

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2016

MARTIN DŘEVOJAN



**Fyzikální vlastnosti kapalných paliv a biopaliv pro
vznětové motory**
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Vojtěch Kumbár, Ph.D.

Vypracoval:
Bc. Martin Dřevojan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Fyzikální vlastnosti kapalných paliv a biopaliv pro vznětové motory vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vojtěchu Kumbárovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce „ Fyzikální vlastnosti kapalných paliv a biopaliv pro vznětové motory “ je zaměřena na popis fyzikálních vlastností paliv pro pístové spalovací motory a metylesteru řepkového oleje. Obsahuje seznámení s problematikou dynamické viskozity a hustoty u spalovacích motorů a ucelený přehled způsobů měření těchto veličin.

Experimentální část diplomové práce je věnována experimentálnímu měření teplotní závislosti dynamické viskozity a hustoty vybraných vzorků motorové nafty s různou koncentrací metylesteru řepkového oleje. Výsledky měření byly zpracovány do tabulek doplněnými grafy.

Klíčová slova

Motorová nafta, metylester řepkového oleje, hustota, dynamická viskozita

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis „ Physical properties of liquid fuels and bio diesel for combustion engines „ is aimed at describing the physical properties of fuels and rapeseed oil methyl ester. It includes familiarization with the issue of dynamic viscosity and density of internal combustion engines and a comprehensive overview of methods of measuring these quantities .

Experimental work is devoted to experimental measurement of the temperature dependence of the dynamic viscosity and density of selected diesel samples with different concentrations of rapeseed oil methyl ester. The measurement results were processed into tables containing diagrams .

Key words

Diesel fuel, Fatty acid methyl ester, density, dynamic viscosity

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	CÍL PRÁCE.....	9
2.1	Ropa	10
2.2	Chemické složení ropy.....	10
2.2.1	Elementární složení ropy	12
2.3	Motorové nafty.....	12
2.3.1	Vlastnosti motorových naft.....	13
2.3.2	Motorová nafta pro mírné klima	13
2.3.3	Motorová nafta pro arktické klima	14
2.4	Výroba motorové nafty	16
2.5	Metylestery rostlinných olejů.....	17
2.6	Výroba směsné motorové nafty v České republice.....	17
2.7	Fyzikální vlastnosti	19
2.7.1	Základní pojmy	19
2.7.2	Stavové veličiny.....	19
2.8	Hustota	20
2.8.1	Závislost hustoty na tlaku a teplotě	20
2.8.2	Měření hustoty	21
2.8.3	Vliv hustoty paliva na provoz pístových spalovacích motorů.....	24
2.9	Viskozita tekutin	24
2.9.1	Kinematická viskozita	25
2.10	Druhy proudění skutečných tekutin	26
2.10.1	Závislost viskozity kapalin na tlaku a teplotě	30
2.10.2	Měření viskozity	30
2.10.3	Vliv viskozity paliv na provoz pístových spalovacích motorů.....	34
3	MATERIÁL A METODIKA	36

3.1	Měření dynamické viskozity	36
3.1.1	Postup měření dynamické viskozity	37
3.2	Měření hustoty	38
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	40
4.1	Teplotní závislost hustoty	40
4.2	Teplotní závislost dynamické viskozity	41
5	ZÁVĚR	47
	LITERATURA.....	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK.....	52

1 ÚVOD

Znalost fyzikálních vlastností paliv a biopaliv pro vznětové motory při měnících se teplotních podmínkách a různých koncentracích biosložky v motorové naftě je základním předpokladem pro zajištění tvorby optimální směsi paliv se vzduchem.

Tato práce se věnuje měření dynamické viskozity, ta má zásadní vliv na vstřikování paliva a následnou tvorbu směsi se vzduchem ve spalovacím prostoru motoru. Vysoká viskozita paliva má za následek jeho zhoršenou atomizaci, čímž může docházet k nedokonalému spalování a tvorbě sazí. Rostoucí podíl povinně přimíchávané biosložky do motorové nafty ovlivňuje její fyzikální vlastnosti. Je proto nutné vědět, jakým způsobem ovlivňuje jejich přítomnost v palivech dynamickou viskozitu s měnícími se teplotními podmínkami.

Dále je v této práci také sledována hustota, která má významný vliv na provoz pístových spalovacích motorů. Dávka paliva vstřikovaného do spalovacího prostoru motoru je odměřena objemově. Změna hustoty paliva s měnící se teplotou nebo podílem biosložky má za následek nesprávné dávkování paliva.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je experimentálně stanovit jak ovlivní obsah biosložky a změna teploty fyzikální vlastnosti konvenční paliva pro vznětové motory. S ohledem na plány Evropské unie navýšit do roku 2020 stávající podíl paliv z obnovitelných zdrojů do dopravy je důležité zjistit, jak se směsi konvenčních paliv s biosložkou budou chovat.

Teoretická část práce se zabývá chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi ropy jakožto hlavní surovinou pro výrobu paliv pro vznětové motory. Výrobou metylesteru řepkového oleje, jeho chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi, který je dominantní surovinou biosložky přidávané do konvenčních paliv.

V praktické části je na vybraných vzorcích motorové nafty, metylesteru řepkového oleje a jejich směsích v různých poměrech provedeno měření teplotní závislosti hustoty a dynamické viskozity.

Výsledná data jsou následně zpracována pro větší přehlednost do několika grafů.

2.1 Ropa

V současnosti jsou nejpoužívanějšími palivy využívanými pro pohon automobilů benzin a nafta vyráběná z ropy. Ropa je označována jako fosilní palivo. Pojem fosilní pochází z latiny a jeho význam lze do češtiny přeložit jako předvěký, pocházející ze starých usazenin. Jedná se o nerostnou surovinu vznikající anaerobní přeměnou odumřelých částí rostlin a těl živočichů ve svrchních vrstvách zemské kůry – nejčastěji v oblastech kontinentálních šelfů. Je základní surovinou petrochemického průmyslu. Ropa je světle žlutá až černá kapalná směs uhlovodíků fosilního původu. Ropa je lidem známá již od středověku, s její destilací v Evropě se začalo v 17. století. (VLK, 2006)

2.2 Chemické složení ropy

Ropa je olejovitá kapalina s hustotou většinou mezi 800 - 990 kg/m³, která je složena z plyných, kapalných a tuhých látek. Převážnou část ropy tvoří uhlovodíky, dále bývají přítomny siričné, kyslíkaté a dusíkaté sloučeniny a v malém množství organické a anorganické soli obsahující kovy.

Z plynů jsou v ropě obsaženy především metan, etan, propan a butany, oxid uhličitý a sulfan, někdy může být přítomen i dusík nebo vzácné plyny.

Kapalné látky tvoří převážnou část ropy. Mezi kapalné látky patří různé uhlovodíky, jako n-alkany (parafíny), izoalkany (izoparafíny), cykloalkany (cyklany, nafteny) a aromáty. Cykloalkany a aromáty mohou mít jeden nebo více kruhů a na těchto kruzích mohou být jeden nebo více alkylsubstituentů s různým rozvětvením. Dále mohou být přítomny i různé sloučeniny obsahující heteroatomy (síra, dusík, kyslík), které bývají vázány jak v heterocyklech, tak v alkylových substituentech. Molekuly skládající se ze dvou a více typů struktur se označují také jako **hybridní molekuly**.

Mezi tuhé látky v ropě patří tuhé uhlovodíky (parafíny a cereziny) a také asfaltické látky. Tyto tuhé látky jsou rozpuštěny, případně peptizovány, v kapalných sloučeninách. Výše uvedené typy sloučenin se liší svou strukturou, velikostí molekuly, počtem kruhů a počtem alkylsubstituentů. Jejich vzájemný poměr se mění podle stáří ropy a podle jejího naleziště. Obecně platí, že se stoupajícím bodem varu ropné frakce se zvětšuje složitost směsi, stoupá počet přítomných izomerů a zvětšuje se koncentrace heteroslučenin.

První izomery alkanů jsou možné u C₄ uhlovodíků (n-butan a izobutan) a se stoupajícím počtem uhlíkových atomů v molekule roste rychle i počet teoreticky možných

izomerů (např. C₅ alkany mají 3 izomery, C₈ alkany 18 izomerů, C₁₂ alkany 355 izomerů, C₁₅ alkany 4 347 izomerů, C₁₈ alkany 60 523 izomerů atd.).

U lehčích frakcí (benzin) je možno provést podrobný rozbor až na jednotlivé izomery. Se stoupajícím bodem varu frakce roste počet přítomných izomerů, počet sloučenin majících cykloalkanické anebo aromatické kruhy, zvětšuje se obsah heteroatomů, a tím i množství heterosloučenin v těchto frakcích. Koncentrace jednotlivých sloučenin pak obvykle klesá s rostoucí teplotou varu frakce.

U těžších frakcí není možné stanovit jejich přesné složení a ani by to nemělo velký význam, protože by se pracně a s velkými náklady zjistilo, že sloučenina XY je ve frakci zastoupena např. v koncentraci 0,0001 % hm. U výševroucích frakcí se proto obvykle provádí tzv. skupinová analýza a strukturně-typová analýza.

Při **strukturně-typové analýze** se stanovuje zastoupení uhlíkových a vodíkových atomů v jednotlivých typech struktur (např. uhlík vázaný v aromatických kruzích, cykloalkanických kruzích, alkylových řetězcích apod.). Ze stanoveného zastoupení jednotlivých uhlíkových a vodíkových atomů a molekulové hmotnosti se pak určuje počet aromatických a cykloalkanických kruhů a počet a délka alkylových substituentů v hypotetické průměrné molekule analyzovaného vzorku.

Starší metody strukturně typové analýzy jsou založeny na stanovení elementárního složení (obsah C, H a případně i S, N a O) a různých fyzikálních charakteristik analyzovaných vzorků (index lomu, kinematická viskozita, relativní průměrná molekulová hmotnost apod.). Přesnost stanovení těchto metod závisí hlavně na tom, do jaké míry odpovídá složení analyzovaného vzorku složení vzorků, které byly použity pro stanovení rovnic a konstant, které vyjadřují vztah mezi strukturou frakcí a jejich fyzikálními vlastnostmi.

Novější metody strukturně typové analýzy jsou založeny na stanovení elementárního složení (obsah C, H a případně i S, N a O), stanovení relativního zastoupení jednotlivých typů uhlíkových a vodíkových atomů pomocí ¹H a ¹³C NMR (nukleární magnetická rezonance) a stanovení relativní průměrné molekulové hmotnosti analyzovaných frakcí. Obsah heteroatomů v některých funkčních skupinách se často stanovuje infračervenou (IR) spektrometrií.

Skupinová analýza stanovuje obsah strukturně podobných sloučenin v ropných frakcích, např. obsah nasycených sloučenin, monoaromátů, diaromátů apod. Skupinová analýza se obvykle provádí vhodnou kombinací jednotlivých technik kapalínové chromatografie a u ropných zbytků také pomocí srážení, případně extrakce vhodnými orga-

níckými rozpouštědly. Uplatňuje se především kapalinová adsorpční chromatografie, při které se látky dělí na základě své polaritě, gelová chromatografie (GPC - gel permeation chromatography, která se nazývá také SEC - size exclusion chromatography), při které se látky dělí podle velikosti molekul, a chromatografie na makroporézních měničích iontů, která se používá k oddělování sloučenin majících acidní (kyselý) nebo naopak bazický (zásaditý) charakter. Jednotlivé frakce získané při skupinové analýze se někdy ještě charakterizují strukturně typovou analýzou. Při analýze ropných frakcí se uplatňují jak nízkotlaké metody kapalinové chromatografie, tak vysokoúčinné metody kapalinové chromatografie (HPLC - high performance liquid chromatography)(BLAŽEK, 2006).

2.2.1 Elementární složení ropy

Ropa obvykle obsahuje 84 - 87 % hmotnostních (hm). uhlíku, 11 - 14 % hm. vodíku, 0,1- 4 % hm. síry, 0,01 - 1,0 % hm. dusíku a 0,05 - 1,0 % hm. kyslíku. Kromě těchto prvků obsahuje ropa také organicky vázané kovy, zejména vanad a nikl (Tab. 1). Většinou platí, že čím je ropa těžší, čili čím má větší hustotu, tím větší má obsah heteroatomů (BLAŽEK, 2006).

Tab. 1 Hustota a obsah heteroatomů při 15 °C vybraných druhů ropy

Druh ropy	Země původu	Hustota [kg/m ³]	Síra [% hm.]	Dusík [% hm.]	Vanad [mg/kg]	Nikl [mg/kg]
Saharan blend	Alžírsko	798	0,12	0,03	0,1	0,1
Brega	Libye	825	0,20	0,04	1,0	4,0
Oseberg blend	Norsko	847	0,25	0,13	1,6	0,8
REB	Rusko	866	1,55	0,18	38	12
Arabian med.	Saud. Arabie	878	2,5	0,13	30	13
Souedieh	Sýrie	909	4,1	0,32	97	32
Maya	Mexiko	920	3,4	0,37	275	52

Obsah uhlíku a vodíku se zmenšuje a naopak obsah heteroatomů zvětšuje s rostoucí teplotou ropné frakce. Všechny heteroatomy se koncentrují v ropných zbytcích.

