



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

# **SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ**

COMBUSTION OF RENEWABLE LIQUID FUELS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. RADEK NEJEZCHLEB**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. VÍT KERMES, Ph.D.**

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství  
Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radek Nejezchleb

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Spalování kapalných paliv z obnovitelných zdrojů**

v anglickém jazyce:

#### **Combustion of renewable liquid fuels**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

- Rešerše dostupných paliv z obnovitelných zdrojů
- Reše způsobů atomizace kapalných paliv
- Zkoušky spalování vybraných kapalných biopaliv
- Vyhodnoce zkoušky spalování

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše potenciálních kapalných paliv z obnovitelných zdrojů na zemi ČR
- 2) Rešerše základních způsobů atomizace kapalných paliv s obledem na kapalná biopaliva
- 3) Vytvoření plánu, provedení a vyhodnocení experimentu - spalování vybraných kapalných paliv
- 4) Zbodnocení využitelnosti kapalných paliv z obnovitelných zdrojů pro jednotky o tepelných výkonech do 1MW



prof. RNDr. Miroslav Douřek, CSc.  
Děkan

prof. Ing. Petr Šteblík, CSc.  
Ředitel ústavu

Seznam odborné literatury:

- ČSN a ČSN EN z oblasti spalování kapalých paliv
- Bezpečnostní lity
- A.H. Lefebvre: Atomization and Sprays
- C. Bukal: Industrial burners handbook

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radok Miroslav

studijní obor: Inženýrství v energetice

obor: Procesní inženýrství (3909T003)

Ředitel ústavu Vm v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Študijním a  
zkoušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Spalování kapalých paliv z obnovitelných zdrojů

v anglickém jazyce:

Composition of renewable liquid fuels

Studijní charakteristika problematiky: škola

- Řešení dostupných paliv z obnovitelných zdrojů

- Řešení způsobů atomace kapalých paliv

- Zkoušky spalování výtvarných kapalných hmot


- Výhodové zkoušky spalování


Vedoucí diplomové práce: Ing. Vít Kermes, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## ABSTRAKT

Práce se zabývá spalováním kapalných biopaliv a jejich využitelností jako paliva pro energetické jednotky o menších tepelných výkonech. V úvodu práce je provedena rešerše základních potenciálně využitelných kapalných biopaliv na území ČR. Tato část je zaměřena obzvláště na způsob výroby a energetickou náročnost výroby metylesteru řepkového oleje (MEŘO) a biolihu.

V dalších kapitolách je provedena rešerše základních způsobů atomizace kapalných paliv. Důraz je kladen na pneumatickou atomizaci, konkrétně pak na effervescentní způsob atomizace, který byl využit při praktických zkouškách.

Náplní praktické části je provedení zkoušek fosilního paliva (motorová nafta) a vybraného biopaliva (MEŘO) na zkušebně hořáků. Vlastní zkoušce předcházelo zjištění základních spalovacích vlastností použitých paliv a provedení plánu experimentu. Dále je provedeno srovnání jednotlivých provozních stavů z hlediska kvality atomizace, kvality spalování a geometrických charakteristik plamene. V závěru práce je zhodnocena využitelnost zkoušeného kapalného biopaliva pro energetické jednotky menších tepelných výkonů.

## ABSTRACT

This thesis is concerned with combustion of liquid biofuels, and possibility of using liquid biofuels for lower heat output power units. Overview of basic usable liquid biofuels in Czech Republic is executed in the beginning of the thesis. This part is focused especially on production method and energy effectivity of rape-oil methyl ester (RME) and bioethanol production.

Overview of basic atomization method of liquid fuels is executed in next chapters. The focus is stressed on pneumatic atomization, especially effervescent atomization method, which was used in practical experiment.

Practical part contains fossil fuel and selected biofuel (RME) combustion test executed on burner testing device. Basic combustion properties was found and test plan was made before executing the test. Various operating conditions are compared in terms of atomization quality, combustion quality and geometrical characteristics of flame. Usability of tested liquid biofuels for lower heat output power units is evaluated in the conclusion.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kapalná biopaliva, výroba MEŘO, výroba bioléh, atomizace kapalin, rozprašování kapalin, zkoušky spalování, zkušebna hořáků

## KEYWORDS

Liquid biofuels, RME production, bioethanol production, liquid atomization, combustion testing, burner testing device

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEJEZCHLEB, R. *Spalování kapalných paliv z obnovitelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Kermes, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím uvedených literárních zdrojů, pod vedením Ing. Víta Kermese, PhD.

V Brně dne 26.5.2011

.....

Podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vítu Kermesovi, Ph.D. za poskytnuté informace, odborné vedení a čas strávený při konzultacích a zkouškách hořáků.

Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za jejich notnou podporu během psaní této diplomové práce i během celé doby vysokoškolského studia.



1	ÚVOD.....	11
2	CÍLE PRÁCE .....	12
3	ZÁKLADY SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV.....	13
3.1	Výhřevnost a spalné teplo .....	13
3.2	Chemické složení kapalných paliv.....	14
3.3	Spotřeba vzduchu.....	14
3.4	Meze výbušnosti .....	16
3.5	Charakteristické teploty .....	17
3.6	Základy dynamiky spalování .....	17
3.6.1	Řetězový mechanismus oxidačních reakcí.....	18
3.6.2	Rychlost hoření.....	18
3.6.3	Laminární a turbulentní rychlost plamene.....	19
4	KAPALNÁ PALIVA .....	20
4.1	Fosilní kapalná paliva .....	20
4.2	Kapalná biopaliva .....	22
4.2.1	Potenciál kapalných biopaliv na území ČR.....	22
4.2.2	MEŘO.....	23
4.2.3	Biolíh .....	25
4.2.4	Další využitelná biopaliva .....	28
5	KONSTRUKCE HOŘÁKŮ .....	30
5.1	Základní rozdělení hořáků .....	30
5.2	Základní části hořáku .....	31
5.3	Konstrukce hořáků dle použitého paliva.....	32
5.4	Přirozený a nucený přívod okysličovadla .....	32
5.5	Velikost a tvar plamene .....	33
5.6	Mísení paliva se vzduchem.....	34
5.6.1	Ejekční hořáky .....	34
5.6.2	Difuzní hořáky .....	35
5.7	Spalovací podmínky a emise .....	35
5.7.1	Oxid uhličitý .....	35
5.7.2	Oxid uhelnatý .....	36
5.7.3	Oxidy dusíku.....	36
5.7.4	Nespálené uhlovodíky .....	38
6	ATOMIZACE.....	39
6.1	Vlastnosti kapalin ovlivňující průběh atomizace.....	39
6.1.1	Hustota kapaliny .....	39
6.1.2	Viskozita.....	40

6.1.3	Viskozita neneutonských kapalin .....	41
6.1.4	Povrchové napětí .....	42
6.2	Teoretické základy z oblasti atomizace .....	43
6.2.1	Energetická náročnost atomizace .....	43
6.2.2	Velikost vzniklých kapek .....	43
	Statické vytváření kapek.....	44
6.2.3	Délka souvislého proudu kapaliny za tryskou .....	45
6.3	Způsoby atomizace .....	46
6.3.1	Tlakové atomizéry .....	47
6.3.2	Pneumatické atomizéry.....	48
6.3.3	Rotační atomizéry .....	52
6.3.4	Speciální atomizéry .....	53
7	URČENÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ PALIV.....	54
7.1	Srovnání výhřevnosti a hustoty.....	54
7.2	Srovnání destilační křivky a teploty vzplanutí.....	55
7.3	Měření viskozity .....	56
7.3.1	Měření viskozity při konstantní smykové rychlosti .....	57
7.3.2	Měření viskozity při proměnné smykové rychlosti .....	57
7.4	Stanovení hustoty .....	59
7.5	Stanovení bilance spalování motorové nafty a MEŘO.....	60
8	ZKOUŠKY SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV .....	62
8.1	Popis zařízení .....	62
8.1.1	Popis použitého atomizéru.....	63
8.2	Plán zkoušek kapalných biopaliv .....	64
8.3	Popis průběhu experimentu.....	65
8.3.1	Odchytky od plánovaného průběhu .....	65
8.4	Vyhodnocení experimentu .....	65
8.4.1	Výkonové charakteristiky .....	66
8.4.2	Závislost koncentrace NO <sub>x</sub> a CO na výkonu hořáku .....	67
	Vyhodnocení závislosti emisí NO <sub>x</sub> .....	67
	Vyhodnocení závislosti emisí CO .....	67
8.4.3	Celkové srovnání chování atomizéru při spalování nafty a MEŘO .....	70
9	ZÁVĚR.....	71
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	72
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	74
12	SEZNAM PŘÍLOH .....	77

# 1 ÚVOD

Dostatek energie je jednou ze základních podmínek existence a rozvoje moderní společnosti v dnešní podobě. Od roku 1970 se světová spotřeba primární energie více než zdvojnásobila (1) a nejméně v horizontu několika desetiletí se předpokládá další růst. Výroba energie je tedy téma aktuální pro celý svět včetně České republiky. Velmi důležité je zvyšování energetické efektivity, resp. snižování souhrnné energetické náročnosti (spotřeba primárních energetických zdrojů/hrubý domácí produkt). Pokles souhrnné energetické náročnosti je však v rámci České republiky velmi pomalý (2) a neřeší otázku zajišťování PEZ, z nichž přibližně 80 % tvoří fosilní paliva (3).

Využití fosilních paliv pro zajišťování energie naráží z dlouhodobého hlediska na několik problémů. Z ekologického hlediska je nežádoucí zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře (3) a z ekonomického hlediska je problémem zhoršující se dostupnost fosilních paliv, rostoucí náročnost těžby a tím klesající energetická i ekonomická návratnost (4) (5). Je tedy potřeba hledat alternativy, které by v budoucnu pomohly k řešení otázky zaopatřování společnosti energií.

Běžně využívaným alternativním zdrojem energie je energie vodních toků. Podmínky v ČR však nejsou ideální, proto je z vody vyráběna pouze malá část energie a s dalším rozvojem nelze příliš počítat.

K dalším alternativním zdrojům energie se řadí energie větru a sluneční energie, jejichž velká nevýhoda je nestálá dodávka, kterou je nutné v případě přímé dodávky do sítě regulovat. Geotermální energii je možné využívat ve vulkanicky aktivních oblastech (Island), v rámci střední Evropy spíše v malém měřítku (tepelná čerpadla).

V současnosti je velká naděje kladena do obnovitelného získávání energie z biomasy. Při růstu biomasy je spotřebováváno stejné množství oxidu uhličitého, jaké je následně uvolněno při spálení, což by mělo pomoci snížit rychlost zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře.

Nejjednodušší technologie pracují se spalováním pevné biomasy, např. dřevní hmoty, slámy, peletek apod. Dalším způsobem energetického využití biomasy je výroba bioplynu pomocí fermentace, která je v současnosti také poměrně dobře zvládnutá a běžně používaná.

Další oblast tvoří kapalná paliva vyrobená z biomasy, která by mohla být ekvivalentem ke kapalným ropným produktům, kterých je ve světě spotřebováváno velké množství v nejrůznějších aplikacích od dopravy až po energetiku a teplárenství. Masivnímu rozšíření těchto paliv však brání řada ekonomických i technických, proto se v současné době ve větší míře používají pouze jako přísada do tradičních fosilních paliv a používání čistých biopaliv je spíše ojedinělé. Problémem je jednak jejich složitá a energeticky relativně náročná výroba a jednak mírně odlišné vlastnosti biopaliv, které komplikují jejich použití v zařízeních pracujících s ropnými palivy. Vzhledem k tomu, že pěstování energetických plodin vyžaduje velké množství orné půdy, je aktuální otázkou také přípustná míra využití zemědělské půdy pro výrobu paliv.

## 2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je shrnout základní teoretické poznatky nutné k vyhodnocení využitelnosti kapalných biopaliv na území České republiky jako zdroje pro energetické jednotky o tepelných výkonech do 1 MW. Na základě zjištěných informací vytvořit plán zkoušek kapalných biopaliv, který by zahrnoval důležité provozní stavy a umožňoval reálné zhodnocení spalovacích vlastností daného paliva. Následně budou na experimentálním spalovacím zařízení provedeny naplánované zkoušky s vybraným biopalivem, jejichž cílem bude zjištění spalovacích vlastností biopaliva a ověření možnosti náhrady kapalných fosilních paliv kapalným biopalivem z hlediska spalovacího procesu.

V teoretické části práce by měli být splněny následující dílčí cíle:

- 1) Shrnutí základních teoretických znalostí z oblasti spalování kapalných paliv, shrnutí důležitých fyzikálně-chemických vlastností kapalných paliv
- 2) Provedení rešerše potenciálních kapalných biopaliv na území ČR, shrnutí základních poznatků z oblasti využití orné půdy pro energetické plodiny a shrnutí poznatků z oblasti energetické náročnosti transformace surovin na konečný produkt
- 3) Shrnutí základních poznatků z oblasti konstrukce průmyslových hořáků
- 4) Shrnutí základních poznatků z oblasti konstrukce atomizérů hořáků na kapalná paliva

Cílem praktické části je stanovení a rozbor vlastností paliv důležitých z hlediska spalovacího procesu a srovnání vlastností testovaného kapalného biopaliva s adekvátním fosilním palivem. Dále vytvoření plánu zkoušek, který bude zahrnovat zejména definování jednotlivých provozních stavů pomocí charakteristických veličin a určení měřených veličin důležitých z hlediska vyhodnocení spalovacích vlastností paliva. Stěžejní částí bude provedení a vyhodnocení zkoušek spalování kapalných biopaliv na experimentálním spalovacím zařízení Ústavu procesního a ekologického inženýrství.

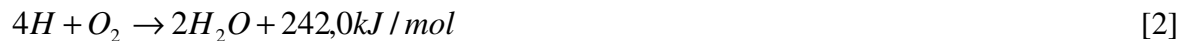
Spalování lze hodnotit pomocí velkého množství různých parametrů, proto byly v rámci této práce vybrány pouze základní parametry spalovacího procesu, které budou sledovány:

- 1) Kvalita atomizace (dostatečně jemný sprej pro odpaření)
- 2) Kvalita spalování (tvorba emisí)
- 3) Geometrické charakteristiky plamene

V závěru práce by měly být porovnány vybrané charakteristiky u obou paliv a zhodnocena použitelnost vybraného kapalného biopaliva jako zdroje energie pro jednotky malých tepelných výkonů z hlediska sledovaných parametrů.

## 3 ZÁKLADY SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV

Spalování je nejjednodušší a také nejčastější způsob přeměny chemicky vázané energie paliva na energii tepelnou. Jedná se o rychlou exotermickou oxidaci paliva s kyslíkem (6). Za základní chemické reakce při spalování považujeme oxidaci uhlíku na oxid uhličitý a vodíku na vodu, které jsou spojené s vývinem určitého množství tepelné energie (7).



Pozn.: Hodnoty platí pro 25 °C, v rovnici [2] se počítá, že voda je v plynném skupenství.

Z těchto dvou základních prvků (uhlík, vodík) je složeno každé palivo. Může obsahovat také prvky další (síra, kyslík, dusík, chlor apod.). Ostatní prvky také mohou oxidovat, zpravidla to však není žádoucí, protože jejich oxidace nepřináší významný tepelný efekt, naopak se vytváří nežádoucí emise (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>). Z praktických důvodů se uvádí také hodnoty tepla vyvinutého oxidací (spálením) jednotkového množství paliva, a to výhřevnost (LHV), případně spalné teplo (HHV).

### 3.1 Výhřevnost a spalné teplo

Jedním z nejdůležitějších údajů o palivu je množství uvolněného tepla při jeho spalování. To kvantifikujeme pomocí spalného tepla nebo výhřevnosti. Definice uvádí např. ČSN 07 5800:

#### **Spalné teplo paliva (HHV)**

Teplo, uvolněné dokonalým spálením objemové jednotky paliva za předpokladu, že voda vzniklá spalováním je v kapalném stavu.

#### **Výhřevnost paliva (LHV)**

Teplo, uvolněné dokonalým spálením objemové nebo hmotnostní jednotky paliva za předpokladu, že voda vzniklá spalováním je ve stavu páry.

Hodnota spalného tepla je vždy vyšší než hodnota výhřevnosti, je však méně používána, protože u většiny zařízení zůstává voda ve spalinách v plynném skupenství. Hlavním důvodem je zabránění korozi spalinovodu.

U kapalných paliv s nízkou výhřevností hrozí, že teplo uvolněné spalováním není dostatečné pro udržení spalování, protože nedochází k dostatečnému odparu paliva nebo není dostatečná energie k iniciaci dalšího hoření. Takové palivo pak není možné použít samostatně a hoření je nutné podpořit jiným, kvalitnějším palivem. To lze realizovat buď smícháním obou paliv, nebo jejich samostatným přívodem do spalovacího prostoru.

## 3.2 Chemické složení kapalných paliv

Chemické složení paliv je důležité především z hlediska výpočtu výhřevnosti a také pro vytvoření materiálové bilance spalování (spotřeba vzduchu, tvorba spalin). Kapalná paliva obvykle obsahují velké množství chemických sloučenin a rozbor na jednotlivé izomery je neúměrně složitý, proto se z pravidla neprovádí. V oblasti spalování se obvykle provádí prvkový rozbor, jehož výsledkem je obsah uhlíku a vodíku v palivu. V některých případech se zjišťuje také obsah kyslíku, dusíku, síry, příp. dalších složek. Chemické složení jednotlivých paliv je podrobněji rozebráno v příslušných kapitolách zabývajících se jednotlivými palivy.

