,6	0,0	
14,366	60	8,9776	0,898	897,6	7,72E-04		896,5	1,2	
14,4434	70	8,9002	0,890	889,9	7,96E-04		889,6	0,1	
14,51	80	8,8336	0,883	883,3	7,94E-04		882,8	0,2	
14,607	90	8,7366	0,874	873,6	8,46E-04		876,1	6,2	

MOGUL TRAFD D
ISO VG 10**NEINHIBOVANÝ**
TRANSFORMÁTOROVÝ OLEJ**Popis:**

MOGUL TRAFD D je neinhibovaný transformátorový olej s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi. Je vyroben z jakostního hydrokrakovaného hluboce rafinovaného základového oleje, který se získává z parafinické ropy špičkovou technologií. Olej vyhovuje tuzemským i zahraničním požadavkům, kladeným na užité vlastnosti neinhibovaných izolačních olejů. Vyznačuje se velmi dobrou oxidační stabilitou. Je mísi-
telný s neinhibovanými izolačními oleji všech významných dodavatelů.

Užití:

Je určen jako izolační a chladicí kapalina do transformátorů všech napěťových hladin, včetně strojů nejvyšších napětí a výkonů. Lze ho použít

i do spínačů, stykačů, kondenzátorů a jiných elektrických zařízení.

Klasifikace, specifikace:

IEC 60296

VDE 0370

DIN 57 370 část 1 **třída A****Charakteristické vlastnosti:**

- nízká hustota
- vysoké povrchové napětí
- velmi dobré elektroizolační vlastnosti
- vynikající oxidační stabilita
- dlouhá životnost

Charakteristické parametry

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Hustota při 15 °C	kg/m ³	865	ČSN EN ISO 12185
Kinematická viskozita při 40 °C	mm ² /s	9,5	ČSN EN ISO 3104
Bod vzplanutí	°C	175	ČSN EN ISO 2592
Bod tekutosti	°C	-45	ČSN ISO 3016
Číslo kyselosti	mg KOH/g	0,005	ČSN ISO 6618
Povrchové napětí	mN/m	60	ASTM D 2285
Průrazné napětí po vysušení	KV	75	ČSN EN 60156
Ztrátový činitel tg δ při 90 °C		0,001	ČSN EN 60156

Hodnoty v tabulce jsou hodnotami typickými pro současnou produkci. Závazné parametry a další informace o výrobku jsou obsaženy v TN 23-117 PARAMO, a.s. a v bezpečnostním listu.
Výrobek je klasifikován jako **nebezpečný** podle Nařízení (ES) č. 1272/2008, v platném znění. Další informace jsou uvedeny v aktuálním BL na www.mogul.cz

Poznámka: Olej MOGUL TRAFD D je běžně dodáván s obsahem vody do 40 ppm. Na přání je možné zajistit i dodávky oleje s obsahem vody do 10 ppm.

PARAMO, a.s., Přerovská 560, 530 06 Pardubice
tel.: 466 810 111, fax: 466 810 328
[http: www.paramo.cz](http://www.paramo.cz), e-mail: paramo@paramo.cz