2.3 Motorové nafty

Motorová nafta se používá pro pohon vznětových motorů (Dieselův motor). Na stojanech čerpacích stanic se pro srozumitelnost zákazníků ze zahraničí označuje, velmi často jako Diesel. Motorová nafta je směsí kapalných uhlovodíků, která vře v teplotním

rozmezí cca 150 – 370 °C. Obsahuje většinou přísady na zlepšení nízkoteplotních vlastností a případně i jiné přísady za účelem zlepšení užitečných vlastností nafty.

2.3.1 Vlastnosti motorových naft

Motorové nafty prodávané v Evropské unii a tudíž i v České republice musí splňovat jakostní požadavky podle evropské normy EN 590, která definuje několik druhů nafty lišících se hlavně svou hodnotou filtrovatelnosti. Každá země si v závislosti na svých klimatických podmínkách vybírá jeden druh nafty pro letní, jeden pro zimní podmínky a případně ještě další druh pro přechodné období. Vybrané parametry požadované normou EN 590 jsou uvedeny v tab. 2. V ČR se motorové nafty expedují a dodávají v závislosti na ročním období ve třech třídách označovaných B, D a F, které se liší hodnotami filtrovatelnosti. (BLAŽEK, 2004)

Při velmi nízkých teplotách se v zimě dodává i tzv. arktická nafta (třída 2) s filtrovatelností až do teploty -32 °C, toho je docíleno zvýšeným obsahem petrolejové frakce a jsou na tento druh nafty kladeny poněkud odlišné požadavky. Vzhledem k většímu obsahu petroleje může mít nafta pro arktické podmínky menší hustotu, menší cetanové číslo, nižší konec destilace apod.

2.3.2 Motorová nafta pro mírné klima

Cetanové číslo má mezní hodnotu minimálně 51, cetanový index minimálně 46. Požadavek na hustotu zůstává nadále stejně úzký 820–845 kg/m³, dříve to bylo maximálně 860. Nemění se požadavek na polycyklické aromatické uhlovodíky maximálně 11 % hm.

Bod vzplanutí PM musí být nadále nad 55 °C, karbonizační zbytek zkoušený z 10% destilačního zbytku maximálně 0,30 % hm, popel maximálně 0,01 % hm, voda maximálně 200 mg/kg, celkový obsah nečistot maximálně 24 mg/kg. Požadavek na stupeň koroze na mědi se rovněž nemění a zůstává ve třídě 1, požadavek na oxidační stabilitu je stále maximálně 25 g/m³, požadavek na mazivost je rovněž beze změny, korigovaný průměr oděrové plochy maximálně 460 μm. Nemění se ani požadavek na objem minimálně 95 %, který musí predestilovat při 360 °C. V této normě se poprvé uvádí, že požadavky na objemy predestilující při 250 a 350 °C jsou zařazeny v souladu se společným celním tarifem EU.

Nafta může obsahovat maximálně 7 % obj. esterů mastných kyselin, jejichž kvalita musí splňovat požadavky ČSN EN 14214.

2.3.3 Motorová nafta pro arktické klima

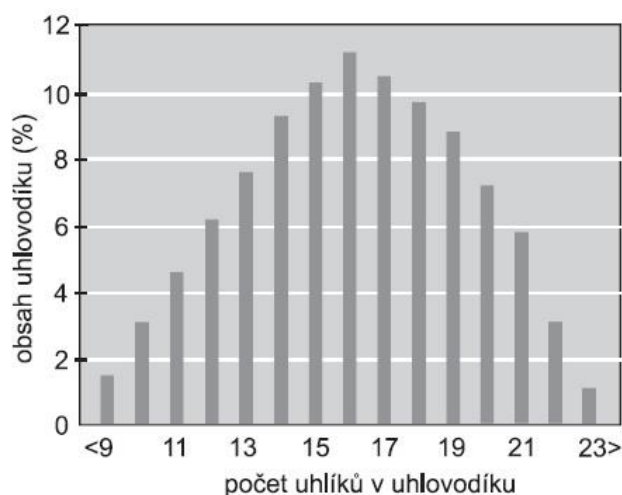
Norma stanoví v této skupině požadavky na pět tříd arktických motorových naft označovaných 0–4, s filtrovatelností od maximálně -20 do maximálně -44 °C a s TVP (teplota vylučování parafinů) od maximálně -10 do maximálně -34 °C. Aby bylo možné při výrobě tuto úroveň zimních vlastností zajistit, musí být použito velké množství petrolejové frakce, proto norma udává pro arktické nafty dolní mez hustoty minimálně 800 kg/m³. Mohou mít menší viskozitu a nejvyšší dvě třídy i nižší cetanové číslo. Není omezen podíl destilující do 250 °C, jsou stanoveny pouze dvě podmínky na frakční složení, aby předestilovalo při 180 °C maximálně 10 % a při 340 °C minimálně 95 % Poznámka: v ČR některé firmy nabízejí v zimním období u svých čerpacích stanic, zejména v oblastech, které mají drsnější podnebí, arktickou naftu třídy 2 s filtrovatelností pod -32 °C a s TVP pod -22 °C.

Tab. 2 Požadavky na kvalitu motorových naft podle ČSN EN 590

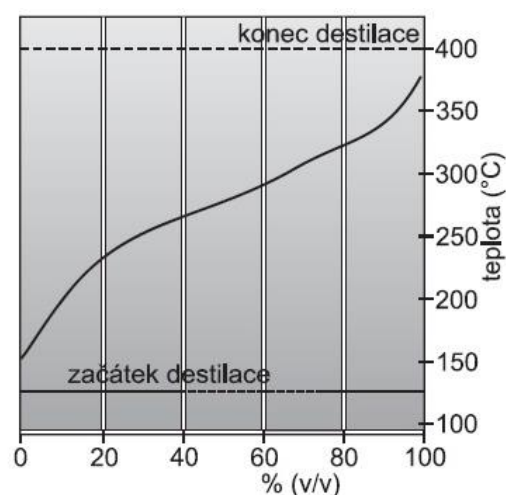
Ukazatel	Jednotka	Motorová nafta			
		třída B	třída D	třída F	třída 2
Hustota při 15°C	kg/m ³	820 – 845	820 – 845	820 – 845	800 – 840
Cetanové číslo		min. 51,0	min. 51,0	min. 51,0	min. 48,0
Obsah síry	mg/kg	max. 10,0	max. 10,0	max. 10,0	max. 10,0
Viskozita při 40°C	mm ² /s	2,0 – 4,5	2,0 – 4,5	2,0 – 4,5	1,5 – 4,0
Bod vzplanutí	°C	nad 55	nad 55	nad 55	
Destilační zkouška					
při 180°C předest.	% obj.				max. 10
při 250°C předest.	% obj.	<65	<65	<65	
při 340°C předest.	% obj.				min. 95
při 350°C předest.	% obj.	min. 85	min. 85	min. 85	
95% obj. předest.	°C	max. 360	max. 360	max. 360	
Filtrovatelnost CFPP	°C	max. 0	max. -10	max. -20	max. -32
Období dle klimatických podmínek		mírné klima	mírné klima	mírné klima	arktické klima
		15.04.-30.09.	01.10.-15.11.	16.11.-28.02.	
			01.03.-14.04.		
Obsah metylesterů mastných kyselin (FAME)	% obj.	max. 7,0	max. 7,0	max. 7,0	

2.4 Výroba motorové nafty

Do destilačního rozmezí motorové nafty spadají převážně uhlovodíky s 10–22 uhlíky.



Obr. 1a Typická distribuce uhlovodíků v motorové naftě podle počtu uhlíků



Obr.1b Typická destilační křivka motorové nafty

Při výrobě nafta vzniká mísením hlavně dvou složek, a to z petroleje s rozmezím destilace přibližně 160–260 °C a z plynového oleje destilujícího od 250 do 360 °C. Obě frakce z atmosférické destilace obsahují poměrně velké množství sirných sloučenin (plynový olej podstatně více), takže musí být podrobeny hydrogenačnímu odsíření, při kterém dojde i k odstranění stopových množství kyslíku a dusíku. Podmínky hydrogeneace však musí být mírné, aby současně nedocházelo ke štěpení molekul a také, aby ve větším množství nevznikaly n-alkany, tj. parafinické uhlovodíky s vysokým bodem tuhnutí.

Hydrogenační odsířování je technologie používaná celá desetiletí, ale nové problémy přináší požadavky na výrobu tzv. bezsírné nafty, tj. nafty s obsahem síry pod 10 ppm. Tak hluboké odsíření nejsou dosavadní hydrogenační jednotky schopny dosáhnout a je nutná jejich hlubší rekonstrukce nebo výstavba nových, dokonalejších. Některé procesy dokonce pracují ve dvou stupních, protože nové katalyzátory pro úplné odsíření vyžadují, aby vstupní surovina obsahovala jen malé množství síry, respektive jejich sloučenin.

Petrolej má velmi nízký bod tuhnutí, až pod - 50 °C, plynový olej kolem 0 °C nebo i vyšší. Letní druh motorové nafty, s bodem tuhnutí kolem 0 °C, je složen převážně z plynového oleje, zimní druh musí obsahovat velké množství petrolejové frakce, která

proto bývá v zimním období deficitní. Naftu nelze z ekonomických důvodů odparafinovat jako mazací oleje procesem používajícím chlazení. Je však možné použít proces hydroizomerace a tím částečně převést n-alkany s vysokým bodem tuhnutí na izoalkany, tekuté do nižších teplot (MATĚJOVSKÝ, 2005).

2.5 Metylestery rostlinných olejů

Metylestery rostlinných olejů se vyrábějí reesterifikací různých rostlinných olejů metanolem nebo etanolem. V našich zeměpisných podmínkách se vyrábí hlavně metylester řepkového oleje (MEŘO). Vlastnosti metylesterů vybraných rostlinných olejů jsou uvedeny v tab. 3, pro srovnání jsou uvedeny také vlastnosti ropné motorové nafty (BLAŽEK, 2006)

Tab. 3 Průměrné vlastnosti metylesterů různých rostlinných olejů a motorové nafty

Vlastnost	Jednotka	Metylestery rostlinných olejů			Motorová nafta
		Palmový	Řepkový	Slunečnicový	
Hustota při 16°C	kg/m ³	874	882	885	835
Viskozita při 40°C	mm ² /s	4,4	4,2	4,0	2,3
Výhřevnost	MJ/l	32,4	32,8	32,8	35,5
Cetanové číslo		63 - 70	51 - 60	61	>51
CFPP ^a	°C	-	-8	-4	0 až -20
Jodové číslo ^b		52	114	129	-
Obsah uhlíku	% hm.	76,3	77,2	77,2	86,5
Obsah vodíku	% hm.	12,4	12,0	11,9	13,4
Obsah kyslíku	% hm.	11,3	10,8	10,9	0
Obsah síry	mg	<1	<1	<1	<50

^a filtrovatelnost za chladu, ^b charakterizuje množství dvojných vazeb

2.6 Výroba směsné motorové nafty v České republice

Aplikace MEŘO jako paliva pro vznětové motory prošla v České republice poněkud jiným vývojem než například v sousedním Německu, Rakousku a Švýcarsku. Tento vývoj vedl k dlouhodobému výhradnímu používání tzv. směsného paliva, obsahujícího přibližně 30 % metylesterů řepkového oleje ve směsi s uhlovodíky, původně s uhlovodíky s dobrou biologickou rozložitostí, později pouze s motorovou naftou. V uvedených státech se MEŘO po celou dobu používalo jako palivo pro vznětové motory bez přídavku jiných složek, kromě přísad, kdežto Český způsob aplikace byl inspirován francouzským modelem, jehož podstatou je používání směsí nafty s různým obsahem metylesterů.

Původně byla v České republice státní podpora směsného paliva vázána na snadnou biologickou rozložitelnost, která musela proběhnout minimálně z 90 % za 21 dnů v podmínkách standardní laboratorní zkoušky. Protože pro splnění této podmínky bylo nutné, aby směs obsahovala alespoň část uhlovodíků snadno rozložitelných, jejichž výroba je energeticky náročná, byla podmínka biologické rozložitelnosti zrušena. Norma vydaná v roce 2003 definovala vlastnosti pouze dvou směsí MEŘO a nafty, a to SMN 5 a SMN 30

Myšlenka využití plodin pěstovaných na poli pro výrobu motorového paliva je téměř tak stará jako spalovací motory a koncem osmdesátých let se využívání obnovitelných zdrojů energie začalo opět intenzivně prosazovat ve střední Evropě. Úsilí bylo zaměřeno na náhradu motorové nafty metylestery kyselin různých rostlinných olejů. Pro Českou republiku byla jako nejvhodnější vytipována řepka olejná, jejíž zušlechtěné druhy dávají olej s přijatelným chemickým složením pro palivářské účely, zejména se sníženým obsahem nenasycených mastných kyselin s více dvojnými vazbami, které jsou oxidačně a chemicky velmi nestabilní. Samotný řepkový olej nemá vhodné vlastnosti paliva pro dnešní vznětové motory, ale metylestery jeho kyselin mají řadu vlastností velmi podobných motorové naftě.