## 3.3 Spotřeba vzduchu

Kyslík nutný pro oxidaci je získáván většinou z okolního vzduchu. Pokud je známé chemické složení paliva, lze množství spalovacího vzduchu vypočítat ze stechiometrických rovnic spalování jednotlivých složek a složení vzduchu. Prakticky probíhá spalování vždy s přebytkem vzduchu, aby došlo k dokonalému spálení paliva.

Spotřeba kyslíku při spalování látky je dána stechiometrickou rovnicí reakce hoření. Např. pro butan má rovnice tvar:



Z této rovnice lze stanovit, že pro spálení 1 kmol paliva je nutné dodat 5 kmol kyslíku. U spalování můžeme bez významných nepřesností počítat dle rovnic pro ideální plyn. Dle stavové rovnice ideálního plynu se objem plynu za normálních podmínek (0 °C, 101,325 kPa) vypočte dle rovnice:

$$V = n \cdot 22,414 \quad [4]$$

Protože ve vzduchu je přibližně 21 % kyslíku, stechiometrické množství spalovacího vzduchu se spočítá dle:

$$\dot{V}_{vz}^{stech} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{0,21}, \quad [5]$$

kde  $\dot{V}_{vz}^{stech}$  je stechiometrická spotřeba spalovacího vzduchu [ $m^3_N/h$ ],  $\dot{V}_{O_2}$  je stechiometrická spotřeba kyslíku [ $m^3_N/h$ ] a 0,21 je objemová koncentrace kyslíku ve vzduchu.

V případě, že je požadován přesný výsledek nebo se jedná o okysličovadlo s jiným obsahem kyslíku, je nutné stanovit přesnou koncentraci kyslíku v daném okysličovadle. Pro praktické výpočty spalování s použitím okolního vzduchu je však hodnota 0,21 dostatečná, protože spalování probíhá s přebytkem vzduchu, jehož průtok se koriguje podle obsahu kyslíku ve spalinách. Vypočtená spotřeba vzduchu tedy slouží spíše k projekčním účelům, nikoliv k řízení procesu.

U kapalných paliv není zpravidla známé přesné chemické složení, je však možné provést prvkový rozbor, jehož výsledkem je obsah C (uhlíku) a H (vodíku) a někdy také S, N a O v daném palivu. Z výsledků prvkového rozboru je možné pomocí bilance spalování

(viz příloha 3) stanovit stechiometrickou spotřebu kyslíku. Spotřebu kyslíku na 1 kg paliva, které se skládá z  $n$  prvků, udává rovnice [6]:

$$V_{O_2}^m = \frac{22,414}{100} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i \cdot c_i}{MW_i}, \quad [6]$$

kde  $V_{O_2}^m$  je měrná stechiometrická spotřeba kyslíku [ $m^3_{N O_2}/kg_{paliva}$ ],  $S_i$  je koeficient udávající molární spotřebu kyslíku na jeden mol reagujícího prvku [ $mol_{O_2}/mol$ ] (viz stechiometrické rovnice spalování),  $c_i$  je hmotnostní koncentrace prvku  $i$  v palivu [% hm] a  $MW_i$  je molární hmotnost prvku  $i$  [ $kg/kmol$ ].

Např. pro palivo o hmotnostním složení 85 % C a 14 % H (přibližné složení motorové nafty) platí:

$$V_{O_2}^m = \frac{22,414}{100} \cdot \left( \frac{1 \cdot 85}{12,0111} + \frac{\frac{1}{4} \cdot 14}{1,00797} \right) \doteq 2,36 m^3_{N O_2} / kg_{paliva} \quad [7]$$

S použitím rovnice [5] lze nyní stanovit, že pro spálení 1kg nafty je potřeba dodat přibližně  $11,2 m^3_N$  vzduchu.

Pokud palivo obsahuje nezanedbatelné množství kyslíku, což je typické pro kapalná biopaliva, je nutné provést korekci spotřeby vzduchu. Pro palivo, kde reagujícími složkami jsou pouze C a H, má rovnice pro výpočet měrné spotřeby kyslíku tvar:

$$V_{O_2}^m = \frac{22,414}{100} \cdot \left( \frac{\%C}{12,0111} + \frac{\%H}{4 \cdot 1,00797} - \frac{\%O}{2 \cdot 15,9994} \right), \quad [8]$$

kde  $V_{O_2}^m$  je měrná stechiometrická spotřeba kyslíku [ $m^3_{N O_2}/kg_{paliva}$ ], %C, %H a %O jsou hmotnostní koncentrace uhlíku resp. vodíku v palivu. Předpokládá se, že ostatní složky jsou nespalitelné. Existují také vztahy uvažující obsah síry, chloru apod. v palivu. Zastoupení těchto složek v kapalných palivech je obvykle malé, a proto nemá z hlediska spotřeby kyslíku významný vliv.

V praxi se však spalování se stechiometrickým množstvím vzduchu nepoužívá, protože vlivem nedokonalosti v promíchání paliva by mohly vzniknout zóny s nedostatkem kyslíku. V nich by došlo k nedokonalému spalování a produkci nežádoucích emisí (CO,  $C_xH_y$ , saze). Častěji se tedy spaluje s přebytkem spalovacího vzduchu, který je dán koeficientem  $\alpha$ :

$$\dot{V}_{vz} = \dot{V}_{vz}^{stech} \cdot (1 + \alpha), \quad [9]$$

kde  $\dot{V}_{vz}$  je skutečné množství spalovacího vzduchu,  $\dot{V}_{vz}^{stech}$  je stechiometrická spotřeba spalovacího vzduchu a  $\alpha$  je koeficient přebytku spalovacího vzduchu. U kapalných paliv se hodnota  $\alpha$  pohybuje v rozmezí 5–15 %.

### 3.4 Meze výbušnosti

Meze výbušnosti udávají koncentrační rozpětí, ve kterém je palivo schopné hoření, resp. výbuchu. Protože u kapalných paliv hoří vždy páry paliva a protože zdrojem kyslíku je většinou vzduch, udává mez výbušnosti koncentraci par paliva (složky) ve směsi se vzduchem, vždy pro konkrétní atmosférické podmínky (tlak a teplotu). V literatuře jsou také dostupné meze výbušnosti pro směs par látek s čistým kyslíkem.

Z hlediska požární bezpečnosti jsou tyto hodnoty velmi důležité. Nebezpečnější jsou paliva s nízkou dolní mezí výbušnosti, případně velkým rozmezím. Obecně se za bezpečnou koncentraci považuje taková, která nepřekročí 50 % dolní meze výbušnosti. V případě výbuchu dochází k prudkému uvolnění velkého množství energie, které má vlivem prudkého zvýšení tlaku (rázové vlny) a prudkého zvýšení teploty destruktivní účinky. (8)

V oblasti spalování je naopak nutné se pohybovat v rozmezí výbušnosti. Protože je ale směs paliva se vzduchem formována postupně a současně dochází k vyhořívání této směsi, nenastává výbuch, ale hoření.

Meze výbušnosti vybraných složek kapalných paliv pro směs se vzduchem jsou uvedeny v tab. 1. Z kombinace uvedených údajů je možné určit, jaké nebezpečí jednotlivé látky představují. Obzvláště nebezpečné jsou látky s nízkým bodem vzplanutí a nízkou dolní mezí výbušnosti.

Složka	Bod vzplanutí [°C]	Bod varu [°C]	Dolní mez výbušnosti [% obj]	Horní mez výbušnosti [% obj]
Oktan	13	124,7	0,95	6,5
Cyklohexan	-18	80,75	1,2	10,2
Benzen	-11	80,1	1,4	7,1
Toluen	4	110,6	1,3	6,7
O-Xylen	17	144,41	1	7
Etylbenzen	20	136,2	0,9	3,9
Propylbenzen	30	159,2	0,8	6
Isopropylbenzen	34	152,39	0,88	6,5
Chlorbenzen	29	132	1,3	7,1
Metanol	8	64,7	6	34,7
Etanol	13	78,37	3,6	19
1-Propanol	23	97,8	2,1	13,5
Etylenglykol	120	197,8	3,8	6,35
Glycerin	198	290	2,6	11,3
Aceton	-18	56,24	2,2	13
Automob. benzín	<-20	30-210	0,6	8 *
Motorová nafta	>55	180-370	0,6	6,5 **

Tab. 1 Meze výbušnosti vybraných složek (9) \* (10) \*\* (11)

Palivo se však zpravidla neskládá pouze z jedné látky, ale ze směsi látek. Protože hoření (výbuch) nastává v plynné fázi, je možné pro meze výbušnosti směsi použít vzorec pro směs plynů dle ČSN 38 6405:



$$L_{h(d)} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{Vi}}{L_{h(d)i}} + \frac{in}{100}}, \quad [10]$$

kde  $in$  je celková koncentrace inertních složek ve směsi,  $C_{Vi}$  je koncentrace  $i$ -té složky,  $L_{h(d)}$  je horní (dolní) mez výbušnosti směsi a  $L_{h(d)i}$  je horní (dolní) mez výbušnosti  $i$ -té složky.

V souvislosti s výše uvedeným je nutné si uvědomit, že pokud není směs ohřátá nad teplotu rosného bodu (teplota, kdy je celá kapalina odpařena), bude vlivem různé teploty bodu varu jednotlivých složek koncentrace látek v plynné fázi jiná než v kapalině, přičemž jako první se začnou odpařovat těkavější složky s nižší teplotou bodu varu.

### 3.5 Charakteristické teploty

U kapalných paliv existuje několik teplot, které jsou důležité z hlediska spalování. Metody pro zjišťování charakteristických teplot jsou stanoveny a přesně popsány normou. V následujícím textu jsou teploty seřazené vzestupně.

#### **Teplota filtrovatelnosti (CFPP)**

Je nejnižší teplota, při které zkoušené palivo ještě prochází přes síto s přesně definovanou velikostí ok. Zkušební postup udává norma ČSN EN 116. Nahrazuje dříve udávaný bod tuhnutí společně s bodem zákalu. (12)

#### **Bod vzplanutí (Flash point)**

Teplota, při níž hořlavá látka vytváří dostatečné množství par k tomu, aby bylo možné je zapálit. Vzplanutí je však pouze dočasné a po vyhoření par hoření končí. (8) Zkušební postup udává ČSN EN 57 a ČSN EN ISO 2719.

#### **Bod hoření (Fire point)**

Teplota, při níž hořlavá látka vytváří takové množství par, které je schopné začít hoření, přičemž teplo vyvinuté hořením je dostatečné pro tvorbu dalších par, hoření je trvalé. U nízkovroucích kapalin je rozdíl mezi bodem vzplanutí a hoření nepatrný, ale vzrůstá se snižující se těkavostí kapaliny. (8)

#### **Teplota vznícení (Autoignition temperature)**

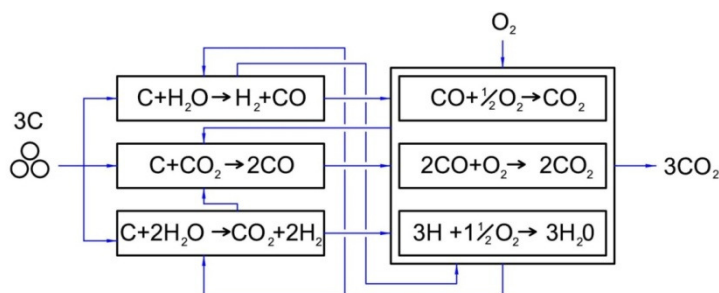
Teplota, při které je hoření vyvolané pouze působením tepla bez dodatečné iniciace. Látka při této teplotě vzplane samovolně. (8) Zkušební postup udává norma ČSN EN 14522.

### 3.6 Základy dynamiky spalování

Dynamika spalování se zabývá časovým a prostorovým průběhem oxidačních reakcí při spalování. Tato problematika je značně rozsáhlá, proto jsou v následujícím textu popsány pouze základní poznatky důležité z hlediska předmětu práce.

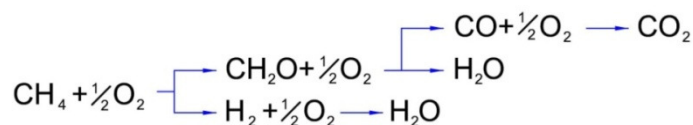
### 3.6.1 Řetězový mechanismus oxidačních reakcí

V detailním pohledu hoření neprobíhá přímo dle stechiometrických rovnic reakcí, ale skládá se z řady chemických a fyzikálních dějů probíhajících současně nebo postupně, přičemž stechiometrické reakce spalování popisují celkový výsledek těchto dějů. Dílčí reakce mají nižší aktivační energii, a reakce tedy nastávají rychleji. Jejich nahrazení stechiometrickými reakcemi je však z popisného hlediska ekvivalentní, protože výsledný tepelný efekt je dle Hessova zákona stejný jako celkový efekt jednotlivých reakcí. Dílčí reakce při hoření uhlíku znázorňuje obr. 1. (13)



Obr. 1 Schéma hoření uhlíku (14)

U spalování uhlovodíků se jsou dílčí reakce složeny z postupného rozkladu uhlovodíků na jednodušší molekuly a radikály, které dále reagují až na konečné produkty  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . (15)



Obr. 2 Schéma hoření metanu, sestaveno dle (15)

Na obr. 2 je vidět, že posledním stupněm před dokončením oxidační reakce je oxidace CO. Proto lze případy nedokonalého spalování, kdy oxidační reakce nejsou dokončeny (nedostatek kyslíku, nedostatečná teplota), identifikovat přítomností CO ve spalinách.

### 3.6.2 Rychlost hoření

Celková doba hoření se skládá ze dvou složek a je možné ji vyjádřit následujícím vztahem:

$$\tau = \tau_f + y \cdot \tau_{ch}, \quad [11]$$

kde  $\tau$  je celkový čas hoření,  $\tau_f$  je čas potřebný pro proběhnutí fyzikálních dějů,  $y$  je součinitel překryvu obou dějů a  $\tau_{ch}$  je čas potřebný pro proběhnutí chemických reakcí.

Mezi základní fyzikální děje, které určují rychlost hoření, patří smíchání paliva s oksyločovadlem a doba nutná pro přechod kapalného paliva do plynné fáze. U pevných paliv se jedná o vysušení paliva a únik prchavé hořlaviny.

Rychlost chemických reakcí definujeme jako změnu počtu molů složky za jednotku času. Pro reakční rychlost byla odvozena rovnice, založená na experimentálně zjištěných koeficientech udávajících řád rovnice. Pro dvě reagující složky má rovnice tvar:

$$\frac{dc}{d\tau} = k \cdot [A]^{n1} \cdot [B]^{n2}, \quad [12]$$

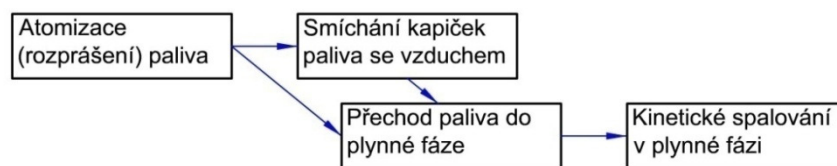
kde  $\frac{dc}{d\tau}$  je změna koncentrace složky v čase,  $k$  je rychlostní konstanta (pro danou teplotu, tlak a aktivační energii),  $[A]$  a  $[B]$  jsou koncentrace reaktantů A a B,  $n1$  a  $n2$  je řád reakce vzhledem k A, resp. B. (13)

Dle převažující složky dělíme spalování na:

1. kinetické spalování  $\tau_f < \tau_{ch}$
2. difuzní spalování  $\tau_f > \tau_{ch}$

Kinetické spalování je typické pro plynná paliva, kde k vytvoření reakční směsi došlo před vstupem do oblasti hoření (ejekční hořáky). Celkový čas hoření závisí především na rychlosti chemických reakcí. Rychlost reakcí je možné ovlivnit pomocí změny koncentrace reagujících látek, teploty a tlaku reakční směsi.

Difuzní spalování je obecně častějším případem a v případě kapalných paliv se jedná vždy o difuzní spalování. Celkový čas spalování je v tomto případě větší než u kinetického spalování. Jednotlivé fáze při spalování kapalných paliv jsou schematicky zobrazeny na obr. 3:



Obr. 3 Jednotlivé fáze spalování kapalných paliv

### 3.6.3 Laminární a turbulentní rychlost plamene

Praktickým projevem rychlosti hoření je laminární rychlost plamene, jejíž hodnota je důležitá v oblasti konstrukce hořáků a řízení spalovacího procesu.

Laminární rychlost hoření je definována jako rychlost pohybu fronty hoření u stechiometrické směsi paliva se vzduchem v uzavřené nádobě. Pro většinu alkanů má hodnotu přibližně 0,4 m/s, pro etylén dosahuje hodnoty 0,67 m/s, pro acetylén 1,4 m/s. Vodík má laminární rychlost plamene až třikrát vyšší. Aby bylo zajištěno stabilní spalování bez pulzací (rychlý posun fronty hoření), je nutné zajistit, aby rychlost hoření byla stejná jako rychlost proudění hořlavé směsi. Je tedy nutné věnovat dostatek pozornosti návrhu průtočných průřezů jednotlivých částí hořáku s ohledem na výkon hořáku a složení paliva. (16)

V hořáku je směs paliva s oksyličovadlem zpravidla v turbulentní oblasti proudění. V tomto režimu dochází k tvorbě vírů, které způsobují mísení horkých produktů spalování s reakční směsí. Vyšší teplota se podílí jednak na zkrácení doby nutné pro odpaření paliva a jeho ohřátí na teplotu vzplanutí, a také na zvýšení rychlosti chemických reakcí. Rychlost pohybu fronty hoření je tedy v turbulentní oblasti hoření výrazně vyšší. (16)

## 4 KAPALNÁ PALIVA

Palivem se všeobecně rozumí chemický prvek nebo sloučenina, které jsou schopny za určitých podmínek začít a udržet chemickou reakci spalování (17). Palivo může být v tuhém, kapalném nebo plynném skupenství.