Zavedení výroby a používání motorových paliv „vypěstovaných na poli“ vždy vyžaduje řešit celou řadu otázek a problémů, jednak technických, jednak ekonomických, které bývají složitější a v některých případech mohou znemožnit realizaci. Stejně jako líh, jsou MEŘO a EŘO výrobně dražší než palivo z ropy, dokonce mohou být dražší než zdaněná motorová nafta. Proto realizace myšlenky využívání biopaliv vyžaduje na prvním místě řešení problému podpory těchto výrob nebo produktů. Tu musí poskytovat stát a musí být stanovena zákonem. Právě z cenových důvodů nebyla v ČR realizována původní myšlenka používat samotné metylestery. V době, kdy mělo být toto palivo uvedeno na trh, došlo ke zdražení řepkového semene, což znamenalo zvýšení jeho ceny bez daně nad cenu zdaněné nafty.

Situace v České republice se změnila vstupem do EU, zavedení povinného přidávání malého množství (do 7 %) metylesterů do motorové nafty na základě přijetí ČSN EN 590:2004, která přidavek metylesterů do 7 % obj. připouští (MATEJOVSKÝ, 2005).

2.7 Fyzikální vlastnosti tekutin

2.7.1 Základní pojmy

2.7.1.1 Tekutina

Tekutina je látka, která se účinkem vnějších sil nevratně deformuje. Nemá vlastní tvar. Základním rozdílem mezi tekutinou a tuhým tělesem je pohyblivost molekul kapalin a plynů. Tuhé těleso se pohybuje jako tuhý celek hmotných bodů, nepřihlížíme-li k nepatrným deformacím. Tekutina je látka, která se na rozdíl od tuhých těles vždy nevratně deformuje. Nemá vlastní tvar a za působení nepatrných tečných sil se její částice snadno uvedou do pohybu. Tekutiny tečou v proudu omezeném pevnými stěnami nebo tvoří rozhraní (hladiny).

Tekutiny dělíme na:

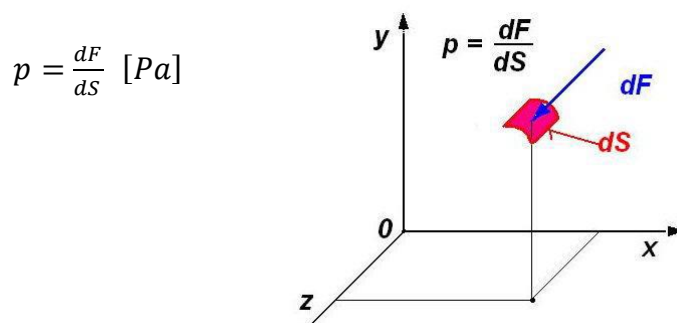
1. nestlačitelné tj. takové, které za působení rostoucího tlaku mění jen málo svůj objem, do této skupiny tekutin patří kapaliny, jež jsou prakticky nestlačitelné. Malé objemy kapalin tvoří kapky. Zaujímají tvar nádoby, vyplňují její spodní část (s ohledem na výsledné zrychlení, resp. vektor intenzity silového pole) a vytvářejí volnou hladinu.
2. stlačitelné a tedy i rozpínavé, které vyplňují vždy celý objem nádoby. Podle toho, zda jejich stav je blízký či vzdálený bodu zkapalnění, je dělíme na páry a plyny. Společný název užívaný pro oba dva druhy je vzdušniny.

2.7.2 Stavové veličiny

Stav tekutiny nacházející se v rovnováze může být určen tlakem, hustotou a teplotou.

a) Měrný tlak p

Je roven poměru elementární tlakové síly dF působící kolmo na elementární plošku dS . (viz. Obr. 2)



Obr. 2 Stanovení lokální hodnoty měrného tlaku

b) Hustota ρ (měrná hmotnost) je rovna poměru hmotnosti elementární částice tekutiny dm k jejímu objemu dV , obklopujícímu bod, v němž hustotu určujeme.

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Převrácenou hodnotou hustoty je měrný objem V .

$$V = \frac{1}{\rho} = \frac{dV}{dm} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Hustota kapalin se mění v závislosti na tlaku a teplotě jen nepatrně, proto je často při výpočtech považována za konstantní ($\rho = \text{konst.}$)

Hustota plynů je funkcí stavových veličin tj. tlaku p a teploty T [K]. Pro její výpočet se bude používat jednoduchá stavová rovnice ideálního plynu

$$pV = \frac{p}{\rho} = r \cdot T$$

kde r [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] je měrná plynová konstanta, jejíž velikost závisí na druhu plynu.

c) Teplota T [$^{\circ}C$, K]

2.8 Hustota

Hustota látky ρ [$kg \cdot m^{-3}$] je definována jako poměr její hmotnosti m [kg] a objemu V [m^3], který látka zaujímá.

$$\rho = \frac{m}{V} ; [kg \cdot m^{-3}]$$

2.8.1 Závislost hustoty na tlaku a teplotě

Hustota kapaliny se vlivem změny tlaku nebo teploty mění. S rostoucím tlakem se hustota kapalin zvyšuje. Při rostoucí teplotě naopak klesá vlivem zvětšující se vzdálenosti molekul.

Nárůst hustoty kapaliny v závislosti na tlaku popisuje rovnice odvozená roku 1962 D. Dowsonem, G. R. Higginsonem a A. V. Whitakerem. Platnost této rovnice je omezena tlakem 0,4 GPa.

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0,6 \cdot 10^{-9} p}{1 + 1,7 \cdot 10^{-9} p} \right),$$

kde ρ_0 je hustota za atmosférického tlaku a p je tlak.

V roce 1987 B. O. Jacobson a A. V. Whitaker odvodili vztah pro výpočet změny hustoty v závislosti na tlaku platný do tlaku 2,2 GPa:

$$p = 3B_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{2}{3}} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{-1}{3}}\right] \exp \left\{ \eta' \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{-1}{3}}\right] \right\},$$

kde B_0 a η' jsou bezrozměrné konstanty kapaliny.

2.8.2 Měření hustoty

Podle požadavků na rychlost a přesnost stanovení hustoty se pro měření využívají různé přístroje. Jsou založeny na principu vztlaku těles v kapalině (Ponorné hustoměry, Mohr-Westfálové váhy) nebo na přesném vážení definovaného objemu kapaliny (pyknometry). Digitální hustoměry umožňují měření hustoty v oscilující trubici. Určení hustoty vyžaduje temperaci vzorku kapaliny. (STANĚK, 2014)

2.8.2.1 Ponorné hustoměry

Ponorné hustoměry jsou skleněné zatavené trubice s rozšířením v baničku, která je vyplněna závažím o definované hmotnosti (Obr. 3). Zúžená část je opatřena stupnicí. Měření se provádí při určené teplotě. K tomu účelu je ve dně hustoměru zabudován rtuťový teploměr.

Po ponoření do kapaliny je hustoměr nadnášen vztlakovou silou, která je rovná hmotnosti objemu vytlačené kapaliny v souladu s Archimédovým zákonem. Podle hloubky ponoření se na stupnici odečte hustota. Čím je hustota kapaliny nižší, tím hlouběji se hustoměr ponoří.

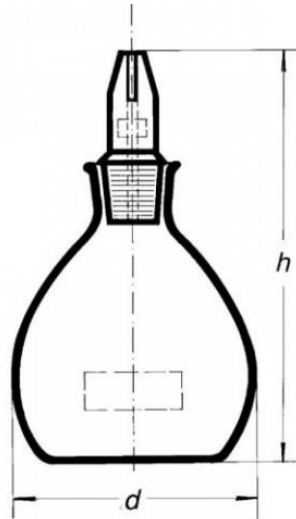
Ponorné hustoměry jsou používány pro méně přesné stanovení hustoty. Pro zpřesnění měření jsou hustoměry konstruovány v sadách, kde každý jednotlivý přístroj má stupnici pouze pro úzké rozmezí hustoty. Sady hustoměrů mohou mít specifické použití, např. v lihovarnictví, kde jsou tradičně označovány jako lihoměry a slouží pro stanovení hustoty ethanolu (líhu), podobně v cukrovarech, kde se nazývají cukroměry, atd.



Obr. 3 Ponorný hustoměr

2.8.2.2 Pyknometry

Pyknometr je skleněná nádoba přesně definovaného objemu V (Obr. 4). Nejprve se zváží bez měřeného vzorku (M_1), poté se naplní vzorkem a opakuje se vážení (M_2). Výpočtem rozdílu hmotností M_1 a M_2 stanovíme hmotnost vzorku m . Hustotu se poté stanoví výpočtem: $\rho = \frac{m}{V}$; [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]



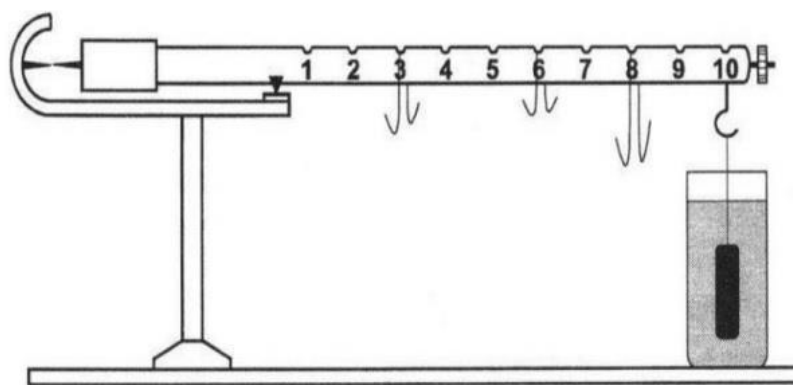
Obr. 4 Schématické zobrazení pyknometru

2.8.2.3 Mohrovy váhy

Mohrovy váhy vycházejí z Archimedova zákona. Jedná se vlastně o nerovnoramenné váhy, na jejichž delším rameni je zavěšeno ponorné tělísko. Delší rameno je rozděleno na 10 stejných dílů, na kterých jsou háčky pro zavěšení vyvažovacích závaží (Obr. 5). Váhy se zavěšeným ponorným tělískem se na vzduchu nejprve vyváží pomocí stavěcího šroubu a vyrovnají se pomocí stavěcí matice. Poté se ponorné tělísko zcela ponoří do měřené kapaliny a provede se vyvážení pomocí 3 závaží o rozdílných hmotnostech.

Pro hustotu neznámé kapaliny platí:

$$\rho = (n_1 + n_2 + n_3) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad \text{kde} \quad \begin{cases} n_1 = 100 \times \text{poloha nejtěžšího závaží} \\ n_2 = 10 \times \text{poloha středního závaží} \\ n_3 = 1 \times \text{poloha nejlehčího závaží} \end{cases}$$



Obr. 5 Mohrová váha

2.8.2.4 Digitální hustoměry

Digitální hustoměry obsahují dutou skleněnou trubici vibrující při jisté frekvenci (Obr. 6). Tato frekvence se změní, když se trubice naplní vzorkem. Čím vyšší je hmotnost vzorku, tím nižší je frekvence. Změřená frekvence se pak přepočte na hustotu látky. Kalibrace hustoměru se provádí na vzduchu nebo pomocí destilované vody. Zabudovaný Peltiérův termostat řídí teplotu velmi přesně, bez použití vodní lázně. Digitální hustoměry se provádí v ručním či laboratorním provedení.

K výhodám digitálních hustoměru patří vysoká přesnost, rychlost měření a možnost měření vzorku malého objemu.



Obr. 6 Přenosný digitální hustoměr Densito 30 PX

2.8.3 Vliv hustoty paliva na provoz pístových spalovacích motorů

Hustota je jedním ze základních veličin charakterizující ropu a ropné produkty. Z hustoty lze usuzovat frakční chemické složení ropných produktů. Hustota je normovaným parametrem většiny výrobků z ropy, jako jsou paliva, maziva apod. Hustota benzínu při 15 °C je normou ČSN EN 228 stanovena v limitním rozmezí 720 až 775 kg.m⁻³, hustota motorové nafty při 15 °C v limitním rozmezí 820 až 845 kg.m⁻³ (<http://cesmina.vscht.cz/>)

Hustota paliva má vliv na správnou činnost motoru, musí ležet v určitém optimálním intervalu, neboť množství paliva pro tvorbu směsi dodávané do spalovacího prostoru motoru je měřeno objemově. U vznětových motorů při vyšší hustotě motorové nafty je do válce přivedena větší hmota paliva a dochází tak k nedokonalému spalování vlivem nedostatku vzduchu a zvyšuje se kouřivost. Naopak příliš lehké frakční složení nafty s nízkou teplotou zápalnosti vede k tvrdému chodu motoru. (Vlk, 2006)

2.9 Viskozita tekutin

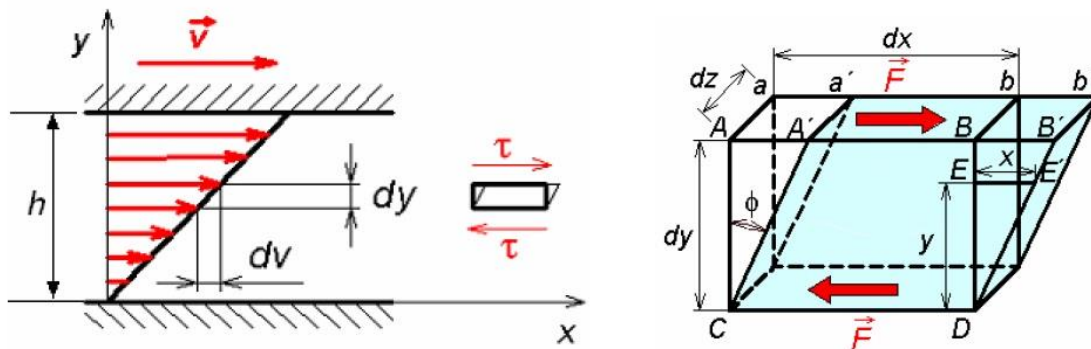
Viskozita tekutin se projevuje za pohybu skutečných kapalin. Pohybují-li se sousední vrstvy kapaliny různými rychlostmi, vzniká na jejich rozhraní smykové napětí, které brání pohybu. Pomalejší vrstva je zrychlována a naopak zase rychlejší zbrzdována. Tečné (smykové) napětí je vyvoláno vnitřním třením neboli viskozitou tekutiny. Je úměrné změně rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu podle Newtonova vztahu:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{v}{h} \quad [Pa]$$

kde η je dynamická viskozita (vazkost) a $\frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu viz obr. 7. Tuto formulaci uvedl v roce 1687 anglický fyzik Isaac Newton pro laminární proudění. Smykové napětí způsobuje úhlovou deformaci elementárního objemu tekutiny.

U plynů, jejichž tepelný pohyb molekul převládá nad silami mezimolekulárními, vzrůstá zvýšením teploty rychlost tepelného pohybu molekul a tím vzroste i viskozita plynu. Tento poznatek je ve shodě se skutečností.

U kapalin je tomu obráceně. U nich jsou ještě dosti výrazné mezimolekulární síly proti tepelnému pohybu molekul. Zvýšením teploty dochází k intenzivnější výměně hybností částic v pohybujících se vrstvách kapalin a tečné napětí se zmenšuje. U kapalin klesá vazkost s rostoucí teplotou. (DRÁBKOVÁ, 2007)



Obr. 7 Smykové napětí při laminárním proudění

Jednotka součinitele dynamické viskozity η se definuje ze vztahu pro smykové napětí

$$[\eta] = \frac{[\tau][y]}{[v]} = \frac{N \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s} = Pa \cdot s$$

Rozměr obsahuje jednotku síly, proto byla tato vazkost označena jako dynamická, neboť v dynamice se vyšetřují příčiny pohybu, tj. síly. Fyzikální soustava jednotek (stále používaná v příručkách a tabulkách) zavádí pro jednotku dynamické viskozity označení 1 P (Poise), což je $1P = 1g \text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pas}$ (DRÁBKOVÁ, 2007).

2.9.1 Kinematická viskozita

Kinematická viskozita je dána podílem dynamické viskozity a hustoty podle vztahu:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = \frac{kg}{m \cdot s} = \frac{m^3}{kg} = m^2 \cdot s^{-1}$$

Rozměr kinematické viskozity neobsahuje jednotky hmotnosti ani síly. V praxi je dosud stále důležitá jednotka kinematické viskozity v soustavě fyzikální – Stokes, pro niž platí $1S = \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Vazkost kapalin se měří viskozimetry, z nichž nejběžnější jsou kapilární, výtokové, průtokové, rotační, tělískové a jiné. Z měření vazkosti kapalin Englerovým viskozimetrem vyplývá další jednotka viskozity Englerův stupeň, která se definuje jako poměr doby výtoku τ zkoumané kapaliny o objemu 200 cm^3 při dané teplotě k době výtoku 200 cm^3 destilované vody o teplotě $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy

$$\nu_E = \frac{\tau}{\tau_{H_2O}} \quad [^\circ E]$$

Viskozitu vyjádřenou v Englerových stupních lze převádět na kinematickou viskozitu v SI jednotkách pomocí empirického vztahu

$$\nu = \left(7,31\nu_E - \frac{6,31}{\nu_E} \right) \cdot 10^{-6} \quad [m^2s^{-1}]$$

Dynamická a kinematická viskozita závisí na druhu tekutiny. Jejich hodnoty jsou pro většinu tekutin tabelovány. Viskozita každé tekutiny závisí na teplotě a tlaku, tedy na stavových veličinách. Tyto závislosti jsou dány poloempirickými rovnicemi, ty jsou uváděny v odborné literatuře. Mimo závislosti pro vodu a vzduch, jsou technicky důležité závislosti dynamické viskozity na teplotě pro minerální oleje. Tyto závislosti lze dobře aproximovat exponenciální funkcí ve tvaru

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-k \cdot T} \quad \text{nebo} \quad \eta = \eta'_0 \cdot e^{\frac{A}{t+B}}$$

kde η_0, η'_0, k, A, B - jsou konstanty, které je nutno pro jednotlivé druhy olejů určit experimentálně a statisticky např. metodou nejmenších čtverců.

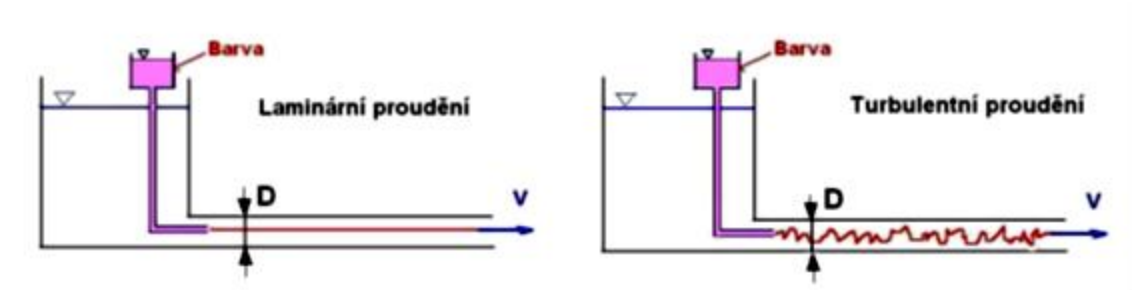
U plynů tepelný pohyb molekul převládá nad silami mezimolekulárními, se zvýšením teploty vzrůstá rychlost tepelného pohybu molekul a tím vzroste i viskozita plynu. Tento poznatek je ve shodě se skutečností.

U kapalin je tomu obráceně. U nich jsou ještě dosti výrazné mezimolekulární síly proti tepelnému pohybu molekul. Zvýšením teploty dochází k intenzivnější výměně hybností částic v pohybujících se vrstvách kapalin a tečné napětí se zmenšuje. U kapalin klesá viskozita s rostoucí teplotou (DRÁBKOVÁ, 2007).

2.10 Druhy proudění skutečných tekutin

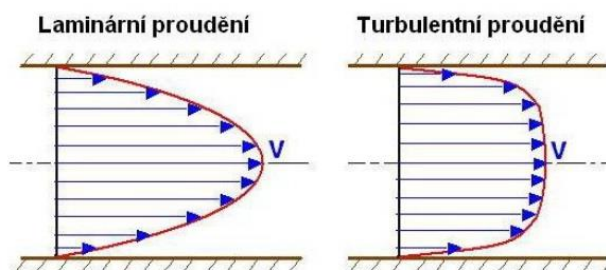
Skutečná tekutina může proudit buď laminárně, nebo turbulentně. Existenci obou proudění názorně ukazuje Reynoldsův pokus – obr. 8. Do proudící tekutiny v kruhovém potrubí se přivádí tenkou trubičkou obarvená tekutina. Při malých rychlostech proudu

zůstane barevné vlákno neporušeno, z čehož vyplývá, že pohyb se děje ve vrstvách a částice tekutiny se nepromíchávají. Zvětší-li se rychlost nad její kritickou hodnotu, dochází k intenzivnímu míšení částic následkem jejich podružných (turbulentních) pohybů ve všech směrech.

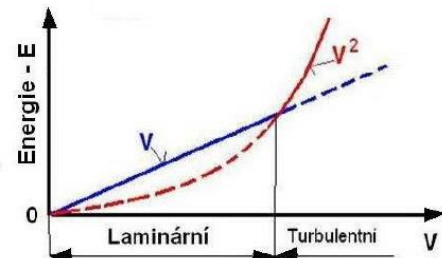


Obr. 8 Reynoldsův pokus

Částice tekutiny neustále přecházejí z jedné vrstvy do druhé, přičemž dochází k výměně kinetické energie a jejich rychlosti po průřezu se značně vyrovnávají. Takové proudění je turbulentní. Protože při přemístění částic dochází též ke změně hybnosti, což se projevuje brzdícím účinkem, bude výsledný odpor proti pohybu větší, než odpovídá smykovému napětí od vazkosti při laminárním proudění (DRÁBKOVÁ, 2007).



Obr. 9 Rychlostní profil v potrubí



Obr. 10 Závislost $p_z = f(v)$

Oba druhy proudění se liší jak rychlostním profilem, tak i velikostí hydraulických ztrát. U laminárního proudění v potrubí je rychlostní profil rotační paraboloid. U turbulentního proudění se rychlosti částic vyrovnávají intenzivním přemísťováním spojeným s výměnou kinetické energie. Rychlostní profil turbulentního proudu v potrubí se proto více podobá obdélníku, a to tím více, čím větší je turbulence, tj. čím větší je Re číslo - obr. 9.

U laminárního proudění je hydraulický odpor proti pohybu lineárně závislý na rychlosti, u turbulentního proudění je závislý na druhé mocnině rychlosti – obr. 10.

Poměry, při niž dochází ke kvalitativním změnám rychlostního profilu a závislosti odporu, tj. při přechodu laminárního proudění v turbulentní, jsou pro určité potrubí a tekutiny dány kritickou rychlostí. Z pokusů i teorie podobnosti vyplývá, že přechod laminárního proudění v turbulentní je určeno Reynoldsovým kritickým číslem. Reynoldsovo číslo je definováno vztahem

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

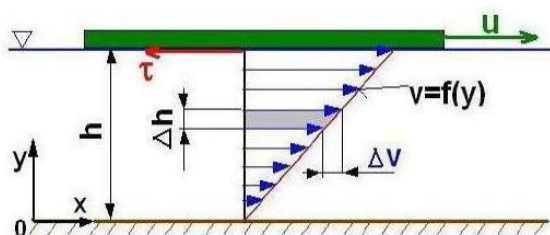
kde v je střední rychlost tekutiny, d je charakteristický rozměr (např. při proudění v potrubí je to vnitřní průměr) a ν je kinematická viskozita proudící tekutiny.

Při proudění skutečné tekutiny mezi dvěma rovinnými deskami (obr. 11) z nichž jedna se pohybuje rychlostí u a druhá stojí, mají částice lpící na povrchu desek jejich rychlosti. To znamená, že na pohybující se desce má částice kapaliny rychlost u , zatímco na stojící je rychlost částice nulová. Pro ostatní částice kapaliny, které proudí v mezeře mezi deskami, jsou rychlosti rozloženy lineárně. Pohybující se částice strhává sousední částice do pohybu v důsledku vazkého tření. Rychlost částice ve vzdálenosti y od stojící desky bude:

$$v = u \frac{y}{h}$$

Smykové napětí od viskozity je podle Isaaca Newtona vyjádřeno matematickým vztahem:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{u}{h}$$



Obr. 11 Rozložení rychlosti při laminárním proudění mezi dvěma deskami

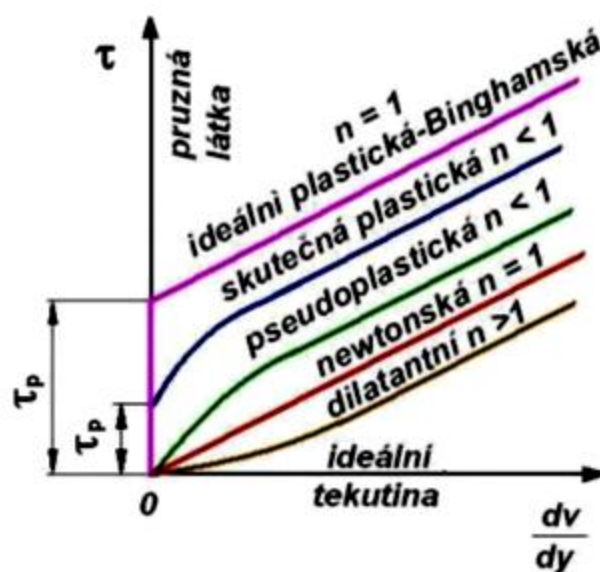
Třecí síla F_t , kterou působí viskózní kapalina na desku o ploše S_t , a kterou je nutno při pohybu desky překonat, je určena vztahem $F_t = S_t \tau$. V obecném případě je rychlost tekutiny určena funkcí $v = v(y)$, a smykové napětí v libovolné vzdálenosti od stěny Newtonovým výrazem. Grafické znázornění průběhu rychlosti $v = v(y)$ je rychlostním profilem - obr.