V oblasti centrálních energetických zdrojů je nejběžnějším tuhým palivem uhlí. V současnosti se také prosazují zařízení spalující tuhou biomasu, jako je dřevní hmota, sláma, pelety, brikety apod.

Nejčastěji využívanými kapalnými palivy jsou ropné produkty, tedy směsi kapalných uhlovodíků. Od nejlehčích benzinů přes kerosin a naftu, které jsou většinou využívány v dopravních prostředcích, po topné oleje a mazuty, které jsou častěji využívány v průmyslu a energetice. Alternativou k fosilním kapalným palivům jsou kapalná biopaliva vyráběná z rostlinné hmoty, např. rostlinné oleje, metylestery mastných kyselin, odpady z jejich výroby a bioetanol neboli biofóh. Ve srovnání s fosilními palivy není využití kapalných biopaliv v ČR zatím příliš rozšířené, jejich hlavní využití je jako přídavek do pohonných hmot. (18)

Z plyných paliv je nejužívanější zemní plyn a propan-butan. Ve speciálních případech se používají průmyslové plyny jako acetylén, koksárenský plyn, vodní plyn a další. Alternativou je bioplyn (směs  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  a dalších složek), který se vyrábí metanovým kvašením v bioplynových stanicích.

### 4.1 Fosilní kapalná paliva

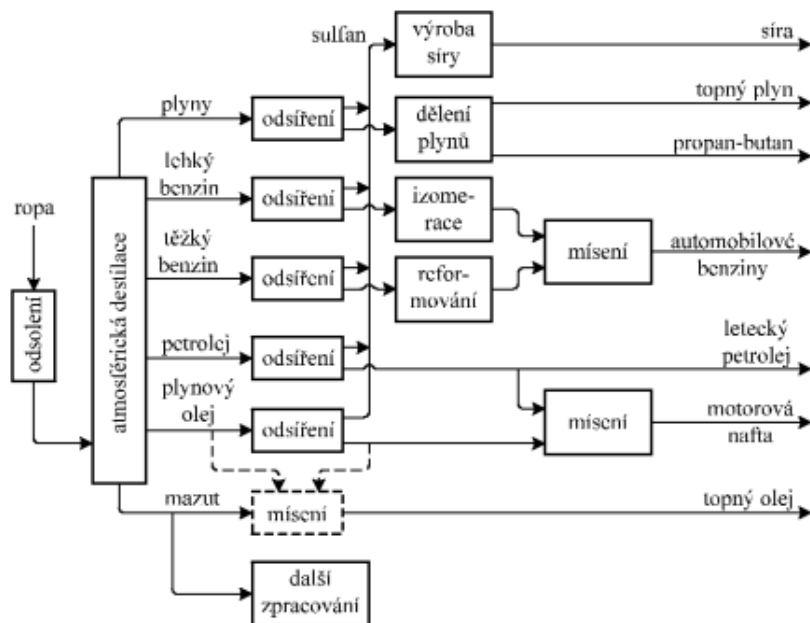
Fosilní kapalná paliva představují klasický zdroj energie v energetice, teplárenství i v dopravě. Jedná se o frakce získané destilací ropy, případně dále upravené, s bodem varu od  $30\text{ }^\circ\text{C}$  do  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . Ropa je olejovitá kapalina tvořená z převážné části uhlovodíky, zastoupeny bývají také sírné, kyslíkaté a dusíkaté sloučeniny. Většina ropy je tvořena kapalnými látkami jako n-alkany, izoalkany, cykloalkany a aromáty (19).

Tomu odpovídá také chemické složení kapalných paliv vyrobených z ropy. U většiny ropných frakcí není možné provést přesný chemický rozbor až na jednotlivé izomery, protože počet izomerů vyšších uhlovodíků je příliš velký.

Zpracování ropy je složitý proces, jehož základní operace jsou odsolení, frakční destilace a odsíření. Základní schéma úpravy ropy je uvedeno na obr. 4.

Atmosférickou destilací se ropa rozdělí na lehčí frakce, které se skládají z nižších uhlovodíků, a těžší frakce, které obsahují většinu vyšších uhlovodíků. Těžší frakce se dále rozdělují vakuovou destilací a část se přepracovává na nižší uhlovodíky pomocí krakování. Fyzikálně chemické vlastnosti uhlovodíků jsou závislé na délce řetězce. Obzvláště patrný je tento trend u alkanů. Vyšší uhlovodíky (větší délka řetězce) mají obvykle větší výhřevnost, větší viskozitu a vyšší charakteristické teploty. (20)

V České republice existují pouze dvě společnosti provozující ropné rafinerie, a to Česká rafinérská, a.s., která má provozy v Kralupech nad Vltavou a v Litvínově a společnost Paramo, a.s., která provozuje rafinerii v Pardubicích. Protože označení některých paliv (zvláště topných olejů) není v literatuře jednoznačné, tato práce se drží označení používaného společnostmi Česká rafinérská a Paramo.



Obr. 4 Blokové schéma obvyklého zpracování frakcí z atmosférické destilace ropy (19)

Jako pohonné hmoty v dopravě se používají produkty z nižších ropných frakcí velké čistoty, doplněné o vhodné aditiva zajišťující mazání motoru, rozpouštění karbonových usazenin a další vhodné vlastnosti. Mezi pohonné hmoty patří automobilové benzíny, letecký benzin, motorová nafta a letecký petrolej. (19) (12)

Paliva pro energetické účely jsou topné oleje (TO). Na tato paliva nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky, co se týče mazacích a rozpouštěcích schopností, a nejsou zde ani tak vysoké nároky na kvalitu. V minulosti patřily topné oleje mezi jeden z nejmasovějších rafinérských produktů, v současné době představuje podíl TO na tuzemském trhu jen cca 10 % objemu motorových paliv. Dle hustoty lze topné oleje rozdělit na extra lehké (TOEL), lehké (LTO) a těžké (TTO) (19). Prakticky se výrobci drží tohoto označení pouze u TOEL, pro ostatní topné oleje používají vlastní obchodní značení. (12) (21) Rozdělení paliv s jejich základní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.

Palivo	Počet uhlíků v molekule	Rozmezí teploty varu [°C]	Hustota při 15 °C [kg/m <sup>3</sup> ]
Automobilový benzin	3-12	30-210	720-775
Letecký benzin	cca 3-12	cca 60-170	690-720
Letecký petrolej	cca 10-25	cca 180-290	775-840
Motorová nafta	12-22	180-370	820-845
TOEL	12 a vyšší	170-370	max. 860
Ostatní TO	12 a vyšší	až 400	max. 990

Tab. 2 Vybrané vlastnosti kapalných fosilních paliv (9), (12)

Požadavky na kvalitu extralehkého topného oleje v současné době nejsou v ČR ukotveny normou a řídí se podnikovými normami jednotlivých výrobců. Přibližné vlastnosti TOEL jsou uvedeny v tab. 3:

Ukazatel	Hodnota	Jednotka
Hustota při 15°C, max.	865	kg/m <sup>3</sup>
Destilační zkouška: - do 250°C předestiluje, max. - do 350 předestiluje, min.	65 85	% (V/V)
Kinematická viskozita (40°C), max.	6	mm <sup>2</sup> /s
Bod vzplanutí (PM), min	56	°C
Bod tekutosti (Pour point), max. - léto - zima	-1 -7	°C
Obsah síry, max.	0,2	% (m/m)
Karbonizační zbytek, max.	0,1	% (m/m)
Obsah mechanických nečistot, max.	0,05	% (m/m)
Obsah vody, max.	0,05	% (m/m)
Obsah popela, max.	0,01	% (m/m)
Výhřevnost (informativní hodnota)	42	MJ/kg

Tab. 3 Vlastnosti TOEL, ELTO (22)

## 4.2 Kapalná biopaliva

Jedná se o spalitelné kapalné produkty vzniklé z rostlinné (výjimečně z živočišné) hmoty. Rostlinná hmota vzniká fotosyntézou, tedy procesem, kdy se mění energie světelného záření na energii chemickou. Fotosyntéza je komplikovaný biochemický proces, jehož celkový průběh lze ale kvantifikovat rovnicí [13]:



Hlavním produktem fotosyntézy je glukóza, ze které se vytváří další biochemické sloučeniny charakteristické pro každou rostlinu. Polymerací glukózy vzniká celulóza  $[C_6H_{10}O_5]_n$ , která je základní stavební látkou buněčných stěn rostlin. U dřevin je většina hmoty tvořena právě celulózou. Kromě celulózy vzniká z glukózy celá řada látek obsažených v rostlinách, které mohou tvořit surovinu pro výrobu kapalných biopaliv (oleje, škroby, cukry apod.).

### 4.2.1 Potenciál kapalných biopaliv na území ČR

V současnosti jsou na území ČR ve větší míře používána pouze paliva na bázi metylesterů mastných kyselin (MEŘO) a bioláh. V rámci snahy o hledání nových energetických zdrojů jsou však zvažována i jiná paliva a nové technologie.

Při posuzování využitelnosti kapalných biopaliv na území ČR je potřeba rozlišovat mezi potenciálem technickým a potenciálem ekonomickým. Zatímco technický potenciál (TP) udává množství energie využitelné dostupnými technologiemi s přihlédnutím k rozloze území a je relativně neměnný, ekonomický potenciál (EP) je pouze ta část TP, která je konkurenceschopná s běžnými technologiemi. Protože se EP často mění v závislosti na ceně konkurenčních zdrojů a také v závislosti na dotačních programech, jeho velikost se stanovuje obtížně a může často kolísat. V této práci bude pojem energetický potenciál vyjadřovat technický energetický potenciál.

Celkový technický potenciál biomasy na území ČR je cca 700 PJ/rok. To by ovšem znamenalo využití veškeré orné půdy pro energetické účely, což není žádoucí, a proto

se odhaduje využitelný energetický potenciál biomasy na 276 PJ/rok, což je cca 24 % celkové spotřeby energie ČR v roce 2008. (8) (23)

Tento celkový potenciál se může různě dělit mezi jednotlivé druhy biopaliv (pevná, kapalná, plynná). Při předpokladu využití 600 tis. ha orné půdy pro výrobu kapalných biopaliv (MEŘO + biolíh) je potenciál těchto paliv 29 PJ/rok. (18)

#### 4.2.2 MEŘO

Metylester řepkového oleje (MEŘO) patří do skupiny metylesterů mastných kyselin (FAME). Vyrábí se reesterifikací řepkového oleje metanolem.

Olejnaté rostliny obsahují tzv. mastné kyseliny, ze kterých se skládají rostlinné oleje, jako např. olej řepkový. Mastných kyselin je celá řada a pro každou plodinu je charakteristické jiné složení oleje. U řepkového oleje je nejvíce zastoupena kyselina olejová (50 – 66 %), jejíž funkční vzorec je  $C_{17}H_{33}COOH$ . Rostlinné oleje se vyznačují poměrně vysokou výhřevností, nemají však nejvhodnější vlastnosti pro spalování (vysoká viskozita), a proto se dále upravují reesterifikací. Hlavním cílem reesterifikace je oddělení glycerinové fáze, jehož důsledkem je významné snížení viskozity paliva. To je důležité při nižších teplotách, kde viskozita oleje dosahuje vysokých hodnot, které by způsobily technologické problémy při atomizaci.

#### Základní vlastnosti MEŘO:

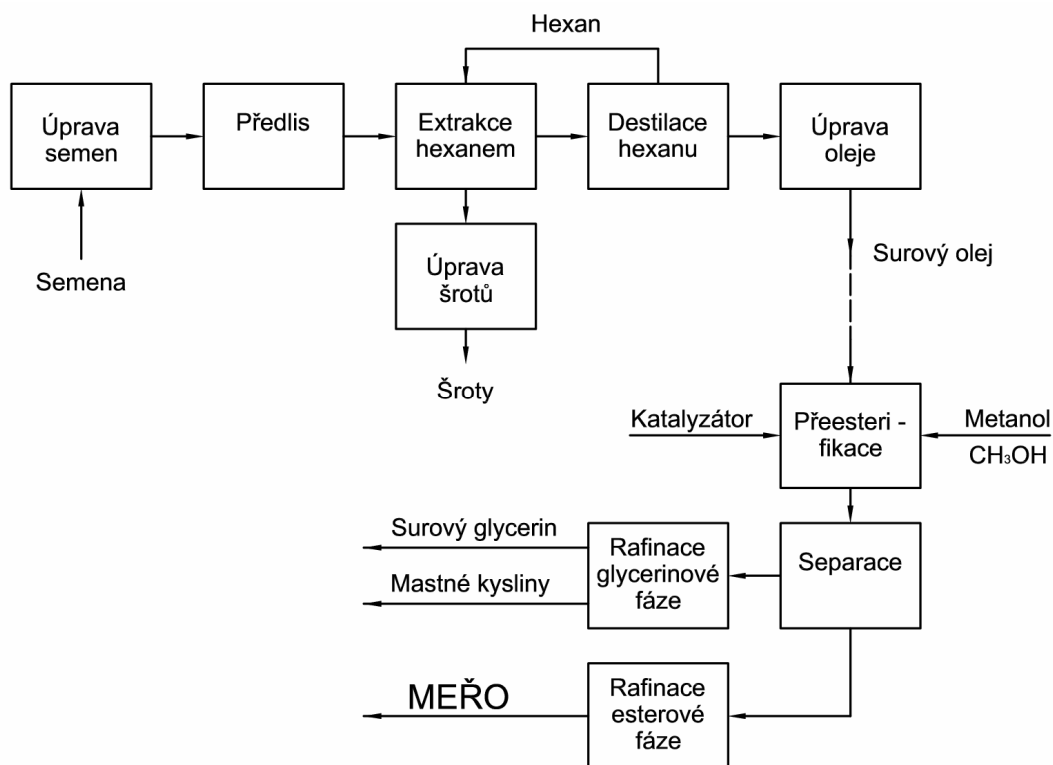
Požadavky na kvalitu MEŘO stanovuje ČSN EN 14 214 (dříve starší ČSN 65 6507). V tab. 4 jsou uvedeny vybrané nejdůležitější vlastnosti. Dodržování předepsaných hodnot by mělo zabránit negativnímu ekologickému dopadu používání paliva a měla by být zajištěna bezproblémová funkce zařízení (většinou spalovací motor) využívající MEŘO.

Ukazatel	Hodnota	Jednotka	Metoda
Obsah esteru, min.	96,5	m/m	ČSN EN 14103
Hustota při 15°C	860-900	kg/m <sup>3</sup>	ČSN EN ISO 3675 EN 14538
Viskozita 40°C	3,5-5,0	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104
Obsah vody, max.	300	mg/kg	ČSN EN ISO 12937
Obsah metanolu, max.	0,2	%m/m	ČSN 14110
Cetanové číslo, min.	51	-	EN ISO 5165
Bod vzplanutí, min.	120	°C	ČSN EN ISO 2719
Filtrovatelnost CFPP, max.			
tř. B	0	°C	ČSN EN 116
tř. D	-10	°C	ČSN EN 116
tř. F	-20	°C	ČSN EN 116
Obsah celkového glycerolu, max.	0,25	% m/m	ČSN EN 14105
Obsah kyseliny linoleové, max.	12	% m/m	ČSN EN 14103
Mechanické nečistoty, max.	24	mg/kg	ČSN 65 6080, ČSN EN 12662
Obsah fosforu, max.	10	mg/kg	ČSN EN 14107
Obsah síry, max.	10	mg/kg	EN ISO 3675

Tab. 4 Požadavky na kvalitu MEŘO dle ČSN EN 14 214

## Výroba MEŘO:

Existuje několik různých variant technologických postupu výroby MEŘO, typický postup je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Schéma výroby MEŘO, sestaveno dle (24)

Na obr. 5 je pro získávání surového oleje použita technologie předlis-extrakce. Vstupní semena jsou po úpravě (vločkování a kondicionace) dávkována do lisu, kde se lisují na obsah oleje 18–20 % a následně extrahují rozpouštědlem (hexanem). Těkavé rozpouštědlo se z oleje odstraní destilací. Regenerované rozpouštědlo je znovu použito pro extrakci. Šrotů po extrakci obsahují 1–2 % oleje, což odpovídá výtěžnosti cca 98 %. Olej je v případě potřeby upraven (filtrací) a poté je čerpán do vlastní linky na výrobu MEŘO. Společně s metanolem a katalyzátorem (kyselina sírová, p-toluensulfonová, katex) je dávkován do reaktoru, kde probíhá esterifikace při teplotě nad 110 °C, za normálního nebo zvýšeného tlaku. Po reakci se směs skládá z glycerinové a esterové fáze, které jsou vzájemně separovatelné. Jako produkt z glycerinové fáze vychází surový glycerin a mastné kyseliny, které jsou pak použity v další výrobě (mýdlo, kosmetika, farmaceutika). Rafinací esterové fáze se získává výsledný produkt MEŘO o požadovaných vlastnostech. (24)