12. Účinek vazké kapaliny na obtékané plochy je závislý na smykovém napětí od vazkosti tekutiny

$$\tau_s = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right)_{y=0}$$

Derivace $\left(\frac{dv}{dy} \right)_{y=0}$ je směrnici tečny k rychlostnímu profilu na obtékaném povrchu. Při tomto proudění se předpokládá, že nekonečně tenké vrstvy kapaliny klouzají jedna po druhé, takže se pohybují ve vrstvách – laminárně (lamina-vrstva).

Závislost smykového napětí od vazkosti τ v závislosti na gradientu rychlosti v kolmém směru na pohyb je vyjádřena v grafu $\tau = f\left(\frac{dv}{dy}\right)$ – obr. 9. Sklon udává dynamickou vazkost kapaliny. Všechny kapaliny, které vyhovují Newtonovu zákonu viskozity, se nazývají newtonské. V technické praxi se dosti často vyskytují látky, jejichž závislost smykového napětí na gradientu rychlosti se nedá vyjádřit Newtonovým vztahem. Říká se jim nenewtonské kapaliny či anomální a jejich reologické vlastnosti jsou vyjádřeny křivkami v diagramu a popsány matematickými modely (DRÁBKOVÁ, 2007).



Obr. 12 Reologické vlastnosti kapalin

Pro ideálně plastickou látku je znám Binghamův vztah:

$$\tau = \tau_p + \mu_B \frac{dv}{dy}$$

Pro průběhy nelineární se používají mocninové vztahy:

$$\tau = \tau_p + K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n ; \quad \tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

kde K je součinitel konzistence a n je index toku.

2.10.1 Závislost viskozity kapalin na tlaku a teplotě

V roce 1893 popsal C. Barus izotermální závislost viskozity na tlaku pomocí exponenciální rovnice:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha' p},$$

kde η_0 je viskozita kapaliny za atmosférického tlaku, α' je tlakově-viskózní koeficient, p je provozní tlak a e je eulerova konstanta. Platnost této aproximační rovnice je značně omezená maximálním tlakem.

Přesnější aproximaci závislosti viskozity na tlaku a teplotě odvodil a popsal roku 1966 Roelands.

$$\eta = \eta_0 \exp\{[\ln \eta_0 + 9,67] \cdot [(1 + 5,1 \cdot 10^{-9} \cdot p)^Z - 1]\},$$

kde Z je bezrozměrný tlakový index:

Platnost Roelandsova vztahu je omezena přibližně tlakem 0,5 GPa. V dnešní době existuje několik vztahů podstatně složitějších než výše uvedené. Ty poskytují přesnější korelaci mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Jako příklad může sloužit rovnice, kterou v roce 1991 vytvořili Sorab a Vanarsdale:

$$\ln \frac{\eta}{\eta_0} = A_1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) + A_2 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) + A_3 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + A_4 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)^2 + A_5 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right),$$

kde η_0 je viskozita při tlaku $p_0 = 1$ atm a teplotě T_0 (pokožová teplota). Koeficienty A_1, \dots, A_5 charakterizují danou kapalinu (SORAB, 1991).

2.10.2 Měření viskozity

Měření viskozity souvisí v řadě aplikací s analýzou chemického složení. Mezi typické aplikace kde se využívá měření viskozity k řízení výrobního procesu, patří výroba lepi-

del, barev a laků, olejů, farmaceutických a kosmetických přípravků a produktů potravinářského průmyslu. Konzistence řady látek, u nichž lze využít vztahu mezi požadovanou vlastností a viskozitou, může být řízena právě prostřednictvím viskozity. K měření viskozity se používají viskozimetry různých fyzikálních principů a konstrukcí:

1. viskozimetry průtokové (kapilární)
2. viskozimetry rotační a vibrační
3. viskozimetry tělískové

2.10.2.1 Průtokové viskozimetry

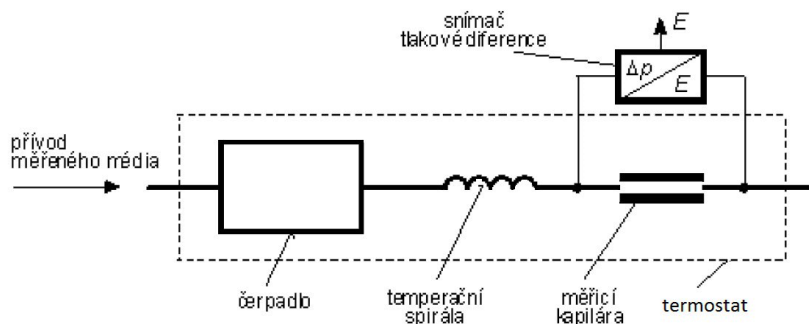
Průtokové viskozimetry jsou založeny na měření tlakové ztráty v kapiláře při laminárním proudění kapaliny kapilárou. Kapilární viskozimetr pracuje na principu Hagen-Poiseuillova zákona, podle kterého platí (Troyer, 2002):

$$\eta = \frac{\pi r^4 g}{8 l Q_v} \Delta p$$

kde je η dynamická viskozita, r poloměr kapiláry, l délka kapiláry, Q_v objemový průtok a Δp tlakový rozdíl (Moore, 1981). Za předpokladu konstantního průtoku a pro kapiláru daných rozměrů pak platí

$$\eta = k \Delta p$$

Schéma uspořádání kapilárního viskozimetru je uvedeno na obrázku 13. Základní podmínkou správné funkce přístroje je konstantní průtok kapilárou, který je zajišťován čerpadlem a konstantní teplota, udržovaná termostatem. Vhodný snímač tlakové diferece poskytuje na výstupu unifikovaný elektrický signál.



Obr. 13 Schéma kapilárního viskozimetru

Pro měření viskozity kapalin za extrémně vysokého tlaku byl vyvinut kapilární viskozimetr nazývaný „capillary time-of-flight“ viskozimetr, který je schopen měřit viskozitu kapalin při tlaku vyšším než 3500 bar. (THOMPSON a kol., 2006)

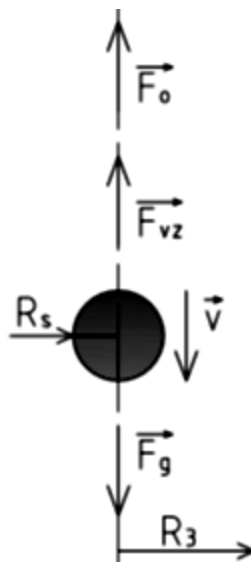
2.10.2.2 Pádové (tělískové) viskozimetry

Pádové viskozimetry určují viskozitu kapaliny měřením rychlosti tělíska propadávajícího měřenou kapalinou. Rychlost tělíska je určena rozdílem hustoty tělíska a kapaliny a mezerou mezi tělískem a stěnami nádoby.

Padající koule

Na kouli volně se pohybující kapalinou ve vertikálním směru působí následující 3 síly (viz obr. 14)

- gravitační \vec{F}_g
- odporová \vec{F}_o
- vztlaková \vec{F}_{vz}



Obr. 14 Padající koule tělískového viskozimetru

V průběhu pádu je velikost sil F_g a F_{vz} konstantní. Síla F_o se zvětšuje do chvíle, než jsou síly působící na tělíska v rovnováze (než kulička dosáhne konstantní rychlosti).

Velikost odporové síly vychází ze Stokesova zákona pro laminární obtékání těles ve tvaru:

$$F_o = 6\pi\eta R_s v,$$

kde η je viskozita kapaliny. Z rovnice silové rovnováhy je možné přímo vypočítat viskozitu kapaliny (za předpokladu známé rychlosti tělíska). Uvedený způsob výpočtu je relevantní pouze při dodržení následujících podmínek:

- Rychlost pádu tělíska je konstantní.
- Setrvačnost kapaliny je zanedbatelná (Reynoldsovo číslo menší než 0,1).
- Kapalina je newtonovská.
- Vliv stěn nádoby na rychlost kuličky je zanedbatelný ($R_s / R_3 < 0,001$, kde R_3 je vnitřní průměr nádoby).
- Kulička se pohybuje pouze ve vertikálním směru.

Roku 1991 B. O. Jackson detailně popsal síly působící na kuličku padající kapalinou. Rychlost kuličky padající v uzavřené nádobě je funkcí excentricity pádu. Kulička v průběhu pádu volně rotuje a její trajektorie je náhodná. V roce 2007 S. Bair označil kuličkový pádový viskozimetr jako nepříliš přesné měřicí zařízení pro stanovení viskozity.

A. Y. Malkin (2006) uvádí korekce pro efekt setrvačnosti, přítomnost stěn a pro nenevtonovské chování kapaliny. Korekce podstatně zpřesňují přímý výpočet viskozity. Teoreticky vypočtené a experimentálně získané výsledky se i přesto liší až o desítky procent. Z tohoto důvodu se kuličkový pádový viskozimetr kalibruje kapalinou se známou viskozitou. Viskozita se následně určuje pomocí rovnice:

$$\eta = C(\rho_1 - \rho_2)t$$

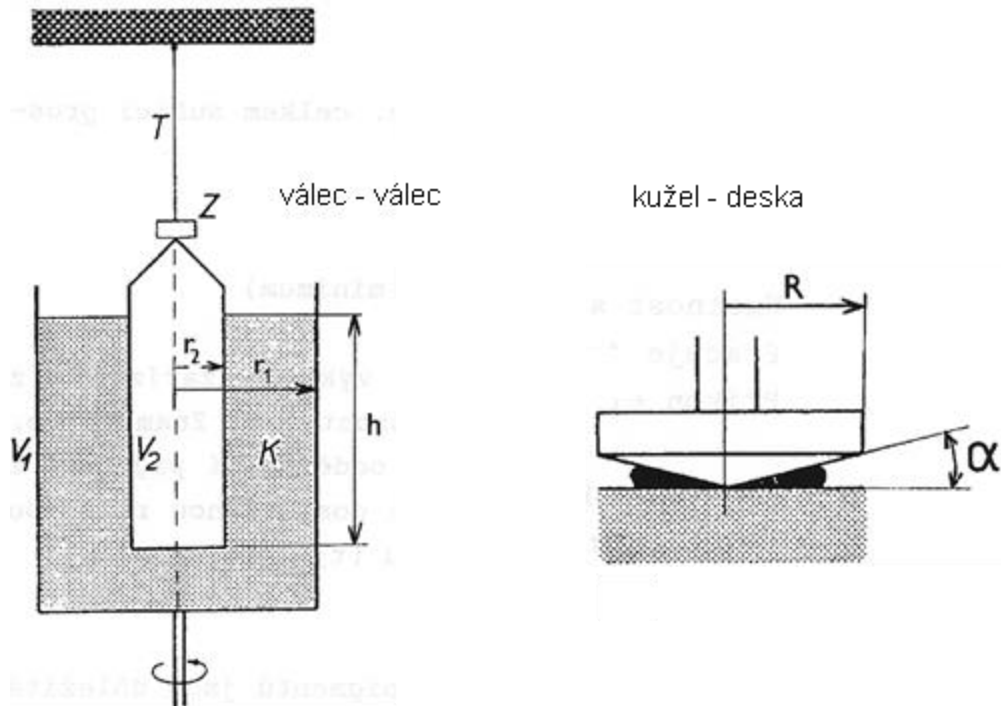
kde ρ_1 je hustota tělíska, ρ_2 hustota kapaliny, C je kalibrační konstanta viskozimetru a t je čas, za který tělísko urazí danou vzdálenost.

Přes nepřesnosti způsobené odlišnou trajektorií padající kuličky, je kulička často používaným propadávajícím tělískem. Její hlavní výhodou je jednoduchost zařízení a velký měřitelný rozsah viskozit. Nevýhodou je nutnost provádět větší množství měření pro eliminaci chyby způsobené různou trajektorií a problémem s určením smykového napětí v kapalině.