## Výtěžnost MEŘO:

V roce 2009 dosáhla dle údajů Českého statistického úřadu osevní plocha pro řepku hodnoty 355 tis. ha (cca 14 % celkové osevní plochy ČR v 2009) a sklizeno bylo celkem 1128 tis. tun. Tomu odpovídá průměrná výtěžnost v ČR 3,18 tun/ha. Zrna obsahují přibližně 40 % oleje, přičemž výtěžnost oleje je při použití nejlepších technologií až 98 % a účinnost konverze řepkového oleje na MEŘO se pohybuje okolo 97 %. Výtěžnost MEŘO je tedy přibližně 1,2 tun/ha. Využitím údaje o výhřevnosti (cca 38 MJ/kg) lze také vypočítat, že z jednoho hektaru osevní plochy je získáno cca 45,6 GJ energie. (25) (26)



### Energetická bilance MEŘO:

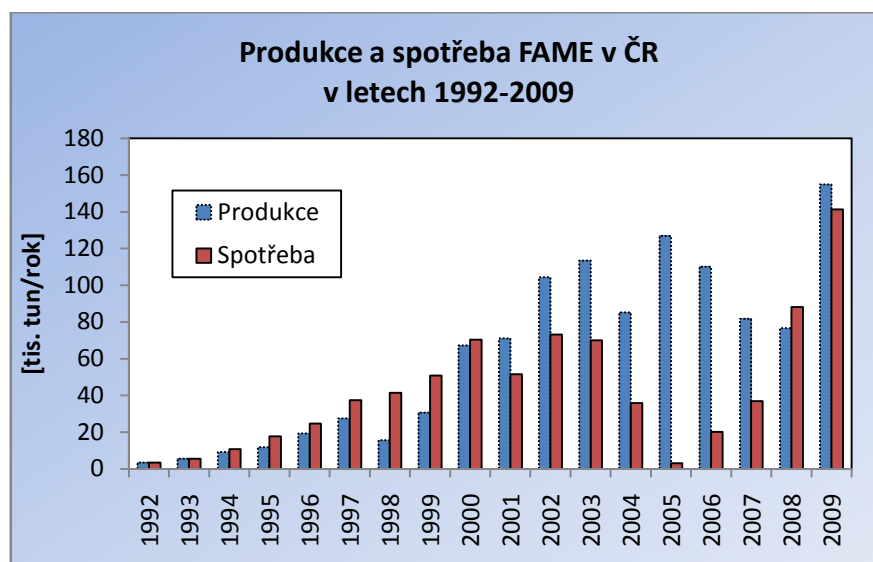
Aby bylo možné posoudit ekologický a potenciálně ekonomický dopad používání biopaliv, je nutné podrobně analyzovat jejich „životní cyklus“ a kvantifikovat množství energie nutné pro jednotlivé fáze získávání paliva. Získání a ověření některých hodnot je problematické (energetická náročnost pěstování suroviny), a proto se výsledky studií poměrně značně liší. Další odchylky způsobuje fakt, že některé studie vyhodnocují jako produkt pouze biopalivo, jiné studie započítávají i vedlejší produkty.

Celková energetická bilance (CEB) výroby biopaliv se vyjadřuje jako poměr vložené energie v „životním cyklu“ paliva a energie obsažené v palivu. Dle různých studií se hodnota CEB pro MEŘO pohybuje od 0,83 do 5,51. Nejčastěji udávané hodnoty se pohybují v rozmezí 2,2–3,0. (27)

### Produkce a spotřeba MEŘO v ČR:

Pojmem FAME (fatty acid methyl ester) se označuje skupina veškerých metylesterů mastných kyselin. V podmínkách ČR tvoří převážnou část této skupiny MEŘO. FAME se v ČR produkuje od roku 1991, viz obr. 6. V roce 1992 byla výroba podpořena státem v rámci tzv. Oleoprogramu, který prosazoval zpracování řepky na motorová paliva. Nastal postupný nárůst produkce a spotřeby FAME. Zpočátku se předpokládalo, že jako alternativní palivo bude u nás používáno čisté FAME resp. MEŘO, později (přibližně od roku 2000) však došlo k jednoznačnému příklonu ke směsným palivům a spotřeba MEŘO byla utlumena.

Další nárůst spotřeby nastal v roce 2007, kdy byly legislativou stanoveny povinné přídavky biosložky do motorových paliv. Od 1. 6. 2010 je povinnost přidávat 6 % FAME do motorové nafty a předpokládá se další zvyšování podílu biosložek v pohonných hmotách.



Obr. 6 Produkce a spotřeba FAME v ČR, 1992-2009, sestaveno dle (28)

### 4.2.3 Biolíh

Biolíh je druhým nejvýznamnějším kapalným biopalivem na území ČR. Jedná se o bezvodý líh (etanol) vyráběný z biomasy. Biolíh je v ČR používán převážně jako příměs

do motorových benzínů (4,1 % bioložky v benzínu, norma EN 228) nebo jako palivo E85, což je směs, kde 70–85 % tvoří etanol a zbytek benzín Natural 95 (ČSN 65 6512).

### Základní vlastnosti Biolihu:

Vlastnosti výsledného paliva jsou ovlivněny poměrem jednotlivých složek (líh, benzín), který se liší u jednotlivých výrobců a také v různých ročních obdobích. Vlastnosti bezvodého lihu jako produktu z lihovaru jsou uvedeny v tab. 5:

Ukazatel	Hodnota	Metoda
Název	Etylalkohol, Etanol, Líh	-
Vzorec	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	-
Rel. molekulová hmotnost	45,0605	-
Koncentrace etanolu před denaturací, min.	99,7 %	ČSN 66 0805
Obsah denaturačního prostředku	2-4 %	-
Obsah vody, max.	0,39 %	ČSN ISO 760, ČSN ISO 13881
Hustota při 20 °C, min.	791 kg/m <sup>3</sup>	ČSN ISO 758, ČSN 66 0805
Kinematická viskozita při 20 °C	cca 1,5 mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104
Výhřevnost	26,9 MJ/kg	-
Teplota vzplanutí	13 °C	-
Meze výbušnosti	3,6-19	-

Tab. 5 Vlastnosti etanolu (29) (9)

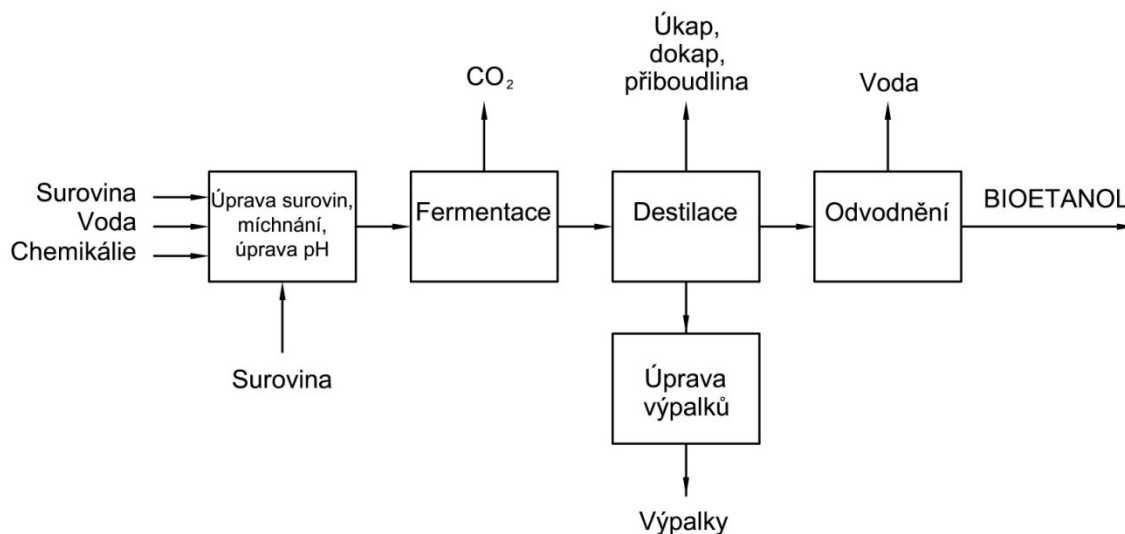
### Výroba biolihu:

Obvykle se biolíh vyrábí fermentací ze škrobnatých surovin (brambory, obilí) nebo cukernatých surovin (cukrová řepa, cukrová třtina). V ČR se většina líhu vyrábí z cukrové řepy, a to buď přímo z cukrové šťávy, nebo z cukrové melasy (lihovary TTD, lihovar Kojetín). Dále se v našich podmínkách jako surovina uplatňuje pšenice a kukuřice (PLP, EthanolEnergy) a triticale (PLP).

Základem technologie výroby biolihu je kvašení (fermentace) a destilace.

Jako surovinu pro etanolové kvašení je možné použít monosacharidy (glukosa, fruktosa atd.) nebo disacharidy (sacharosa, maltosa), které jsou přímo zkvasitelné na etanol. V případě výroby biolihu ze škrobnatých surovin je nutné nejdříve škroby rozštěpit na jednoduché sacharidy a až poté vést surovinu do fermentace. Nejprve je škrob uvolněn a zmazovatěn pomocí hydrolýzy, vlastní štěpení se děje pomocí speciálních enzymových preparátů. Poté již následuje etanolové kvašení jako v případě cukernatých surovin. Produktem z fermentace je zralá zápara. (30)

Zralá zápara obsahuje zhruba 10 % hm. etanolu. Pro separaci etanolu slouží destilace, v průmyslovém měřítku se používá rektifikace. Po rektifikaci destilát obsahuje obvykle okolo 90 – 95 %hm etanolu. Konečné čistoty etanolu přes 99 % se dosahuje v bloku odvodnění obvykle pomocí molekulové filtrace. Blokované schéma výroby biolihu z cukernatých surovin je zobrazeno na obr. 7. (30)



Obr. 7 Schéma výroby biolihu z cukernatých surovin, sestaveno dle (31)

### Výtěžnost Biolihu:

V roce 2009 bylo dle údajů Českého statistického úřadu využito 52,5 tis. ha pro pěstování cukrové řepy pro výrobu biolihu a bylo sklizeno 3038 tis. tun řepy. Průměrná výtěžnost v ČR v roce 2009 tedy dosáhla 58,4 tun/ha. Konverze výroby lihu z řepky je cca 10 %, což je dáno především obsahem lihu ve zralé zápaře před destilací. Výtěžnost biolihu tedy dosahuje hodnot okolo 6 tun/ha. Výhřevnost etanolu je cca 26,9 MJ/kg, a tomu odpovídá energetická výtěžnost 161,4 GJ/ha. (25) (26)

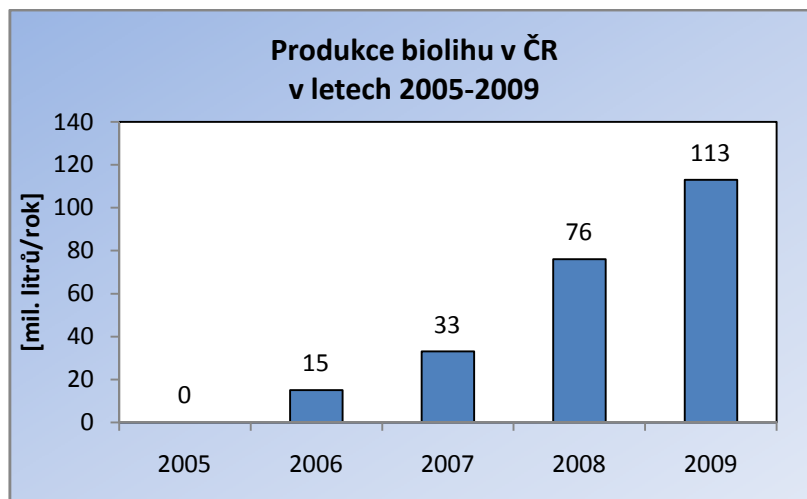
### Energetická bilance biolihu:

Největší položkou v energetických vstupech při produkci bioetanolu je energie nutná pro konverzi surovin na bioetanol, tedy samotná výroba. Zvláště destilace je energeticky velmi náročná, protože je nutné ve vařáku dodat energii nutnou k odpaření etanolu a dalších složek. Dalšími vstupy jsou pak energie nutné pro pěstování a dopravu suroviny (řepy, obilí) a energie nutné pro dopravu bioetanolu.

Energetický výstup tvoří energie obsažená v palivu, která je dána výhřevností. Kvantifikovat poměr energie obsažené v palivu a energie vložené do jeho produkce je vzhledem k počtu faktorů a vstupujících energií obtížné. Výsledkem studií jsou nejčastěji hodnoty od 0,9 do 2, tedy výrazně nižší než u FAME. (27) (32)

### Produkce biolihu v ČR:

Rozvoj produkce bioetanolu, jako motorového paliva nastal až v roce 2006. Od té doby má produkce bioetanolu v ČR trvale stoupající tendenci, stejně jako jeho spotřeba. Ta je podpořena především legislativními kroky, které dávají za povinnost přidávat do automobilových benzínů biosložku. Produkce v roce 2009 dosáhla hodnoty 113.10<sup>6</sup> litrů (viz obr. 8). (33)



Obr. 8 Produkce biolihu v ČR v letech 2005-2009, sestaveno dle (33)

#### 4.2.4 Další využitelná biopaliva

##### Metanol

Metanol je nejjednodušší alkohol, s výhřevností cca 19,5 MJ/kg. Má však řadu negativních vlastností jako toxicitu, nízký bod varu (64,7 °C), nízký bod vzplanutí (8 °C), a proto se v praxi jako palivo nepoužívá.

##### Butanol

Butanol je vyšší alkohol s poměrně vysokou výhřevností (cca 33 MJ/kg). Vyšší výhřevnost by měla umožnit snadnější náhradu automobilových benzínů, než je tomu v případě dnes využívaného bioetanolu. Je zvažován jako potenciálně využitelné kapalné biopalivo vyráběné kvasným procesem podobně jako etanol. Výrobní proces butanolu je zatím stále ve vývoji, ale výsledky experimentů jsou poměrně příznivé a v USA se již předpokládá rozvoj výstavby výroby biobutanolu. (34)

##### Rostlinný olej

Rostlinný olej, zvláště pak použitý fritovací olej z gastronomických provozů, je okrajově používán pro výrobu tepla v kotlích (např. firma Kroll) nebo pro současnou výrobu tepla a elektrické energie, např. kogenerační jednotky firmy Vegawatt.

Jeho cena je nižší než v případě FAME, protože zde odpadá operace reesterifikace. Nevýhoda je vyšší viskozita, zvláště za nízkých teplot, a je tedy zpravidla nutné rostlinný olej před vstupem do spalovacího zařízení předeřhát. Přesto existují projekty, kde je rostlinný olej používán v upravených motorech jako motorové palivo. (35)

##### Vedlejší produkty výroby MEŘO

Základním vedlejším produktem při výrobě MEŘO je glycerinová fáze, která obsahuje především glycerin a metanol. Výhřevnost neupravené glycerinové fáze je 20 MJ/kg. (36)

Z glycerinové fáze se následně vyrábí glycerin, který je dále využíván ve výrobě farmaceutických a kosmetických produktů. Čistý glycerin má výhřevnost zhruba 16 MJ/kg, má však velmi vysokou viskozitu a také vysoký bod vzplanutí (viz tab. 1), proto je jeho

spalování technicky obtížné. V současné době není glycerín na trhu přebytkovou komoditou, a proto není spalování ani ekonomicky rentabilní. (37)

### **Vedlejší produkty výroby biolihu**

Vedlejší produkty, které mají dostatečnou výhřevnost a byly by potenciálně použitelné jako palivo, jsou vedlejší frakce z destilace. Jedná se o frakce s nižším bodem varu (úkap) a vyšším bodem varu (dokap, přiboudlina) než etanol. Tyto frakce se běžně používají pro výrobu technického lihu (čistidla, nemrznoucí směsi). Výhřevnost a spalovací vlastnosti těchto frakcí jsou podobné jako u biolihu, jejich produkce je však malá, tvoří řádově procenta z produkce etanolu.

Přiboudlina se vyznačuje silnou nepříjemnou vůní, což komplikuje její použití. Ve většině případů je likvidována jako odpad na ČOV, v některých případech je použita pro výrobu chemikálií (pentanol, propanol, isobutanol). (38)

### **Syntetická kapalná paliva**

Ze syntézního plynu (směs  $H_2$  a  $CO$ ) lze pomocí Fischer-Tropsovy syntézy vyrobit kapalné uhlovodíky. Pomocí tohoto procesu byla za druhé světové války v Německu vyráběna náhrada ropy, poté byla však výroba zrušena jako ekonomicky nevýhodná. Jako surovina pro výrobu syntézních plynů klasicky slouží uhlí, je však možné je vyrobit také zplyňováním biomasy, například dřevní hmoty nebo slámy. (39) Jednotky na výrobu syntézního plynu z biomasy nabízí např. firma Choren. (40)

### **Odpady**

Mezi kapalné odpady produkované z biomasy a použitelné pro energetické účely se řadí především různé druhy použitých čistících kapalin na bázi lihu. Jejich produkce je však malá a z globálního pohledu nemá žádný zásadní význam.

## 5 KONSTRUKCE HOŘÁKŮ

Hořák je zařízení, které zajišťuje přeměnu chemicky vázané energie paliva na energii tepelnou. Používá se pro výrobu tepla především v procesních pecích a v teplovodních a parních kotlích. Hořák musí splňovat tyto základní požadavky:

1. Musí zajišťovat řízené směšování reakčních složek – paliva a oksličovadla.
2. Musí zajišťovat stabilní a trvalý zdroj hoření.
3. Musí udržovat plamen v požadované oblasti a měl by být schopen udržovat požadovaný tvar plamene.