2.10.2.3 Rotační viskozimetry

U rotačních viskozimetrů (Obr. 15) je měřený vzorek podrobován smyku mezi dvěma definovanými plochami, z nichž jedna vykonává otáčivý pohyb. Vyhodnocován je brzdňný účinek vzorku při různých rychlostech otáčení. Nejběžnějším typem je rotační

viskozimetr s dvěma sousými válci V_1 a V_2 , mezi kterými je měřená kapalina K . Jeden z válců se během měření uvede do rotačního pohybu stálou úhlovou rychlostí a registruje se moment síly M , který působí na vnitřní válec V_2 . Obvykle se otáčivý moment měří elektronicky, což usnadňuje a urychluje jeho následné zpracování.



Obr. 15 Schéma uspořádání rotačního viskozimetru

Při známých poloměrech válců r_1 a r_2 a výšce smýkané vrstvy kapaliny h lze vypočítat viskozitu pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{M \cdot (1/r_1^2 - r_2^2)}{4\pi \cdot h \cdot \omega} = A \frac{M}{\omega},$$

kde A je přístrojová konstanta, ω je ustálená úhlová rychlost a M moment síly. Pro kapaliny s vyšší viskozitou se využívá uspořádání viskozimetru kužel – deska.

2.10.3 Vliv viskozity paliv na provoz pístových spalovacích motorů

Viskozita zásadním způsobem ovlivňuje vstřikování paliva, neboť obecně platí, že s rostoucí viskozitou dochází ke zhoršení atomizace paliva. Vysoká viskozita paliva má za následek jeho horší rozptýlení, odpařování a užší úhel vstřikování. To vede ve vý-

sledku k horšímu spalování a tvorbě sazí a většímu ředění motorového oleje. Vyšší viskozita je jedním z hlavních důvodů bránících rozšíření využití rostlinných olejů jako alternativních paliv pro vznětové motory (MURPHY a kol., 2011).

U vstřikovacích systémů paliva common rail bylo prokázáno, že vyšší viskozita MEŘO má za následek zvýšení zpoždění počátku vstřiku, snižuje objem vstřiku a zvyšuje proměnlivost vstřikované dávky paliva. Viskozita je do značné míry ovlivněna teplotou, proto jsou problémy spojené s vyšší viskozitou nejvíce patrné za nízkých teplotách okolí a studených startech motoru (HOEKMANNEN a kol., 2012).

3 MATERIÁL A METODIKA

K měření dynamické viskozity a hustoty v rozmezí teplot od -10 do 60 °C bylo připraveno 5 vzorků s různou objemovou koncentrací metylester řepkového oleje v konvenční motorové naftě.

Tab. 4 Vzorky podrobené měření dynamické viskozity a hustoty.

MN	100% motorová nafta
B7	93% motorová nafta, 7% metylester řepkového oleje
B10	90% motorová nafta, 10% metylester řepkového oleje
B30	70% motorová nafta, 30% metylester řepkového oleje
B100	100% metylester řepkového oleje

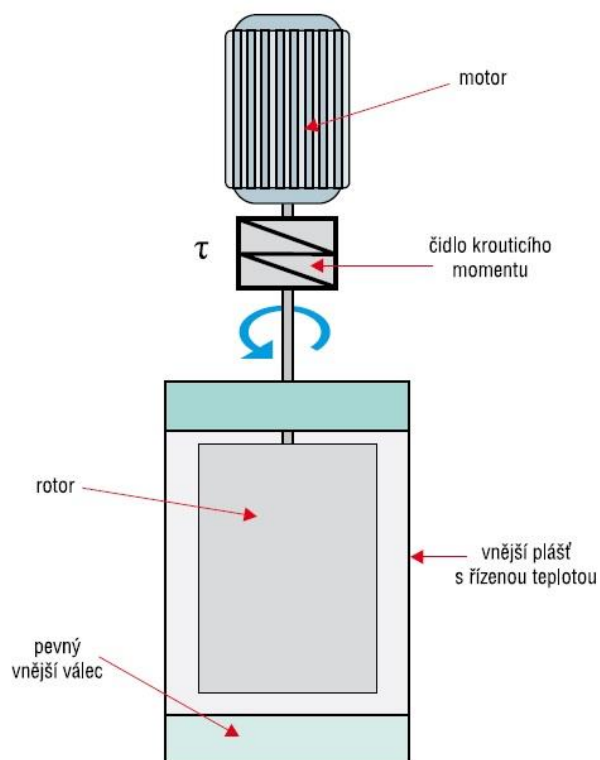
3.1 Měření dynamické viskozity

Měření viskozity výše uvedených vzorků bylo provedeno na rotačním viskozimetru Brookfield DV2T, který měří velikost krouticího momentu rotujícího vřetene ponořeného do vzorku. V tomto konkrétním případě bylo použito vřeteno s označením SC4-18 (dle Brookfielda) viz Obr. 16.



Obr. 16 Rotační vřeteno Brookfield SC4-18

Rotující vřeteno je propojeno přes čidlo krouticího momentu s hnací hřídelí motoru, která se otáčí definovanou rychlostí v závislosti na druhu a hustotě kapaliny (Obr. 17). Pro měřené vzorky byla zvolena smyková rychlost 200 s⁻¹. Úhel pootočení hřídele je měřen elektronicky a poskytuje přesnou informaci o aktuální poloze hřídele, potažmo vřetene. Z měřených hodnot je na základě vnitřních výpočtů již přímo zobrazována hodnota dynamické viskozity v [mPa.s]. Rozsah měření pro stanovení dynamické viskozity vzorků může být přizpůsoben vhodně zvolenou kombinací typu vřetene a velikostí smykové rychlosti (SEVERA, HAVLIČEK, KUMBÁR, 2009).



Obr. 17 Geometrické uspořádání viskozimetru

Tab. 5 Technické specifikace přístroje Brookfield DV2T:

Rozsahy měření pro standartní vřetena:	DV2TLV	1*) ... 6 000 000 [mPa.s]
	DV2TRV	100**) ... 40 000 000 [mPa.s]
	DV2THA	200**) ... 80 000 000 [mPa.s]
	DV2THB	800**) ... 320 000 000 [mPa.s]
Přesnost:	± 1,0 %	z plného rozsahu
Opakovatelnost:	± 0,2 %	z plného rozsahu
Pracovní prostředí:	0 °C - 40 °C	

*) pro měření v rozsahu 1 ... 15 mPa.s je nutné objednat adaptér UL

**) pro měření těchto krajních minimálních hodnot je nutné objednat vřeteno RV/HA/HB-1

3.1.1 Postup měření dynamické viskozity

Do standardizované kyvety bylo nalito 15 ml zkušební vzorku paliva. Tato kyveta byla následně vložena do adaptéru pro měření malých vzorků. Na adaptér bylo napojeno termostatovací zařízení, které zchladilo zkušební vzorek na -10 °C a po spuštění měření následně pozvolna ohřívalo měřený vzorek až na teplotu 60 °C. Do zkušební vzorku bylo ponořeno standardizované válcové vřeteno SC4-18 (dle Brookfielda) a k adaptéru byl připojen kalibrovaný teplotní senzor Pt 1000. Pomocí viskozimetru byla měřena

hodnota teploty, dynamické viskozity a smykového napětí (při konstantní smykové rychlosti 200 s^{-1}) zkoumaného paliva. Naměřené hodnoty byly přímo odesílány do paměti PC a následně zpracovány v programu Microsoft Excel a MATLAB.

3.2 Měření hustoty

Hustota (měrná hmotnost) byla měřena pomocí přenosného digitálního hustoměru Densito 30 PX od firmy Mettler Toledo. Přístroj je vybaven speciální stupnicí pro měření ropných produktů.

Tento přenosný hustoměr umožňuje během krátké doby zjistit hustotu vzorku. Přístroj používá metodu oscilující trubice v kombinaci s přesným měřením teploty. Vzorovací hadička se ponoří do vzorku a po nasátí se automaticky spustí měření. Výsledek se zobrazí na displeji v několika sekundách. Hustoměr je vybaven pumpou s regulovatelnou rychlostí nasávání a speciálním otvorem pro možný vstřík vzorku externí stříkačkou (pro velmi viskózní vzorky). Přístroj má automatickou teplotní kompenzaci nebo 10 teplotních kompenzačních koeficientů. Kalibrace se provádí na vzduch nebo vodu. Do interní paměti lze uložit až 1100 výsledků vzorků a přenést do osobního počítače pomocí infračerveného rozhraní. Densito 30 PX se dodává v kufříku s kompletním vybavením, viz Obr. 18.



Obr. 18 Přenosný digitální hustoměr Densito 30 PX (Merci, 2013)

Tab. 6 Technické specifikace přístroje Densito 30PX

Měřicí rozsah hustoty:	0 až 2 g.cm ⁻³
Měřicí rozsah teploty:	0 až +60 °C
Rozlišení:	0,0001 g.cm ⁻³
Přesnost:	0,001 g.cm ⁻³
Jednotky měření:	hustota
	specifická hmotnost
	Brix%
	alkohol
	°Baumé
	°Plato
	hustota API
	kyselina sírová koncentrace
Identifikace vzorku:	datum
	čas
	identifikace přístroje

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Teplotní závislost hustoty zkoumaných vzorků paliv

Naměřené hodnoty hustoty vybraných vzorků motorové nafty, metylesteru řepkového oleje a jejich směsí v rozmezí teplot od -10 °C do 60 °C jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Teplotní závislost hustoty motorové nafty, MEŘA a jejich směsí

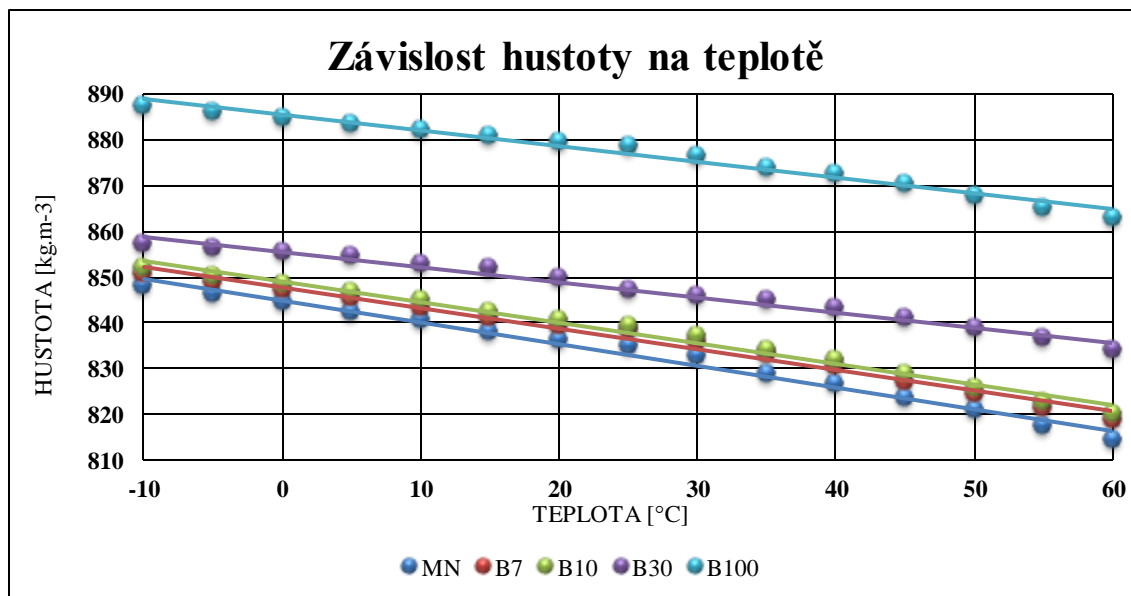
Teplota, °C	Hustota, kg.m ⁻³				
	MN	B7	B10	B30	B100
-10	848,0	850,6	852,0	857,1	887,3
-5	846,4	849,1	850,3	856,3	885,9
0	844,5	847,3	848,5	855,5	884,7
5	842,6	845,4	846,7	854,4	883,6
10	840,5	843,4	844,8	853,0	882,1
15	838,0	841,2	842,5	851,8	880,6
20	836,2	839,3	840,6	849,6	879,4
25	835,0	838,6	839,2	847,3	878,7
30	832,8	836,0	837,3	846,0	876,6
35	829,0	833,1	834,0	845,0	874,0
40	826,8	830,5	831,9	843,2	872,6
45	823,5	827,1	828,7	841,1	870,2
50	820,9	824,6	825,9	839,0	867,9
55	817,4	821,3	822,9	836,9	865,2
60	814,6	819,0	820,1	834,0	863,1

Graficky jsou naměřené výsledky znázorněny v grafu Obr. 19 a proloženy lineární funkcí:

$$f(X) = ax + b$$

Pro výpočet teplotní závislosti hustoty byla rovnice upravena do následujícího tvaru:

$$\rho(T) = a \cdot T + b$$



Obr. 19 Teplotní závislost hustoty motorové nafty, MEŘA a jejich směsí

Spolehlivost proložených lineárních funkcí je určena koeficienty determinace R^2 , které jsou uvedeny v tabulce 8 společně s hodnotami konstant a a b rovnic těchto lineárních funkcí. Z grafu Obr. 19 je patrné, že se hustota paliva zvyšuje s klesající teplotou a rostoucím podílem metylesteru řepkového oleje.

Tab. 8 Hodnoty koeficientů korelace a konstant rovnic lineárních funkcí zkoumaných vzorků paliv

Palivo	a [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$]	b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	R^2
MN	-0,4748	844,95	0,9878
B7	-0,4521	847,74	0,9864
B10	-0,4512	848,97	0,9886
B30	-0,3289	855,57	0,9846
B100	-0,3398	885,29	0,9794

Nejvyšší teplotní závislost hustoty na teplotě byla naměřena u vzorku čisté motorové nafty bez přidaného metylesteru řepkového oleje. Počáteční hustota $848 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ poklesla o 3,93 % na $814,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.2 Teplotní závislost dynamické viskozity

Na vybraných vzorcích motorové nafty, metylester ester řepkového oleje a směsích obsahujících motorovou naftu s podíly 7, 10 a 30 % metylester řepkového oleje bylo pro-

vedeno měření závislosti dynamické viskozity na teplotě v rozmezí teplot -10 až 60 °C. Výsledky měření jsou zobrazeny v grafu Obr. 20. Naměřené hodnoty jsou proloženy exponenciální funkcí při použití následujících vztahů:

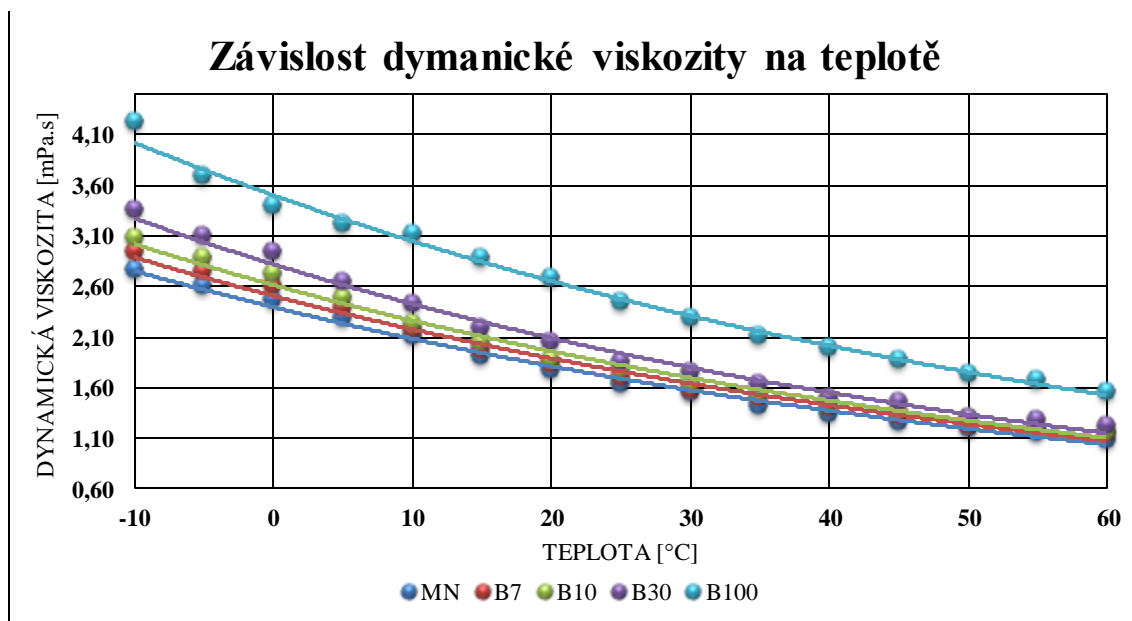
$$y(x) = a \cdot e^{bx}$$

Pro výpočet teplotní závislosti dynamické viskozity byla rovnice upravena do následujícího tvaru:

$$\eta(T) = a \cdot e^{bT}$$

Tab. 9 Teplotní závislost dynamické viskozity motorové nafty, MEŘA a jejich směsí

Teplota, °C	Dynamická viskozita, mPa.s				
	MN	B7	B10	B30	B100
-10	2,76	2,95	3,08	3,35	4,23
-5	2,61	2,75	2,89	3,09	3,69
0	2,47	2,60	2,72	2,94	3,39
5	2,28	2,38	2,48	2,65	3,22
10	2,11	2,17	2,23	2,42	3,11
15	1,91	1,98	2,06	2,18	2,88
20	1,78	1,84	1,87	2,05	2,68
25	1,63	1,69	1,78	1,86	2,44
30	1,55	1,58	1,63	1,75	2,29
35	1,42	1,50	1,54	1,64	2,12
40	1,34	1,39	1,46	1,50	1,99
45	1,26	1,33	1,35	1,46	1,87
50	1,20	1,23	1,31	1,30	1,74
55	1,16	1,20	1,21	1,29	1,67
60	1,08	1,14	1,16	1,22	1,55



Obr. 20 Teplotní závislost dynamické viskozity motorové nafty, MEŘA a jejich směsí

Přesnost proložených funkcí je definována koeficienty determinace R^2 . Hodnoty koeficientů determinace pro jednotlivé vzorky a hodnoty konstant exponenciálních rovnic funkcí a a b , jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10 Hodnoty koeficientů determinace a konstant rovnic exponenciálních funkcí

Palivo	a [mPa·s]	b [°C ⁻¹]	R^2
MN	2,3961	-0,014	0,9932
B7	2,5084	-0,014	0,9906
B10	2,6158	-0,014	0,9910
B30	2,8206	-0,015	0,9909
B100	3,503	-0,014	0,9954

Laboratorním měřením byla potvrzena předpokládaná klesající závislost dynamické viskozity s rostoucí teplotou obdobně jako v diplomové práci „Vliv fyzikálních vlastností paliva na tvorbu směsi“ z roku 2012 uvádí Jiří Honzík. Z grafu Obr. 17 je zřejmé že tato závislost nemá lineární průběh. Nejvyšší teplotní závislost dynamické viskozity byla naměřena u vzorku paliva motorové nafty s 30% obsahem metylesteru řepkového oleje. Při počáteční teplotě -10 °C byla naměřena dynamická viskozita vzorku 3,35 mPa·s. Na konci měření, při teplotě vzorku 60 °C, byla hodnota naměřené viskozity 1,22 mPa·s. To znamená pokles o 65,5 % ve srovnání s počáteční hodnotou dynamické viskozity.

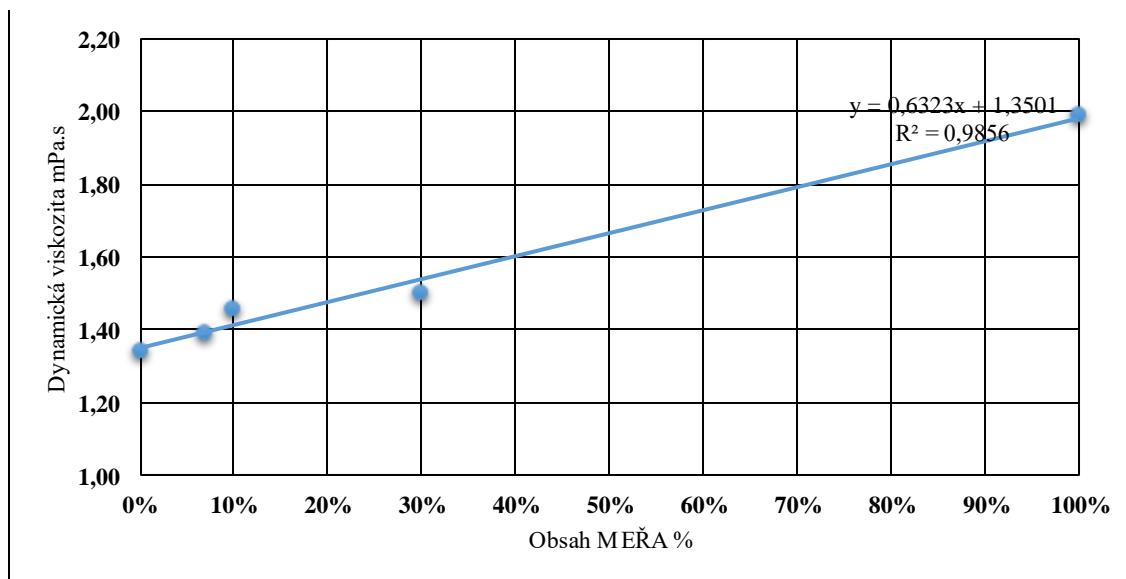
Naopak nejnižší procentuální pokles byl naměřen u motorové nafty bez přidané biosložky. Počáteční naměřená hodnota dynamické viskozity 2,76 mPa·s při teplotě -10 °C u vzorku motorové nafty poklesla o 60,9 % na 1,08 mPa·s při teplotě 60 °C.

Pro porovnání zkoumaných vzorků byla vybrána dle normy ISO 8217 srovnávací teplota pro predestilované kapaliny 40 °C.

Tab. 11 Dynamická viskozita motorové nafty, MEŘA a jejich směsí při teplotě 40 °C

Koncentrace [%]	0%	7%	10%	30%	100%
Dynamická viskozita [mPa·s]	1,34	1,39	1,46	1,50	1,99

Graficky je závislost dynamické viskozity motorové nafty na obsahu metylesteru řepkového oleje znázorněna na obr. 21. Bodový graf je proložen lineární funkcí dle rovnice: $f(X) = ax + b$. Hodnoty konstant rovnice lineární funkce a , b jsou uvedeny v tabulce 12.



Obr. 21 Závislost dynamické viskozity mot. nafty na obsahu MEŘA při teplotě 40 °C

Dle předpokladu se hodnoty dynamické viskozity s rostoucím podílem metylesteru řepkového oleje zvyšovaly. Koeficient determinace proložené lineární funkce nabył hodnoty 0,985.

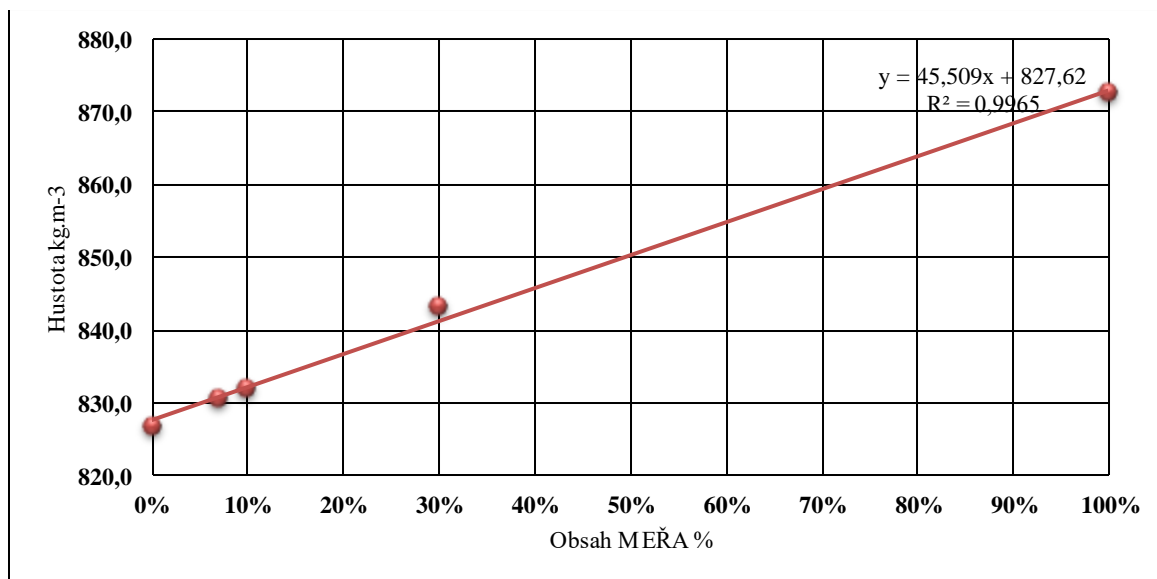
Tab. 12 Hodnoty konstant rovnice lineární funkce proložení dynamické viskozity

Konstanta	a [mPa·s]	b [°C ⁻¹]
Lineární závislost dyn. viskozity	0,6323	1,3501

Tab. 13 Hustota motorové nafty, MEŘA a jejich směsí při teplotě 40 °C

Koncentrace [%]	0%	7%	10%	30%	100%
Hustota [kg·m ⁻³]	826,8	830,5	831,9	843,2	872,6

Závislost hustoty motorové nafty na obsahu metylesteru řepkového oleje je graficky znázorněna na obr. 22. Bodový graf je proložen lineární funkcí dle rovnice: $f(X) = ax + b$. Hodnoty konstant rovnice lineární funkce a , b jsou uvedeny v tabulce 14.