U historicky častějších vsádkových procesů nebyla potřeba řízení přesného spalovacího výkonu a tvaru plamene kritická, avšak u dnešních trubkových pecí s kontinuálním tokem je přesné řízení nezbytné pro správnou funkci procesu. Nedodržení stanovených podmínek může znamenat snížení účinnosti procesu, poškození produktu nebo dokonce poškození procesního zařízení. Proto je na správnou konstrukci hořáků a jejich bezproblémovou funkci kladen velký důraz. (41)

### 5.1 Základní rozdělení hořáků

Existuje celá řada konstrukčních variant průmyslových hořáků a lze je rozdělit dle různých kritérií. Základní hlediska dělení hořáků jsou:

- 1. Dle použitého paliva na**
  - a) Plynné palivo
  - b) Kapalné palivo
  - c) Pevná paliva
  - d) Kombinované (olejo-plynové, pevné + kapalné...) palivo
- 2. Dle přívodu spalovacího vzduchu**
  - a) Hořáky s přirozeným přívodem spalovacího vzduchu
  - b) Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu
- 3. Dle tlaku ve spalovací komoře**
  - a) Hořáky do podtlaku
  - b) Hořáky do přetlaku (blokované hořáky)
- 4. Dle tvaru plamene**
  - a) Hořáky s kruhovým plamenem
  - b) Hořáky s plochým plamenem
  - c) Speciální hořáky
- 5. Dle mísení paliva se vzduchem**
  - a) Hořáky s předmísením (ejekční hořáky)
  - b) Hořáky s mísením ve spalovací komoře
  - c) Hořáky se stupňovitým přívodem paliva/vzduchu

## 6. Dle viskozity kapalného paliva

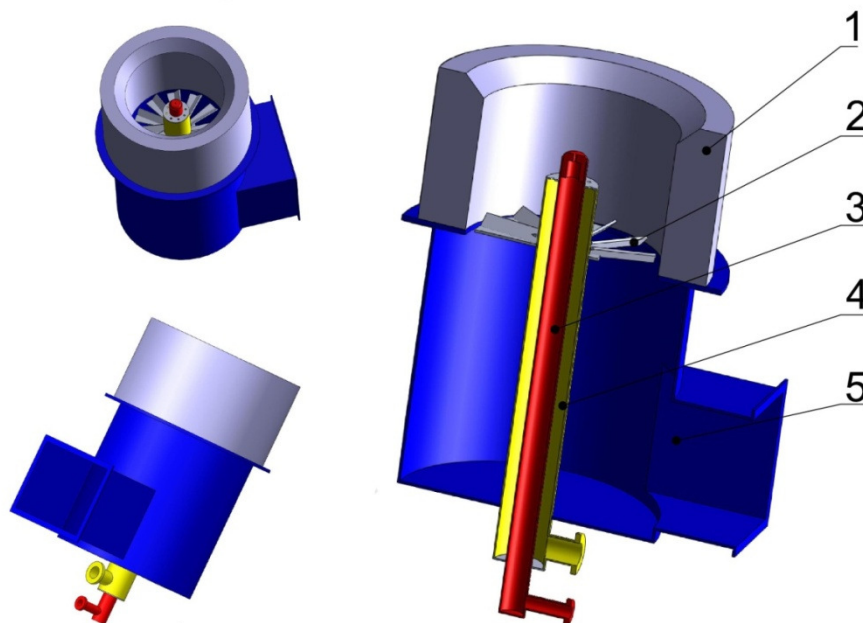
- a) Hořáky na těžké topné oleje (vyšší teplota paliva)
- b) Hořáky na lehké topné oleje

## 7. Dle způsobu atomizace (podrobněji v kapitole 5.7)

- a) Tlaková atomizace
- b) Dvoumediová atomizace
- c) Mechanická a jiná atomizace

## 5.2 Základní části hořáku

Hořák je poměrně komplikované zařízení vyráběné v mnoha konstrukčních variantách podle požadavků konkrétní aplikace. Obr. 9 ukazuje základní konstrukční části dvoupalivového průmyslového hořáku s jednostupňovým přívodem spalovacího vzduchu a paliva.



Obr. 9 Zjednodušený model dvoupalivového výkonového hořáku,  
1. Hořáková tvarovka, 2. Vříč vzduchu, 3. Olejový hořák s tlakovým rozprašováním, 4. Plynový hořák, 5. Vzduchová skříň s napojením na vzduchový kanál

### Hořáková tvarovka

Hořáková tvarovka je výstupní částí hořáku, která slouží k usměrnění proudu reagující směsi a vytvoření požadovaného tvaru plamene. Vyrábí se obvykle z žáruvzdorných keramických materiálů.

### Vříč vzduchu

Spalovací vzduch proudící přes vříč je roztočen vlivem natočení lopatek vříče. Tím je zvýšena relativní rychlost mezi spalovacím vzduchem a palivem, což má pozitivní vliv na promíchání obou složek, zvýšení turbulence ve výstupní části a rychlejší a kvalitnější spalování reakční směsi.

## Olejový a plynový hořák

Výkonový hořák se může skládat z plynové nebo olejové části, případně může být konstruován jako hořák dvoupalivový. Plynová část je tvořena přírodním potrubím a plynovými tryskami. Olejová část je obvykle konstruována jako samostatně vyjímatelná, aby byla umožněna její kontrola a čištění. Jednotlivé principy atomizérů olejových hořáků jsou podrobněji popsány v kapitole 6 Atomizace.

## Vzduchová skříň

Vzduchová skříň je obvykle konstruována jako tenkostěnné plechové těleso, které umožňuje přívod spalovacího vzduchu do oblasti spalování. Vzduchová skříň je zpravidla opatřena izolací, která zajistí nízkou povrchovou teplotu hořáku i v případě použití přehřátého vzduchu. Slouží také jako tlumič hluku vzniklého vibracemi od proudění vzduchu. V místě napojení vzduchové skříně na vzduchový kanál je obvykle instalována klapka umožňující individuální řízení průtoku spalovacího vzduchu do každého hořáku.

## 5.3 Konstrukce hořáků dle použitého paliva

Konstrukčně nejjednodušší jsou hořáky na plynná paliva, kde hořák musí zajistit především smíchání paliva s okysličovadlem a vytvoření plamene požadovaného tvaru.

Výrazně komplikovanější je konstrukce hořáků na kapalná paliva, kde je nutné nejprve zajistit odpaření paliva do plynné fáze, ve které probíhá samotná oxidační reakce (hoření). Ve většině případů je kapalné palivo rozprášeno na drobné kapičky pomocí atomizéru, výjimečně se používají odpařovací hořáky bez atomizace. Rozprášené palivo se díky velkému relativnímu povrchu poměrně rychle odpaří. Problematika atomizérů je podrobněji popsána v kapitole 6 Atomizace.

Hořáky mohou být také konstruovány jako kombinované olejo-plynové, skládající se z plynové a olejové části (41).

Další skupinou jsou práškové hořáky na pevná paliva. Tyto pracují s palivem namletým na jemný prášek, které je pneumaticky dopravováno do hořáku. Hořák musí zajistit smíšení práškového paliva se vzduchem a tím dokonalé shoření paliva. Často jsou také konstruovány jako kombinované hořáky na pevné a kapalné, případně plynné palivo. Tyto hořáky se používají zejména u velkých teplotěnských a energetických kotlů. (42)

## 5.4 Přirozený a nucený přívod okysličovadla

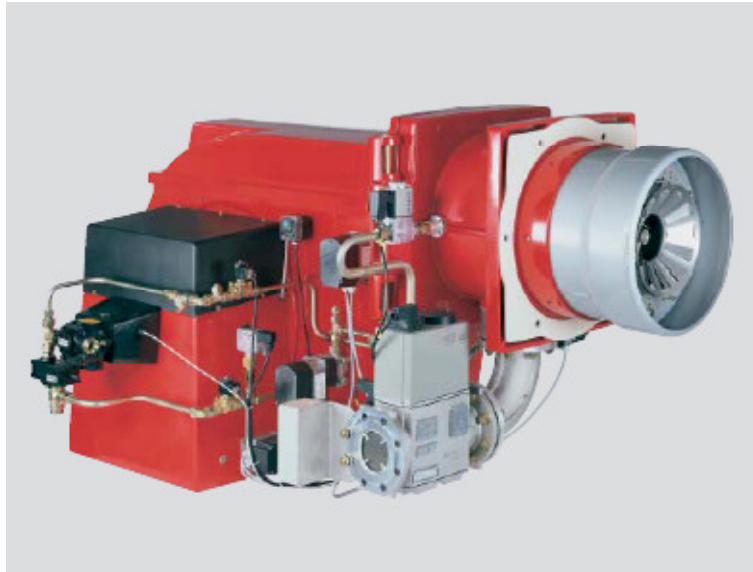
Některé hořáky v petrochemických procesech pracují s přirozeným přívodem vzduchu, který je způsoben pouze podtlakem v peci. V místě hořáku je velikost podtlaku obvykle menší než 250 Pa (cca 25 mm vodního sloupce). Průtočné průřezy spalovacího vzduchu musí být navrženy tak, aby při daném tlakovém rozdílu mezi pecí a okolím dodával hořák odpovídající množství vzduchu pro spalování. Výhodou je jednoduchá konstrukce, nevýhodou je obtížná regulace přívodu spalovacího vzduchu, nemožnost použití jiného okysličovadla než okolního vzduchu a problémy s promísením paliva a spalovacího vzduchu vlivem malé rychlosti proudění. (41)

Běžnější je nucený přívod spalovacího vzduchu, kde je vzduch, případně jiné okysličovadlo dodáváno pomocí přetlaku před hořákem, přičemž ve spalovací komoře může být jak podtlak (typické pro výkonové hořáky), tak i přetlak (blokované hořáky). Ventilátor, který poskytuje potřebný tlak, může být přímo součástí hořáku, jako je tomu u blokových



hořáků, nebo může být celá skupina hořáků napojena na společný přívod vzduchu, což je obvyklé u velkých zařízení pracujících s několika hořáky (výkonové hořáky). Přetlak vzduchu před hořákem se obvykle pohybuje v rozmezí 1000–250 Pa (cca 100–250 mm vodního sloupce). (41)

Výhodou nuceného přívodu vzduchu je možnost použití různých medií jako oksylichovadla, např. predehřátého vzduchu nebo výfukových plynů z plynové turbíny. Přetlak spalovacího vzduchu před hořákem umožňuje přesné řízení množství spalovacího vzduchu a také lepší vytvoření turbulentního proudění, a tím lepší promíchání paliva s oksylichovadlem. (41)



Obr. 10 Dvoupalivový blokový hořák Weishaupt RGL70/2A ([www.weishaupt.de](http://www.weishaupt.de))



Obr. 11 Kombinovaný výkonový hořák VUCHZ HPN-Te5K ([www.vuchz.cz](http://www.vuchz.cz))

## 5.5 Velikost a tvar plamene

Moderní zařízení využívající průmyslové hořáky mají přísné nároky na velikost, tvar a rozložení plamene, aby byla zajištěna co nejvyšší účinnost přestupu tepla do procesního média. Zároveň tepelné zatížení teplosměnného povrchu nesmí překročit určitou hodnotu, aby nedošlo k tepelnému poškození materiálu. U zařízení na zpracování uhlovodíků kladou

na rozložení teplot ve spalovací komoře obzvláště přísné požadavky, aby nedošlo k termické degradaci uhlovodíků v oblastech s lokálně vyšší teplotou. (41)

Základními požadovanými parametry jsou délka a průměr plamene. Tyto parametry lze ovlivnit především způsobem přívodu primárního/sekundárního vzduchu, směrem výstupních trysek paliva do spalovací komory, jejich vzájemnou polohou a orientací se směrem vstupu vzduchu. Rozměry plamene jsou také významně závislé na průřezu a geometrii hořákové tvarovky (kamene). Lze je také ovlivnit pomocí tzv. poutače plamene nebo vířiče, které způsobují změnu proudění v hořáku. (41)

Tvar (a velikost) plamene je výsledkem složité geometrie hořáku a dynamiky proudění tekutin (medií) v hořáku, proto je velmi obtížné stanovit tvar teoretickým výpočtem a vždy je nutné ověřit výsledné parametry plamene na zkušebním zařízení.

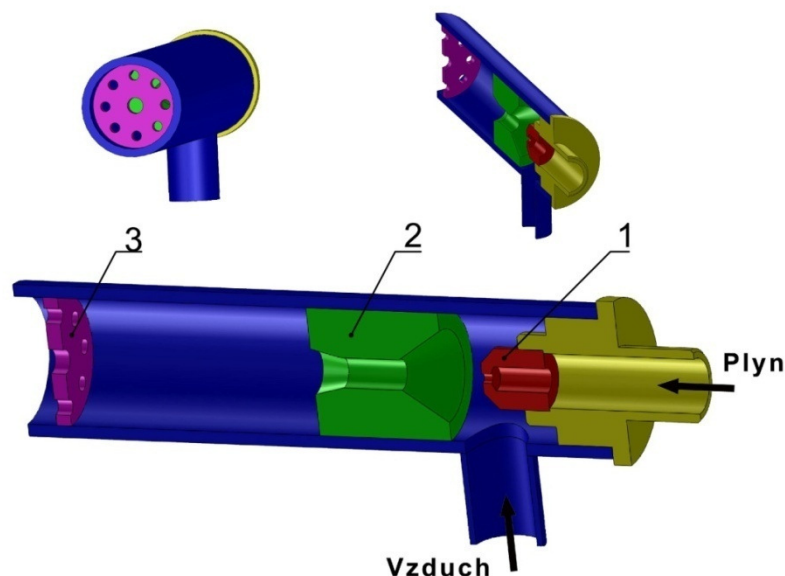
## 5.6 Mísení paliva se vzduchem

Podle způsobu mísení paliva se spalovacím vzduchem se hořáky dělí na ejekční, kde dochází k tvorbě hořlavé směsi uvnitř hořáku a difuzní, kde ke smísení paliva se vzduchem dochází až ve spalovacím prostoru.

### 5.6.1 Ejekční hořáky

Jedná se o hořáky, u nichž je spalovací vzduch přisáván do směšovače ejekčním účinkem proudu paliva vytékajícího velkou rychlostí z trysky.

Principu ejekčního přisávání a mísení se většinou využívá u hořáků menších výkonů, zvláště pak stabilizačních hořáků. Model na obr. 12 znázorňuje princip funkce ejekčního hořáku. Palivo proudící zúženou tryskou (1) strhává okolní vzduch, čímž dojde k tvorbě směsi. Ejekční účinek je podpořen směšovačem (2), který ve zúžené části vlivem vyšší rychlosti vytváří mírný podtlak, který umocňuje přisávání vzduchu. Vestavba (3) lokálně zvyšuje rychlost hořlavé směsi.



Obr. 12 Zjednodušený model ejekčního hořáku

Rychlost vytvořené směsi v hořáku za ejektorem musí být větší než rychlost hoření, jinak by mohlo dojít k prošlehnutí plamene do hořáku, což může způsobit poškození vnitřních částí vysokou teplotou. Z tohoto důvodu se do proudu reakční směsi instalují vestavby, které lokálně zmenší průtočný průřez, tím zvýší rychlost proudění a zabrání tak zpětnému prošlehnutí.

Základní výhodou ejekčních hořáků je, že zde není nutné zařízení pro dopravu vzduchu (ventilátor). Jako okysličovadlo může být u tohoto typu hořáku využit výhradně okolní vzduch, odpadá tedy možnost využití předehřátého vzduchu apod. Další výhodou je, že množství přísávaného vzduchu je funkcí průtoku plynu, a tedy s větším průtokem hnaného media (paliva) se zvýší také průtok hnaného media (vzduchu), a tak není nutný regulační mechanismus průtoku vzduchu v závislosti na průtoku paliva. Protože do zóny hoření je dopravována směs paliva se vzduchem, je objem plamene menší než v případě hořáků, kde mísení probíhá až ve spalovací komoře. (41)

### 5.6.2 Difuzní hořáky

Většina průmyslových hořáků využívá odděleného vedení paliva a spalovacího vzduchu do zóny hoření. Mísení paliva a okysličovadla probíhá přímo ve spalovací komoře. Protože ke styku paliva s kyslíkem dochází až v zóně hoření, není zde možnost prošlehnutí plamene do hořáku. Proto hořák umožňuje přechod na palivo o jiném složení bez nutnosti konstrukčních úprav. To je obzvláště důležité u paliv obsahujících vodík, který významně zvyšuje rychlost hoření.

Naopak zde hrozí riziko utržení plamene vlivem příliš malé rychlosti hoření a velké rychlosti proudění hořlavé směsi. Z tohoto důvodu se do oblasti na začátku plamene instalují vířiče nebo poutače plamene, které způsobí vytvoření vírů, ve kterých je vlivem turbulence složka rychlosti ve směru z hořáku malá, nebo dokonce nulová. Dojde tak ke stabilizaci plamene a udržení začátku zóny hoření v požadovaném místě.

U hořáků s odděleným přívodem paliva a okysličovadla je nutné s každou změnou výkonu hořáku (změna průtoku paliva) přizpůsobit také množství spalovacího vzduchu. To se obvykle děje pomocí klapky ve vzduchovém kanálu spalovacího vzduchu nebo pomocí změny otáček ventilátoru spalovacího vzduchu.