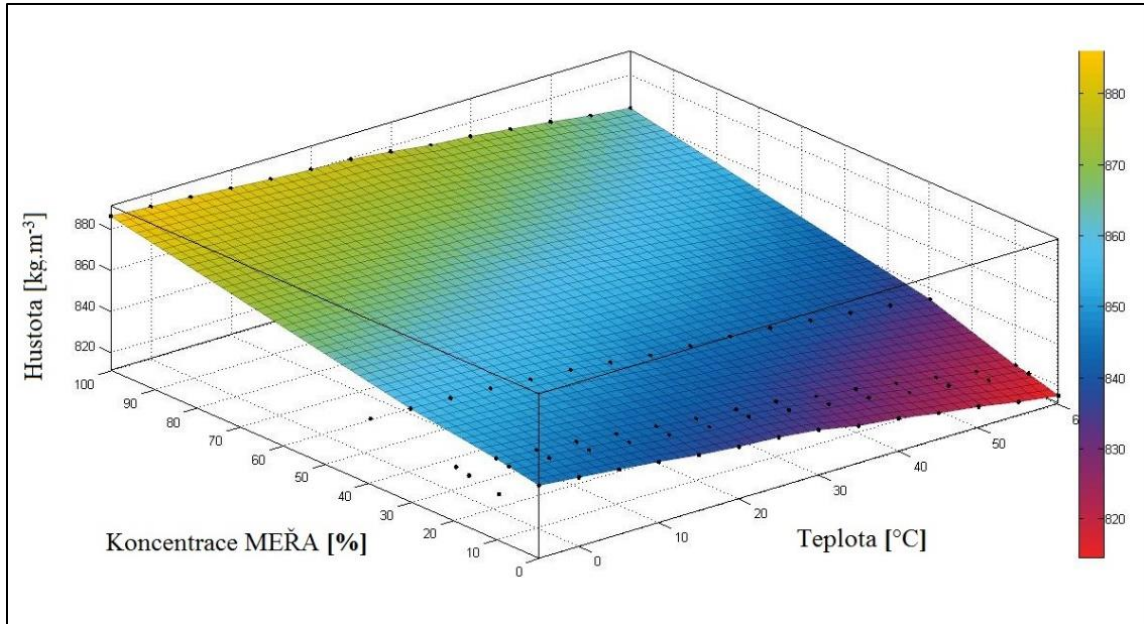
**Obr. 22** Závislost hustoty motorové nafty na obsahu MEŘA při teplotě 40 °C

Hodnoty hustoty se obdobně jako u dynamické viskozity s rostoucím podílem metylesteru řepkového oleje zvyšovaly. Koeficient korelace proložené lineární funkce nabyl v tomto případě hodnoty 0,996.

Tab. 14 Hodnoty konstant rovnice lineární funkce proložení hustoty

Konstanta	a [kg·m ⁻³ ·°C ⁻¹]	b [kg·m ⁻³]
Lineární závislost hustoty	45,509	827,62

Pro lepší přehlednost byly z naměřených hodnot vytvořeny v programu MATLAB trojrozměrné grafy závislosti hustoty a dynamické viskozity na teplotě a koncentraci metylesteru řepkového oleje.



Obr. 23 Hustota motorové nafty v závislosti na koncentraci MEŘA a teplotě



Obr. 24 Dynamická viskozita motorové nafty v závislosti na koncentraci MEŘA a teplotě

5 ZÁVĚR

Výše uvedená měření byla prováděna za účelem zjištění fyzikálních vlastností paliv pro vznětové motory v závislosti na rostoucím podílu biosložky při různých teplotách. S ohledem na plánované navýšení povinného podílu obnovitelných zdrojů energie v palivech určených pro dopravu nabývá znalost této problematiky na významu. Všechny členské státy Evropské unie mají povinnost navýšit stávající podíl obnovitelných zdrojů (7 %) na 10 % do roku 2020.

Z fyzikálních vlastností paliv pro vznětové motory byla v této práci měřena hustota a dynamická viskozita. Jednalo se o motorovou naftu bez biosložky (MN), metylester řepkového oleje (B100) a směsi motorové nafty se 7 % (B7), 10 % (B10) a 30 % (B30) metylesteru řepkového oleje.

Dynamická viskozita byla u zvolených vzorků měřena v rozmezí teplot -10 až 60 °C pomocí rotačního viskozimetru Brookfield DV2T. Výsledky měření v souladu s očekáváním odhalily u všech vzorků pokles dynamické viskozity s narůstající teplotou. U vzorků byla rovněž měřena pomocí hustoměru Densito 30 PX hustota v teplotním rozmezí -10 až 60 °C. Se vzrůstající teplotou došlo u všech vzorků k poklesu hustoty. Jako srovnávací pro závislosti dynamické viskozity a hustoty byla v souladu s ISO 8217 vybrána teplota 40 °C. Za těchto podmínek se dynamická viskozita vybraných vzorků pohybovala v rozmezí hodnot od 1,34 mPa·s až 1,99 mPa·s a byla prokázána závislost mezi podílem metylesteru řepkového oleje a hodnotou dynamické viskozity. Hustota vzorků se při teplotě 40 °C pohybovala v rozmezí 826,8 kg·m⁻³ až 872,6 kg·m⁻³ a byla rovněž zjištěna závislost mezi podílem metylesteru řepkového oleje v palivu a narůstající hustotou.

Norma ČSN EN 590 udává parametry, které by měla paliva splňovat. Výrobci palivových systémů jako např. Bosch proto dovolují ve svých systémech používat pouze paliva odpovídající tomuto standartu. Dle normy ČSN EN 590 se musí u motorové nafty kinematická viskozita při 40 °C pohybovat v rozmezí 2,00 mm²·s⁻¹ až 4,50 mm²·s⁻¹ a současně se hustota za teploty 15 °C musí pohybovat v rozmezí 800 kg·m⁻³ až 845 kg·m⁻³. Požadavky normy na hustotu splnil vzorek čisté motorové nafty (MN) a vzorky paliv s obsahem 7 % (B7) a 10 % (B10) metylesteru řepkového oleje. Hodnoty kinematické viskozity vzorků po přepočtu z dynamické viskozity se pohybovaly v rozmezí 1,62 mm²·s⁻¹ až 2,28 mm²·s⁻¹. Všechny vzorky tedy vyhověli požadavkům normy ČSN EN 590 na hustotu.

Teplotní závislosti dynamické viskozity vybraných vzorků paliv byly proloženy exponenciálními funkcemi. Koeficienty determinace vložených funkcí R^2 se pohybovali v rozmezí hodnot 0,9906 až 0,9954. Teplotní závislosti hustoty vybraných vzorků paliv byly proloženy lineárními funkcemi. Hodnoty koeficientů determinace vložených funkcí R^2 se pohybovaly v rozmezí 0,9794 až 0,9886.

Navržené matematické modely mohou sloužit k predikci hodnot dynamické viskozity a hustoty směsí motorové nafty s různým podílem metylesteru řepkového oleje.

LITERATURA

1. BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0619-2.
2. BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Zemědělská technika a biomasa: sborník přednášek*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2004. ISBN 80-903-2711-7.
3. DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4.
4. HOEKMANNEN K. S. a kol. *Recenze bionafty složení, vlastnosti a specifikace*. scopus.[online]. 2012 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: www.scopus.com
5. MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva. 1. vyd.* Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
6. MURPHY F., a kol. *Vyhodnocení viskozity a hustoty paliva vyrobeného pyrolýzou ve směsi s konvenční motorovou naftou ve vztahu k dodržování specifikace paliva EN 590:2009*. scopus.[online]. 2011 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: www.scopus.com
7. SEVERA L., HAVLÍČEK, M., KUMBÁR, V. *Temperature dependent kinematic viscosity of different types of engine oils*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009.
8. SORAB, Jagadish a William E. VANARSDALE. *A Correlation for the Pressure and Temperature Dependence of Viscosity*. *Tribology Transactions* [online]. 1991, 34(4), 604-610 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1080/10402009108982077. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402009108982077>
9. STANĚK, Vladimír. *Vlastnosti aprotických elektrolytů pro lithno-iontové akumulátory*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT.
10. ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. 1. vyd. Brno: CPress, 2013. Auto-moto-profi (CPress). ISBN 978-80-264-0160-5.
11. ŠEDIVÁ, Zdeňka a Petr JEVIČ (eds.). *Biopaliva, methylestery a směsná paliva: Biofuels, methylesters and blended fuels : (legislativa, kvalita, standardizace, logistika, marketing) : sborník vědeckých a odborných prací vydaný k 6. mezinárodnímu semináři konanému 31. března 2004 jako odborná doprovodná akce 8. mezinárodního veletrhu zemědělské techniky TECHAGRO 2004, Brno - výstaviš-*

- tě & Kongresové centrum Brno*. Vyd. 1. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky pod koordinací a gescí Sdružení pro výrobu bionafty, 2004. ISBN 80-903271-5-X.
12. THOMPSON, Kaiser, Jorgenson. et. al. *Viscosity measurements of methanol-water and acetonitrile-water mixtures at pressures up to 3500 bar using a novel capillary time-of-flight viscometer*, Journal of Chromatography A. Volume 1134, Issues 1-2, 17 November 2006, Pages 201-209
13. TROYER, *Oil Analysis Understanding Absolute and Kinematic Viscosity*
http://www.noria.com/learning_center/category_article.asp?articleid=294&relatedbookgroup, 2006
14. VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6461-5.
15. ZEHNÁLEK, Josef. *Chemie, paliva, maziva*. 2., nezměn. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005. ISBN 80-7157-900-9.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1a Typická distribuce uhlovodíků v motorové naftě podle počtu uhlíků	15
Obr.1b Typická destilační křivka motorové nafty	15
Obr. 2 Stanovení lokální hodnoty měrného tlaku.....	18
Obr. 3 Ponorový hustoměr	20
Obr. 4 Schématické zobrazení pyknometru.....	21
Obr. 5 Mohrovy váhy	22
Obr. 6 Přenosný digitální hustoměr Densito 30 PX.....	22
Obr. 7 Smykové napětí při laminárním proudění	24
Obr. 8 Reynoldsův pokus.....	26
Obr. 9 Rychlostní profil v potrubí.....	26
Obr. 10 Závislost $p_z = f(v)$	26
Obr. 11 Rozložení rychlosti při laminárním proudění mezi dvěma deskami.....	27
Obr. 12 Reologické vlastnosti kapalin.....	28
Obr. 13 Schéma kapilárního viskozimetru	30
Obr. 14 Padající koule tělískového viskozimetru	31
Obr. 15 Schéma uspořádání rotačního viskozimetru	33
Obr. 16 Rotační vřeteno Brookfield SC4-18.....	35
Obr. 17 Geometrické uspořádání viskozimetru	36
Obr. 18 Přenosný digitální hustoměr Densito 30 PX (Merci, 2013)	37
Obr. 19 Teplotní závislost hustoty motorové nafty, MEŘA a jejich směsí.....	40
Obr. 20 Teplotní závislost dynamické viskozity motorové nafty, MEŘA a jejich směsí	41
Obr. 21 Závislost dynamické viskozity mot. nafty na obsahu MEŘA při teplotě 40 °C	43
Obr. 22 Závislost hustoty motorové nafty na obsahu MEŘA při teplotě 40 °C	44
Obr. 23 Hustota motorové nafty v závislosti na koncentraci MEŘA a teplotě.....	45
Obr. 24 Dynamická viskozita motorové nafty v závislosti na koncentraci MEŘA a teplotě ...	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hustota a obsah heteroatomů při 15 °C vybraných druhů ropy	12
Tab. 2 Požadavky na kvalitu motorových naft podle ČSN EN 590.....	14
Tab. 3 Průměrné vlastnosti metylesterů různých rostlinných olejů a motorové nafty	16
Tab. 4 Vzorčky podrobené měření dynamické viskozity a hustoty	35
Tab. 5 Technické specifikace přístroje Brookfield DV2T	36
Tab. 6 Technické specifikace přístroje Densito 30PX	38
Tab. 7 Teplotní závislost hustoty motorové nafty, MEŘA a jejich směsí.....	39
Tab. 8 Hodnoty koeficientů korelace a konstant rovnic lineárních funkcí.....	40
Tab. 9 Teplotní závislost dynamické viskozity motorové nafty, MEŘA a jejich směsí.....	41
Tab. 10 Hodnoty koeficientů determinace a konstant rovnic exponenciálních funkcí.....	42
Tab. 11 Dynamická viskozita motorové nafty, MEŘA a jejich směsí při teplotě 40 °C	42
Tab. 12 Hodnoty konstant rovnice lineární funkce proložení	43
Tab. 13 Hustota motorové nafty, MEŘA a jejich směsí při teplotě 40 °C.....	43
Tab. 14 Hodnoty konstant rovnice lineární funkce proložení	44