Aby bylo zajištěno dokonalé smíchání paliva se spalovacím vzduchem, je často palivo přiváděno ve více místech (stupních). Při zachování celkového průtočného průřezu trysek, je nutné použít trysky malých průměrů, což může v případě znečištěných paliv způsobit problémy s ucpáváním. (41)

## 5.7 Spalovací podmínky a emise

Mezi nejdůležitější emise produkované při spalování kapalných paliv v hořácích patří:

- oxid uhličitý  $\text{CO}_2$
- oxid uhelnatý  $\text{CO}$
- oxidy dusíku  $\text{NO}_x$
- uhlovodíky  $\text{C}_x\text{H}_y$

### 5.7.1 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je produkt dokonalého spalování (viz rovnici [1]), a jeho emise jsou dány materiálovou bilancí spalování, závisí tedy pouze na složení paliva. Spálením 1 kg čistého

uhlíku vzniká přibližně 3,7 kg CO<sub>2</sub>. Paliva s vyšším poměrem C/H produkují více oxidu uhličitého a paliva s větším obsahem vodíku (etanol) naopak produkují více vodní páry a méně oxidu uhličitého.

Existují projekty, které počítají s odstraňováním CO<sub>2</sub> ze spalin (tzv. dekarbonizace spalin), např. absorpce vypírkou spalin, adsorpce na minerální sorbenty, použití selektivně propustných membrán a podobně. Dosud jde však převážně o znalost principů s nedostatkem detailních znalostí pro praktické použití, a proto nejsou průmyslově využívány (3).

### 5.7.2 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý je toxický plyn vznikající při nedokonalém spalování, které je způsobeno nedostatkem kyslíku pro reakci (nedostatek vzduchu, nedokonalé promíchání paliva a oksyličovadla). Při oxidaci uhlíku na oxid uhelnatý zůstává nevyužita přibližně třetina tepla obsaženého v palivu, protože oxid uhelnatý má výhřevnost cca 10 MJ/kg (9). Hořáky s větší tlakovou ztrátou na straně vzduchu (nucený přívod spalovacího vzduchu) obvykle produkují menší množství emisí CO, protože zde dochází k dokonalejšímu promíchání. (41)

Přítomnost nenasycených uhlovodíků (násobná vazba mezi atomy) může vést k pyrolýzním a polymerizačním reakcím, které zvyšují pravděpodobnost tvorby CO (41).

Pokud jsou dodrženy základní podmínky provozu hořáku, zejména koncentrace kyslíku v suchých spalinách alespoň 2–5 % (u kapalných a plynných paliv) a dostatečná teplota ve spalovací komoře (nad 600 °C), pak je zpravidla produkce CO v přijatelných mezích. (16)

### 5.7.3 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku se podílí na vzniku kyselých dešťů a také na tvorbě přízemního ozónu, který působí negativně na respirační systém. Proto jsou přípustné koncentrace dusíku ve spalinách velmi nízké. Prakticky se tvoří celá řada různých NO<sub>x</sub>, největší zastoupení má však NO a NO<sub>2</sub>. Celkové množství NO<sub>x</sub> se většinou udává jako NO<sub>2</sub> ekvivalent. Tvorba NO<sub>x</sub> u průmyslových hořáků se pohybuje typicky kolem 100 až 200 ppm, ale existují low-NO<sub>x</sub> hořáky, které dosahují hodnot řádově v desítkách ppm.

Rozeznáváme tři druhy NO<sub>x</sub>, které se liší dle mechanismu jejich tvorby. Jsou to termické, palivové a promptní NO<sub>x</sub>. U hořáků na kapalná paliva jsou nejvýznamnější termické NO<sub>x</sub>.

#### Termické NO<sub>x</sub>

Termické NO<sub>x</sub> vznikají v oblastech s vysokou teplotou reakcí kyslíku se vzdušným dusíkem. Mechanismus tvorby zahrnuje několik kroků, celkový efekt lze zjednodušeně vyjádřit rovnicí:

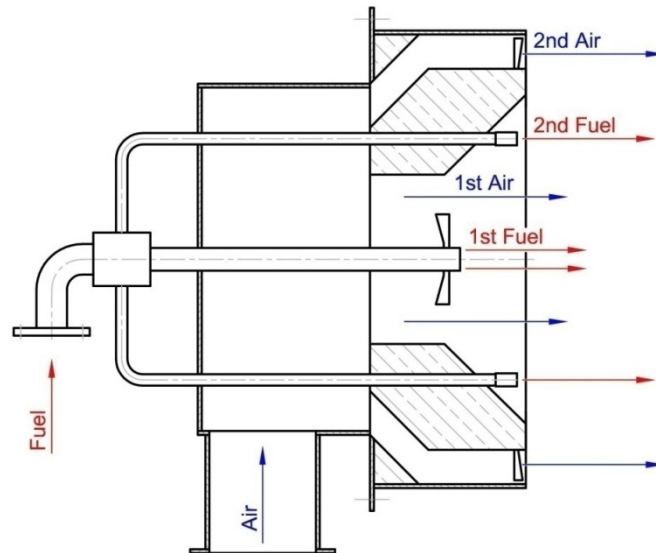


Tato chemická reakce vyžaduje pro svůj průběh vysoké teploty, zejména pro rozpojení trojných vazeb u N<sub>2</sub>. Je dokázáno, že intenzita tvorby NO<sub>x</sub> závisí velmi silně na teplotě a obsahu kyslíku v daném místě plamene a také na čase. Existují tedy tři základní způsoby redukce oxidů dusíku:

1. Snížení nejvyšší teploty plamene.
2. Snížení koncentrace kyslíku v oblasti hoření.
3. Snížení doby průchodu reakční směsi oblastí s vysokou teplotou.

Tato opatření se realizují pomocí vhodně navrženého stupňovitého přívodu paliva, příp. vzduchu tak, aby v místech s vysokou teplotou plamene nebyl přebytek kyslíku a naopak v místě dohořívání s vyšší koncentrací kyslíku byla již teplota plamene nižší. Toto řešení je zobrazeno na obr. 13. (41)

V některých případech se také využívá vnitřní recirkulace spalin, čímž se sníží obsah kyslíku v oblasti hoření a tím také maximální teplota plamene. (16)



Obr. 13 Schéma hořáku se stupňovitým přívodem paliva a spalovacího vzduchu  
 Fuel – přívod paliva, Air – přívod vzduchu, 1st Fuel – primární palivo, 2nd Fuel – sekundární palivo, 1st Air -  
 primární vzduch, 2nd Air – sekundární vzduch

### Palivové NO<sub>x</sub>

Pokud je dusík obsažen v palivu, může se také podílet na tvorbě NO<sub>x</sub>. Dusík však musí být součástí molekul paliva, protože molekulární dusík (N<sub>2</sub>), obsažený v palivu se na tvorbě NO<sub>x</sub> nepodílí. Tvorba palivových NO<sub>x</sub> probíhá ve dvou krocích. Nejprve probíhá pyrolytický rozklad molekul na volné radikály, které poté reagují s kyslíkem na oxid dusnatý, dle rovnic 16 a 17. (41)



### Promptní NO<sub>x</sub>

Mechanismus vzniku promptních NO<sub>x</sub> je podobný jako u palivových NO<sub>x</sub> s tím rozdílem, že dusík pochází z molekulárního kyslíku ve spalovacím vzduchu. Zde dochází k tvorbě volných radikálů dle rovnice 18 a následné tvorbě NO dle rovnice 17.



Aby mohlo dojít k této reakci, musí být porušena trojná vazba u molekulárního dusíku, což je energeticky velmi náročné, a proto se mechanismus tvorby promptních  $\text{NO}_x$  uplatňuje pouze okrajově (do 20 ppm  $\text{NO}_x$ ). (41)

#### **5.7.4 Nespálené uhlovodíky**

Pokud atomizér nerozprašuje kapalné palivo na dostatečně malé kapky, může dojít k tomu, že se kapičky paliva nestačí odpařit a následně shořet. K jejich odpaření pak dojde až v oblasti s příliš nízkou teplotou pro zapálení nebo se neodpaří vůbec a v kapalném stavu dopadají na stěny spalovací komory. Nedopal způsobuje jak nežádoucí emise uhlovodíků, tak snížení tepelné účinnosti vlivem nevyužité výhřevnosti nespálených uhlovodíků. Při úniku kapiček paliva může také docházet k vytváření nežádoucích nánosů na teplosměnných plochách, a tím k dalšímu snížení tepelné účinnosti zařízení.

Prakticky se emise uhlovodíků neměří, protože při nedokonalém spalování vzniká vždy CO (viz kapitola 3.6.1). Pokud jsou emise CO v dovolených mezích, pak nevznikají ve větší míře ani emise uhlovodíků. Během hoření se však pozoruje, zda ve spalovací komoře nedochází k úletu neodpařených kapek paliva. (41)

## 6 ATOMIZACE

Atomizér je zásadní část hořáků na kapalná paliva, protože na kvalitním rozprášení kapaliny závisí do velké míry kvalita celého spalovacího procesu. Konstrukce atomizérů u průmyslových hořáků je často poměrně složitá, je výsledkem systematického výzkumu a předmětem firemního know-how. Zakládá se však na řadě základních fyzikálních principů a vychází z některých závislostí, které budou uvedeny v následující kapitole.

### 6.1 Vlastnosti kapalin ovlivňující průběh atomizace

Existují tři důležité fyzikálně-chemické charakteristiky kapaliny, které mají významný vliv na proces atomizace. Je to hustota, viskozita a povrchové napětí kapaliny.

#### 6.1.1 Hustota kapaliny

Hustota homogenní kapaliny je definována jako poměr hmotnosti a objemu elementu kapaliny za konkrétních podmínek (teplota, tlak) dle rovnice [18]:

$$\rho = \frac{m}{V_m}, \quad [18]$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m$  je hmotnost elementu kapaliny [kg] a  $V_m$  je objem elementu kapaliny [ $\text{m}^3$ ]. (43)

Hustota kapaliny je obvykle silně závislá na teplotě. Pokud uvažujeme v daném teplotním intervalu objemovou roztažnost kapaliny za konstantní, lze tuto závislost vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)}, \quad [19]$$

kde  $\rho_{1,2}$  je hustota kapaliny ve stavu 1 resp. 2 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\alpha$  je koeficient objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ] a  $T_1$  a  $T_2$  jsou teploty ve stavu 1 resp. 2 [K, °C]. (43)

Z uvedeného vztahu je patrné, že hustota kapaliny se snižuje při zvýšení teploty a má lineární charakter. Toho lze využít při odhadu hustoty kapalin při teplotách, pro které nejsou dostupná naměřená nebo tabelovaná data.

Hustota kapaliny je také závislá na tlaku, avšak tato závislost je poměrně slabá a významně se projeví až při tlacích v řádu několik desítek MPa. Pro praktické výpočty v oblasti atomizace kapalných paliv lze tuto závislost zanedbat. (43)

Kapaliny s vyšší hustotou mají vyšší kinetickou energii, proto vytváří menší kapky. Hustota má tedy pozitivní vliv na kvalitu atomizace, nicméně praktický vliv hustoty na kvalitu atomizace je nevýznamný, protože rozdíly v hustotách rozprašovaných kapalin jsou většinou poměrně malé. (43)

## 6.1.2 Viskozita

Viskozita je fyzikální veličina, která udává vztah úměrnosti mezi tečným napětím a gradientem rychlosti. Viskozita charakterizuje vnitřní tření v kapalině, resp. její odpor proti tečení. Z hlediska spalování je důležitou veličinou, na které závisí účinnost rozprašování kapalného biopaliva.

Viskozitu lze definovat pro „newtonské kapaliny“, kde napětí je přímo úměrné gradientu rychlosti (Newtonův zákon viskozity):

$$\tau_N = \eta \cdot \frac{du}{dy}, \quad [20]$$

kde  $\tau_N$  je tečné napětí [Pa],  $\eta$  je dynamická viskozita [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ] a  $\frac{du}{dy}$  je gradient rychlosti [ $\text{s}^{-1}$ ].

V praxi se často používá kinematická viskozita, která je definována jako:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad [21]$$

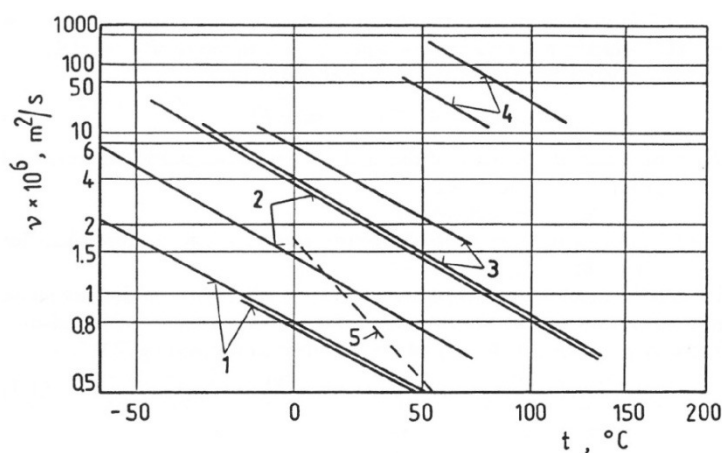
kde  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\eta$  je dynamická viskozita [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ] a  $\rho$  je hustota kapaliny [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Viskozita kapalných paliv je obvykle značně závislá na teplotě. Pro ropné frakce (fosilní kapalná paliva) lze tuto závislost vyjádřit pomocí Waltherovy funkce:

$$\log[\log(\nu + C)] = A + B \cdot \log T, \quad [22]$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita,  $T$  je teplota a A, B, C jsou konstanty.

Obvyklé je také grafické znázornění závislosti viskozity na teplotě pomocí log-log grafu, kde závislosti jednotlivých paliv mají lineární průběh.



Obr. 14 Závislost viskozity kapalin na teplotě.  
1. Benzín, 2. Petrolej, 3. Nafta, 4. Topný olej, 5. Voda (43)



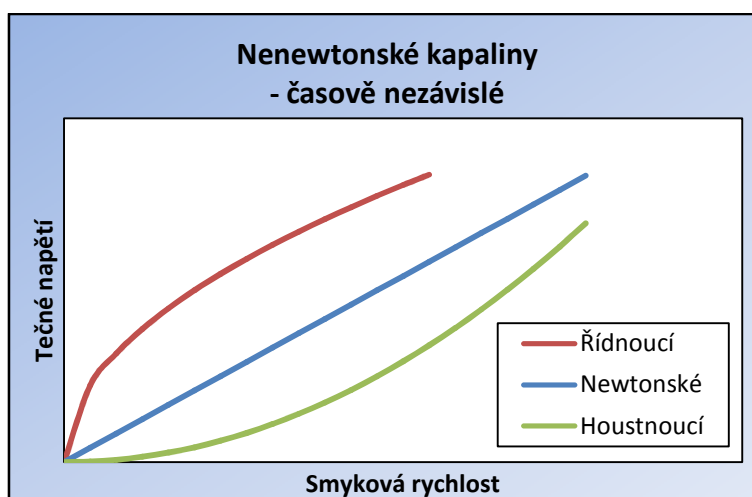
Kapaliny s vyšší viskozitou vytvářejí při atomizaci větší kapky, čili vyšší viskozita má negativní vliv na kvalitu atomizace. U nízkoviskozních kapalin je závislost méně patrná, u kapalin s vyšší viskozitou se její význam prudce zvyšuje. U vyšších olejových frakcí, které se vyznačují viskozitou nad 10 cSt při 20 °C (orientační údaj závislý na konstrukci hořáku) je nutné pro zajištění kvalitní atomizace kapalinu ohřát a dosáhnou tak nižší viskozity. (43)

### 6.1.3 Viskozita neneutonských kapalin

V praxi se často setkáváme s kapalinami, které Newtonově rovnici nevyhovují. Tyto kapaliny označujeme jako neneutonské. U neneutonských kapalin je vztah mezi stavem napjatosti a stavem deformace složitější, viskozita je závislá nejen na gradientu rychlosti, ale také na jiných veličinách. Problematika neneutonských kapalin je značně rozsáhlá, proto budou v této kapitole popsány pouze některé modely důležité s ohledem na řešenou problematiku. (44)

#### Neneutonské kapaliny časově nezávislé

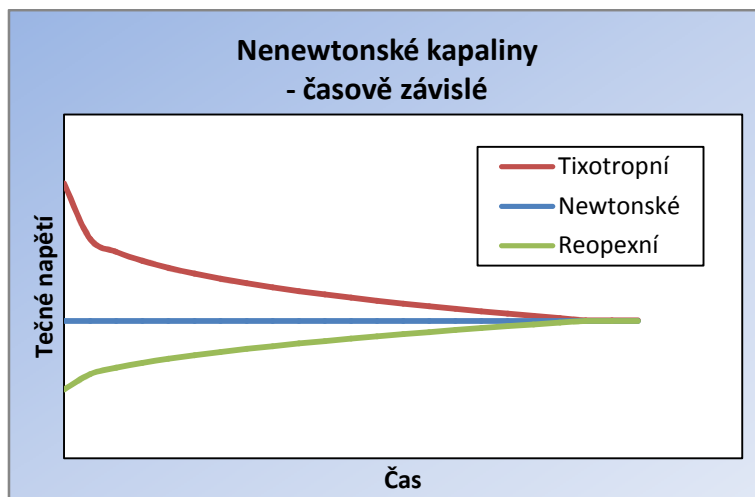
U těchto kapalin není smykové napětí závislé na čase a je tedy (při konstantní teplotě) pouze funkcí smykové rychlosti. Tato závislost však není lineární, ale může být jak progresivní (houstnoucí kapalina) tak degenerativní (řidnoucí kapalina). (44)



Obr. 15 Časově nezávislé neneutonské kapaliny, sestaveno dle (44)

#### Neneutonské kapaliny časově závislé

Pro časově závislé neneutonské kapaliny je typické, že velikost smykového napětí se s časem mění. Rozeznáváme látky tixotropní, kde se smykové napětí s časem zmenšuje, až se po určité době ustálí na určité hodnotě. Opačně se projevují látky reopexní, kde smykové napětí v čase roste. Aplikace těchto vlastností do inženýrských výpočtů je problematická. (44)



Obr. 16 Časově závislé nenewtonské kapaliny

#### 6.1.4 Povrchové napětí

Povrchové napětí na rozhraní kapalně a plynné fáze je definováno vztahem:

$$\sigma = \frac{dE_A}{dA}, \quad [23]$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí [ $\text{J}/\text{m}^2$ ],  $dE_A$  je povrchová energie [ $\text{J}$ ], tj. energie nutná pro zvětšení plochy fázového rozhraní o  $dA$  [ $\text{m}^2$ ].

Jiné, avšak ekvivalentní vyjádření povrchového napětí je pomocí síly působící na elementární délku povrchu kapaliny, tečně k povrchu kapaliny a kolmo na zmíněný délkový element:

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad [24]$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí [ $\text{N}/\text{m}$ ],  $F$  je síla působící na povrchu kapaliny [ $\text{N}$ ] a  $l$  je element délky [ $\text{m}$ ]. (43)

Každý systém přirozeně spěje ke stavu s nejnižší volnou energií. Z hlediska povrchového napětí tento stav odpovídá kapkám kulového tvaru. Povrchové napětí u těchto kapek způsobí vznik tlaku o velikosti dané rovnicí:

$$p_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma}{R}, \quad [25]$$

kde  $p_\sigma$  je tlak způsobený povrchovým napětím [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],  $\sigma$  je povrchové napětí [ $\text{N}/\text{m}$ ] a  $R$  je poloměr kapky [ $\text{m}$ ]. (43)

Povrchové napětí se přibližně lineárně snižuje se zvyšující se teplotou, což ulehčuje rozprašování a odpařování kapek. Na povrchové napětí kapalin mají také značný vliv i malé koncentrace jiných rozpuštěných látek. Např. Rokafenol N8 používaný pro výrobu čisticích

prostředků snižuje povrchové napětí vody o přibližně 55 %. Výpočet povrchového napětí u těchto směsí je však velmi problematický, a proto se tato problematika opírá spíše o experimentálně zjištěná data. (43)

Závislost velikosti kapek rozprašované kapaliny na povrchovém napětí kapaliny není detailně probádána. Z principu povrchového napětí bylo teoreticky odvozeno, že nižší povrchové napětí by mělo mít pozitivní vliv na kvalitu atomizace, avšak experimentální závěry tuto hypotézu jednoznačně nepotvrdily. (43)

## 6.2 Teoretické základy z oblasti atomizace

Atomizace je proces, při kterém jsou ze spojitého proudu kapaliny vytvářeny malé kapky. Základem tohoto procesu je překonání povrchového napětí, které se snaží udržet energeticky nejvýhodnější tvar koule a viskozity, která brání tvarovým změnám kapaliny. Na překonání těchto sil se podílí interní a externí vlivy. Mezi interní vlivy se řadí poruchy homogenity kapaliny a typickým externím vlivem je odpor plynného prostředí.

### 6.2.1 Energetická náročnost atomizace

Energie dodaná atomizéru se skládá ze tří složek:

$$E = E_A + E_K + E_L, \quad [26]$$

kde  $E$  je celková energie dodaná atomizéru,  $E_A$  je atomizační energie nutná k překonání povrchového napětí,  $E_K$  je kinetická energie pohybující se kapaliny a  $E_L$  je ztrátová energie nutná k překonání třecích sil v atomizéru.

Účinnost atomizace je pak možné vyjádřit jako poměr atomizační energie a celkové energie dodané do atomizéru:

$$\eta_A = \frac{E_A}{E}. \quad [27]$$

Účinnost atomizace je poměrně malá, obvykle do 0,1 % a závisí na typu atomizéru, průměru vytvářených kapek a fyzikálních vlastnostech kapaliny. Při atomizaci se obvykle pracuje s vysokým tlakem a velkými rychlostmi, proto je energetická náročnost atomizace poměrně značná. Orientační energetická náročnost pro jednotlivé typy atomizérů je uvedena v následující tabulce:

Typ atomizéru	Energetická náročnost [Wh/kg]
Tlakový atomizér	2-4
Vířivý atomizér	2-4
Pneumatický atomizér	50-60
Rotační atomizér	cca 15

Tab. 6 Energetická náročnost jednotlivých druhů atomizace (43)

### 6.2.2 Velikost vzniklých kapek

Na vytváření jemného spreje atomizované kapaliny se podílí dva základní mechanismy, a to primární atomizace při výtoku z trysky a sekundární rozpad vzniklých kapek na menší.

Výpočtově se jedná o velmi komplikovanou oblast, proto jsou v následujících kapitolách uvedeny pouze některé vztahy, které jsou základem pro tvorbu komplexnějších výpočtů velikosti kapek. Prakticky se nejedná o kapky jedné velikosti, ale o škálu rozměrů charakterizovanou distribuční křivkou.

### Statické vytváření kapek

Nejjednodušší způsob vytváření kapek kapaliny je pomalá, kvazi-statická tvorba visících kapek, jako např. v případě kapajícího kohoutku. V okamžiku, kdy gravitační síla překoná povrchové napětí kapaliny, vytvoří se kapka. Pro pomalý výtok z trubky kruhového průřezu o vnitřním průměru  $d_0$  platí:

$$m_D = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \sigma}{g}, \quad [28]$$

kde  $m_D$  je hmotnost vytvořené kapky [kg],  $d_0$  je vnitřní průměr trubky [m],  $\sigma$  je povrchové napětí [N/m] a  $g$  je gravitační zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]. (45)

Pro sférickou kapku kapaliny lze z předchozí rovnice odvodit vztah [29] pro výpočet průměru kapky:

$$D = \left( \frac{6 \cdot d_0 \cdot \sigma}{\rho_L \cdot g} \right), \quad [29]$$

kde  $D$  je průměr kapky [m] a  $\rho_L$  je hustota kapaliny [ $\text{kg/m}^3$ ].

Průměr kapky vody vytvářené tímto mechanismem na výtoku z trubičky průměru 1 mm je 3,6 mm. Pro případ petroleje je vypočtený průměr 2,6 mm. Tyto vztahy platí pouze pro nejjednodušší případ – pomalý výtok kapaliny z trubky. V praktických aplikacích atomizace je naopak rychlost atomizovaného média velmi vysoká a hnací síla atomizace není tíhové zrychlení ( $g$ ), ale současný účinek tlaku a kinetické energie kapaliny. Důsledkem je pak produkce jemnějšího spreje kapek. Z rovnice [29] je patrné, že větší povrchové napětí způsobí tvorbu větších kapek, a působí tedy negativně na proces atomizace. Naopak hustota kapaliny působí na atomizaci pozitivně. (45)

### Rozpad kapek v proudícím plynu

Pro rovnovážný stav, tedy stabilní kapku, na kterou působí dynamický tlak vzduchu  $p_A$ , platí, že tlak uvnitř kapky je roven konstantě. Každá změna tlaku  $p_A$  je tedy kompenzována příslušnou změnou tlaku způsobeného povrchovým napětím. Matematicky lze rovnováhu formulovat pomocí rovnice:

$$p_1 = p_A + p_\sigma = \text{konst.} \quad [30]$$

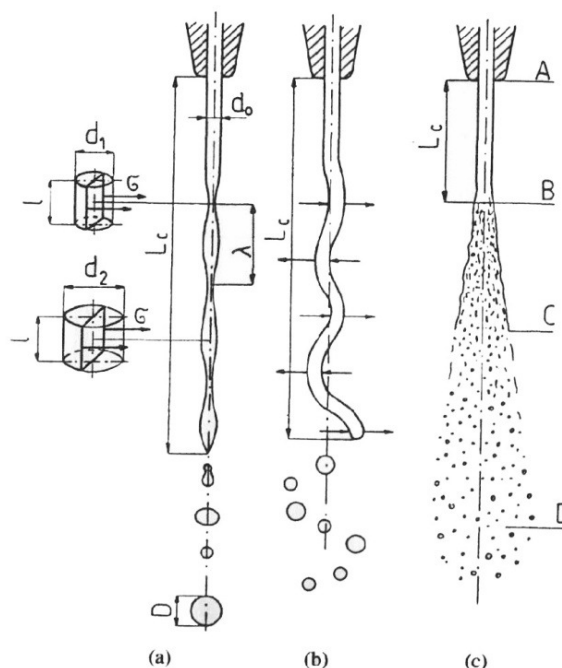
Pokud v některém místě kapky dynamický tlak překročí hodnotu, kterou je možné kompenzovat změnou  $p_\sigma$ , pak dynamický tlak začne deformovat kapku do protáhlého tvaru, což způsobí snížení  $p_\sigma$  a nakonec rozpad na menší kapky. Pokud jsou nově vzniklé kapky

dostatečně malé a mají tedy dostatečně vysoký tlak  $p_\sigma$  (viz rovnice. [26]), aby vyrovnaly okolní tlak  $p_A$ , k dalšímu rozpadu již nedochází. Výsledkem detailních výpočtů v oblasti rozpadu kapek v proudícím plynu je kritická velikost kapky, tedy taková, která se za daných podmínek dále nerozpadá. Výpočty jsou značně komplikované a v oblasti atomizace kapalných paliv nejsou příliš často užívány. (45)

### 6.2.3 Délka souvislého proudu kapaliny za tryskou

Existují tři základní způsoby rozpadu proudu kapaliny vycházející z trysky:

1. Tvorba a růst osově symetrických vln způsobených poruchami v kapalině. V místech většího průměru proudu je nižší tlak a naopak v místech zúžení proudu je tlak vyšší, což vede k rozpadu proudu na jednotlivé kapky. Průměr těchto kapek je vždy větší než průměr trysky, obdobně jako v případě statické tvorby kapek.
2. Tvorba a růst asymetrických vln, způsobených radiálním tlakem vzduchu proudícího okolo proudu kapaliny.
3. Rozpad proudu kapaliny způsobený přímým působením aerodynamických sil na proud kapaliny



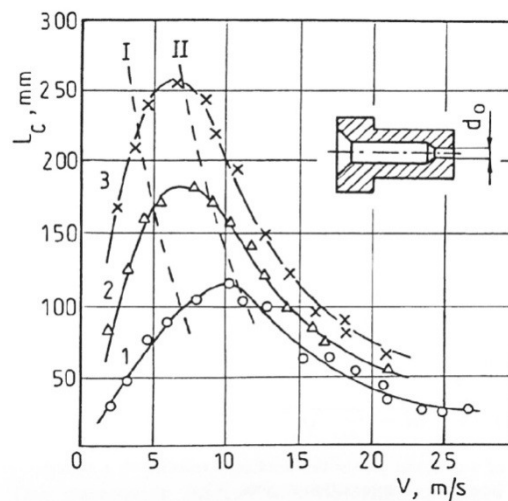
Obr. 17 Různé způsoby dezintegrace proudu,  
a) osově symetrické vlny, b) asymetrické vlny, c) aerodynamické síly (43)

Teoretické úvahy v oblasti dezintegrace kapaliny proudící tryskou jsou založeny především na metodě malých poruch – nehomogenit, které způsobí iniciaci rozpadu proudu. Základem této metody je řešení linearizovaných diferenciálních rovnic (podrobněji viz (43)). Důležitým parametrem odvozeným pomocí této metody je délka souvislého proudu kapaliny  $L_c$  (viz obr. 17). V oblasti atomizačních hořáků požadujeme tuto délku obvykle co nejmenší, aby byla dosažena co největší doba styku kapek s horkými spalinami, a tím byl dostatečný čas pro jejich odpaření a shoření. Tvar rovnice pro výpočet  $L_c$  je různý pro různé převládající způsoby dezintegrace, např. pro osově symetrické vlny má tvar:

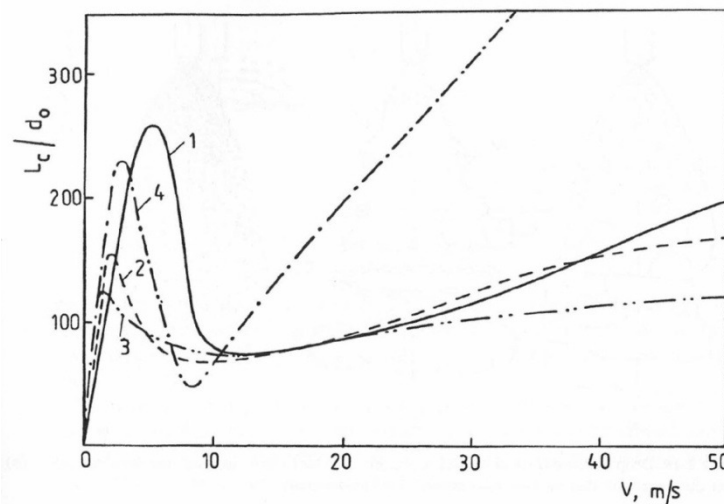
$$\frac{L_c}{d_0} = \ln \frac{R}{\delta} \cdot \sqrt{We}, \quad [31]$$

kde  $We$  je Webrovo číslo a  $\ln(R/\delta)$  je experimentálně zjištěný parametr závislý na charakteru toku. Pro laminární proudění je  $\ln(R/\delta)$  rovno přibližně 24, pro turbulentní proudění 4. (45)

Experimentálně zjištěnou závislost délky kompaktního proudu na rychlosti proudění v trysce pro motorovou naftu demonstruje obr. 18. Na délku souvislého proudu má také výrazný vliv geometrie výstupní trysky, především délka trysky, charakterizovaná obvykle relativní délkou  $l/d_0$ . Tato závislost je graficky vyjádřena na obr. 19.



Obr. 18 Závislost délky proudu na rychlosti, 1,  $d_0=0,38\text{mm}$ , 2,  $d_0=0,7\text{mm}$ , 3,  $d_0=1,04\text{mm}$  (43)



Obr. 19 Závislost relativní délky souvislého proudu ( $L_c/d_0$ ) na rychlosti a relativní délce trysky ( $l/d_0$ ), 1,  $l/d_0=60$ , 2,  $l/d_0=30$ , 3 a 4,  $l/d_0=4$ , kde 1, 2 a 3 jsou trysky s ostrou vstupní hranou, 4 je tryska s kónickou vstupní hranou (43)

### 6.3 Způsoby atomizace

Principu atomizace využívají zařízení z mnoha oblastí průmyslové činnosti. Proto je potřeba rozprašování kapalin o různých vlastnostech, přičemž jsou kladeny různorodé nároky na parametry proudu rozprašené kapaliny. Existuje celá řada principů atomizace, z nichž

každý dává specifické výsledky vhodné pro jinou aplikaci. Základní oblasti použití atomizace jsou:

- Spalovací motory
- Nanášení nátěrů
- Hořáky na kapalná paliva
- Chladicí věže
- Redukce teploty páry
- Sanitace nádrží
- Čištění spalin
- Mazání
- Rozprašování tekutých kovů (tvorba prášků, slinuté karbidy...)
- Hasicí systémy
- Zemědělská technika a jiné

V následujících kapitolách je provedeno rozdělení atomizérů z hlediska principu atomizace a jejich stručný popis. Podrobněji je pojednáno o pneumatických atomizérech, zvláště pak o effervescentním atomizéru, který byl použit při zkouškách kapalných paliv.

### **6.3.1 Tlakové atomizéry**

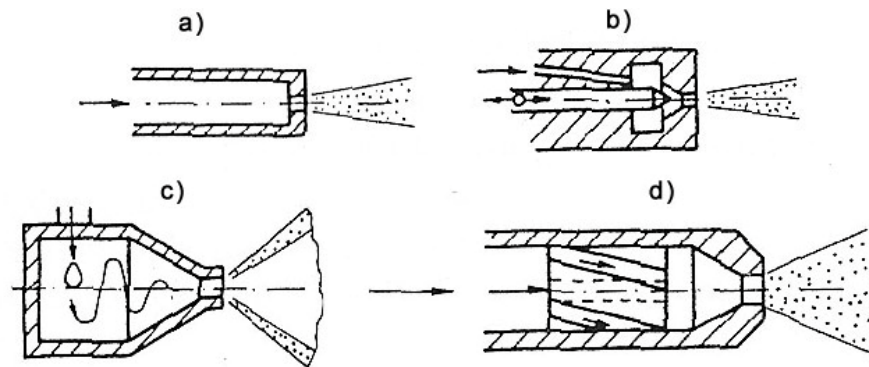
Tlakové (hydrodynamické) atomizéry využívají pro atomizaci tlakovou energii kapalného média, která se v trysce mění na energii kinetickou způsobující atomizaci media. Mají jednoduchou konstrukci a tím i nejnižší cenu. Nepotřebují ke své funkci přívod další energie ani jiného média, proto je i celá technologie poměrně jednoduchá. Kvalita atomizace je však silně závislá na průtoku média. Nehodí se pro atomizaci kapalin s vyšší viskozitou. Základní konstrukční varianty tlakových atomizérů jsou popsány v následujícím textu. (43)

#### **Tlakové atomizéry s jednoduchou tryskou (Jet atomizers)**

Jedná se o konstrukčně nejjednodušší tlakový atomizér, který se skládá pouze z dutého těla atomizéru zakončeného jednoduchou tryskou. Z trysky vystupuje kapalina velkou rychlostí ve formě paprsku, který se rozpadá na kapky dynamickým působením okolního vzduchu. V této nejjednodušší podobě mají malý úhel vytvořeného spreje. Pokud není malý úhel kužele spreje žádoucí, instaluje se do výstupní trysky kuželová vestavba a výstupní tryska má prstencový tvar. Výstupní úhel je v tomto případě větší. (43)

#### **Vířivé atomizéry (Swirl atomizers)**

Pro většinu aplikací je malý úhel, vytvořený tlakovým atomizérem s jednoduchou cylindrickou tryskou, nevhodný. Princip vířivých atomizérů využívá odstředivé síly vyvolané krouživým pohybem kapaliny v ústí trysky. Odstředivá síla způsobí, že úhel výstupního kužele je při stejné geometrii výstupní trysky výrazně větší. Rotačního (vířivého) pohybu kapaliny je dosaženo pomocí šroubovitých vestaveb (obr. 20a), nebo tangenciálním vstupem paliva do hlavy atomizéru (obr. 20c). Podle intenzity krouživého pohybu media může být výstupní kužel buď dutý (obr.20a), nebo plný (obr. 20c). Vířivé atomizéry s plným výstupním kuželem využívají kombinace vířivého a tlakového principu atomizace, kdy je nejdříve kapalině udělen krouživý pohyb, a poté je zvýšena kinetická energie průchodem tryskou o malém průřezu. (43)



Obr. 20 Různé druhy tlakových atomizérů,  
 a) Tlakový atomizér s jednoduchou tryskou, b) Tlakový atomizér s jednoduchou tryskou s přerušovaným tokem,  
 c) Vířivý atomizér s dutým výstupním kuželem, d) Kombinovaný atomizér s plným výstupním kuželem (43)

### 6.3.2 Pneumatické atomizéry

Pneumatické atomizéry využívají k atomizaci kapalného media energii plynu, obvykle vzduchu nebo páry. Jedná se o nejstarší typ atomizérů, první patent na tento typ atomizace byl udělen roku 1880. Plyn s vysokou kinetickou energií zajišťuje dobrou dezintegraci proudu kapaliny. Pneumatické atomizéry se uplatňují v široké škále aplikací, obzvláště výhodné jsou pro atomizaci viskózních olejů pomocí páry. Princip pneumatické atomizace je založen na velkém smykovém napětí vytvořeném na rozhraní mezi kapalným a plynným mediem. Tento typ atomizérů má ze všech uvedených typů největší uplatnění v oblasti průmyslu a energetiky. (43)

Pneumatické atomizéry mají následující výhody (43):

- Jsou použitelné pro vysoce viskózní kapaliny, pokud je kinetická energie plynu dostatečně velká. Použití páry nebo přehřátého vzduchu viskozitu paliva snižuje.
- Je menší závislost průtoku paliva na kvalitě atomizace než u tlakových atomizérů, proto je možné dosáhnout velkého regulačního rozsahu s dobrou kvalitou atomizace.
- Různým provedením atomizérů lze dosáhnout různých tvarů plamene (plochý, konický) a různého úhlu spreje.
- Pneumatické atomizéry mají zcela odlišnou distribuci kapek v příčném průřezu než vířivé atomizéry. Největší množství velkých kapek je poblíž středu spreje a menší kapky jsou na okrajích. Tento charakter distribuce je pro spalování výhodný, protože vytváří nejlepší podmínky pro radiační přestup tepla.
- Pneumatické atomizéry využívající tlakový vzduch jsou výhodné, protože vzduch přítomný ve spreji podporuje oxidační reakce na začátku spalovacího procesu. To umožňuje snížení doby hoření paliva a tím i délky plamene.
- Pro atomizaci méně kvalitních kapalných paliv je možné použít hořlavý plyn, např. zemní plyn, který slouží jako podpůrné palivo.
- Při vysokých rychlostech proudění plynného media jsou generovány tlakové pulzy o vysoké frekvenci, které napomáhají atomizačnímu procesu. Tím jsou produkovány 1,7–2,0krát menší kapky než v případě atomizace bez pulzů.
- Protože tlak paliva je u pneumatických atomizérů relativně malý, jsou příčné průřezy trysek větší než u jiných způsobů atomizace, a proto tento druh atomizérů lépe odolává ucpávání.



Mezi nevýhody pneumatické atomizace patří (43):

- Potřeba přídavných zařízení na výrobu tlakového plynného media (generátor páry, kompresor).
- Měrná spotřeba energie na atomizaci hmotnostní jednotky paliva je vyšší než u jiných způsobů atomizace.
- Složitější konstrukce atomizéru a tím i vyšší cena.
- V ojedinělých případech (rozprašování vysoce viskózních olejů), kde je nutné použít velké množství páry, může docházet k nadměrné korozi teplosměnných ploch. Ve většině případů je však množství páry natolik malé, že nedochází k významnému zvýšení koncentrace vodní páry ve spalínách.
- Charakter proudění uvnitř pneumatického atomizéru je natolik složitý, že neexistují spolehlivé výpočetní metody pro jeho stanovení.

Důležitým parametrem u pneumatických atomizérů je poměr plynného atomizačního media a kapalného paliva (gas to liquid ratio – GLR):

$$GLR = \frac{G_G}{G_L}, \quad [32]$$

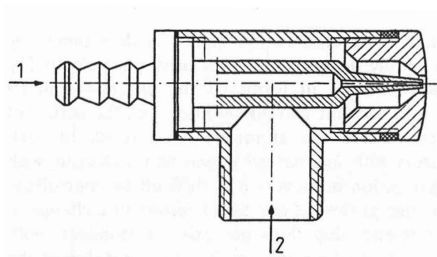
kde  $G_G$  je hmotnostní průtok plynu atomizérem a  $G_L$  je hmotnostní průtok kapaliny. Prakticky se hodnota GLR pohybuje v hodnotách od 0,1 (vysokotlaké atomizéry) po 15 (nizkotlaké atomizéry).

Existuje několik základních typů pneumatických atomizérů (43):

1. Atomizéry s paralelním tokem
2. Atomizéry s křížovým tokem
3. Atomizéry s vířivým tokem
4. Effervescentní atomizéry

### Atomizéry s paralelním tokem

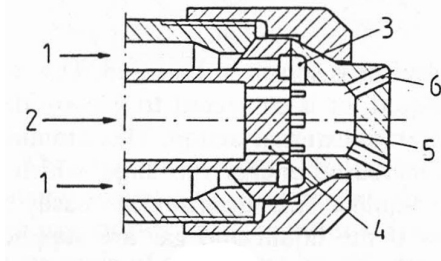
U tohoto typu atomizéru dochází v okamžiku styku kapalného a plynného media k rovnoběžnému toku obou medií, proudících různými rychlostmi. Tím dochází ke vzniku velkých smykových sil v rovině styku kapalného a plynného media, které vedou k dezintegraci kapaliny. Typický příklad tohoto atomizéru je uveden na obr. 21. (43)



Obr. 21 Pneumatický atomizér s paralelním tokem s vnějším stykem fází,  
1. Kapalina, 2. Plyn (43)

## Atomizéry s křížovým tokem

Mechanismus dezintegrace u pneumatických atomizérů s křížovým tokem je založen na vytvoření tenkého paprsku kapaliny, který je přiveden do proudu plynu. Úhel styku obou fází může být různý, ale obvykle bývá  $90^\circ$ . Styk paprsku kapaliny s proudícím plynem způsobuje intenzivní dezintegraci, přičemž čím tenčí je paprsek kapaliny, tím jemnější je výsledný sprej. Na obr. 22 je zobrazen pneumatický atomizér s křížovým tokem a vnitřním stykem fází, který má před výstupní tryskou přídavnou směšovací komoru. Tento typ atomizéru je v USA hojně využíván u hořáků instalovaných v průmyslových pecích. (43)

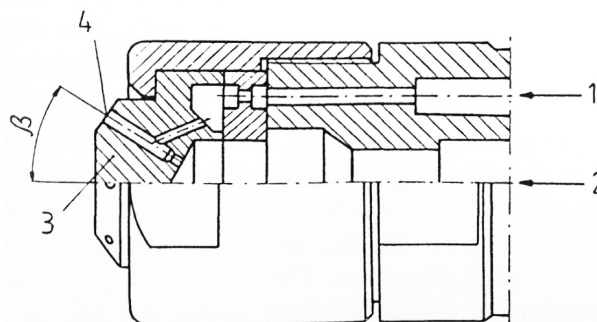


**Obr. 22** Pneumatický atomizér s křížovým tokem s vnitřním stykem fází,  
1. Kapalina, 2. Plyn, 3. Tryska kapaliny, 4. Tryska plynu, 5. Směšovací komora, 6. Výstupní tryska (43)

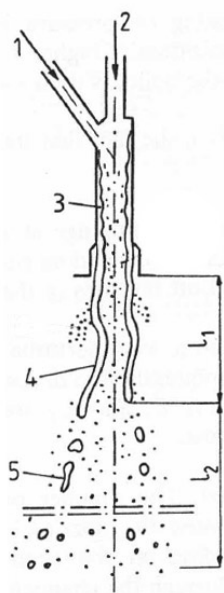
Velmi populární konstrukce atomizéru s křížovým tokem je zobrazen na obr. 23. Jedná se o atomizér s tzv. Y tryskou (Y-jet nozzle). Tento typ atomizéru byl patentován I. Flecherem v roce 1944 v USA a je často používán v hořácích pro generátory páry (Babcock). Atomizace kapaliny probíhá ve dvou fázích (43):

1. Kapalně a plynné medium proudí do výstupní trysky, kde se setkávají v určitém úhlu. Ve výstupní trysce způsobí expandující plyn vytvoření tenkého filmu kapaliny na stěně výstupní trysky.
2. Po výstupu tenkého filmu kapaliny z trysky dochází k dezintegraci filmu na kapky velmi malé velikosti.

Konstrukce atomizéru s Y tryskou a jednotlivé fáze rozpadu kapaliny jsou zobrazeny na obr. 23, resp. obr. 24.



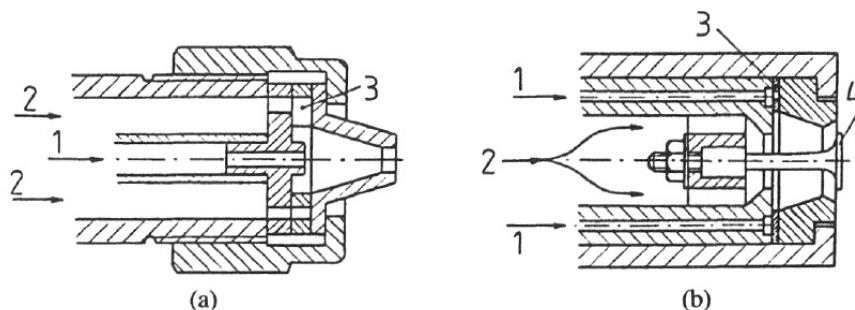
**Obr. 23** Pneumatický atomizér s Y tryskou,  
1. Kapalina, 2. Plyn, 3. Hlava atomizéru, 4. Výstupní tryska (43)



Obr. 24 Princip funkce atomizéru s Y tryskou,  
1. Kapalina, 2. Plyn, 3. Tenký film kapaliny, 4. Počátek dezintegrace filmu, 5. Vytvořené kapky (43)

### Atomizéry s vířivým tokem

Pro tyto atomizéry je charakteristický vířivý pohyb alespoň jednoho z medií (kapalina nebo plyn). Přivedení tenkého filmu nebo paprsku kapaliny do zavířeného plynu vede k velmi dobré atomizaci. Provedení nejjednodušších atomizérů s vířivým tokem je uvedeno na obr. 25. (43)



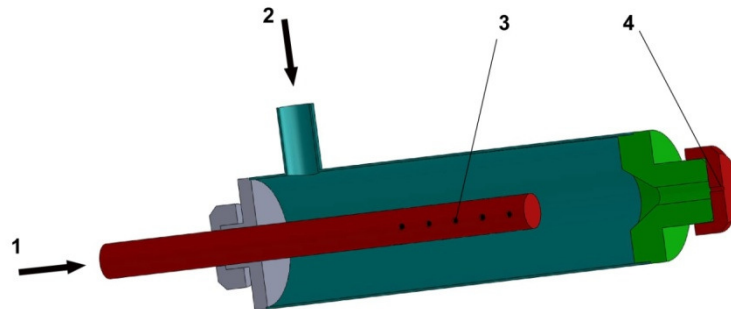
Obr. 25 Dva typy pneumatických atomizérů s vířivým tokem, a) S vířením plynu, b) S vířením kapaliny,  
1. Kapalina, 2. Plyn, 3. Vestavba s tangenciálními tryskami, 4. Deflektor

### Effervescentní atomizér

Princip atomizace u klasických pneumatických atomizérů spočívá ve vytvoření paprsku nebo tenkého filmu kapaliny, který je následně rozprášen působením plynného média (vzduch nebo pára). Princip effervescentní atomizace je odlišný. Využívá experimentálně zjištěné skutečnosti, že plyn rozpuštěný v kapalině má pozitivní vliv na kvalitu atomizace. Tento efekt je patrný už při malém množství plynu kolem 15 % molárních. Původně byl tento efekt použit při tzv. superkritické injekci, významným problémem však bylo dosažení kvalitního rozpouštění plynu v kapalině. (43) (46)

Effervescentní atomizér využívá podobného principu, přičemž řeší problémy s rozpouštěním plynu v kapalině. Základní princip je poměrně jednoduchý. Spočívá

v kombinaci tlakového atomizéru s jednoduchou tryskou a rozpouštění plynu v kapalině před vstupem do trysky. Tento plyn nezpůsobuje zvýšení kinetické energie kapaliny, protože je do kapaliny dávkován při malých rychlostech a také rozdíl tlaků kapaliny a plynu je velmi malý, nicméně dvoufázový tok v trysce výrazně zlepšuje atomizaci kapaliny. Dvoufázová směs se vyznačuje rychlostí zvuku výrazně menší, než je rychlost zvuku v obou jednotlivých fázích. Pokud je rychlost proudění vyšší než rychlost zvuku, dochází v oblasti změny charakteru toku ke vzniku tlakových pulzů způsobujících atomizaci media. Při průchodu dvoufázové směsi přes trysku dochází k prudké expanzi bublin, která způsobí „roztrhání“ kapaliny. Původní provedení effervescentního atomizéru je zobrazeno na obr. 22. (43)



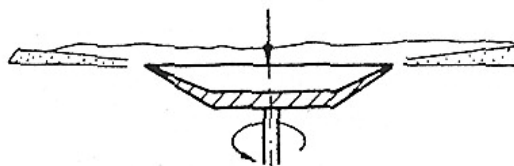
Obr. 26 Schematický model effervescentního atomizéru,  
1. Vstup plynu, 2. Vstup kapaliny, 3. Směšovací trysky, 4. Výstupní tryska, sestaveno dle (43)

Mezi výhody effervescentního atomizéru patří (43):

- Velmi dobrá atomizace i v oblasti nízkých tlaků a průtoků plynu v porovnání s jinými typy pneumatických atomizérů.
- Větší průměr výstupní trysky zabezpečuje menší problémy s ucpáváním.
- V případě spalování může mít přítomnost kyslíku ve spreji vliv na redukci sazí a kouře.
- Jednoduchost atomizéru zajišťuje spolehlivost, nízkou cenu a nízké provozní náklady.

### 6.3.3 Rotační atomizéry

Rotační atomizéry využívají mechanickou energii rotující části (disk, kolo, kelímek...) poháněného elektromotorem. Energie rotujícího disku je předána kapalině, která opouští atomizér s vysokou kinetickou energií způsobující rozprášení. Pomocí rotačních atomizérů lze při použití vhodné geometrie produkovat homogenní kapky (stejný průměr). Používají se často pro atomizaci suspenzí a roztoků, například při sušení. (43)



Obr. 27 Rotační atomizér (43)

### **6.3.4 Speciální atomizéry**

Některé požadavky na atomizaci v průmyslových aplikacích nemohou být uspokojeny pomocí tradičních způsobů atomizace. Jedná se především o atomizaci velmi malého nebo naopak velmi velkého množství kapaliny, atomizaci chemicky agresivních kapalin, atomizaci značně nelineárních kapalin apod. Některé speciální principy atomizace jsou popsány v následujícím textu. (43)

#### **Akustické atomizéry**

Akustické atomizéry využívají akustických vibrací vznikajících v dvoufázové směsi proudící nadzvukovou rychlostí. Rychlost zvuku v dvoufázovém mediu (směs plynu a kapaliny) je výrazně nižší, než rychlosti zvuku v obou samostatných fázích, proto může být nadzvukové rychlosti proudění ve výstupní trysce dosaženo poměrně snadno. Tlakové pulzy o frekvenci 0,016–20 kHz významně usnadňují dezintegraci proudu kapaliny vystupujícího z trysky. (43)

#### **Ultrazvukové atomizéry**

Tento typ atomizéry využívá pro lepší atomizaci tlakových pulzů podobně jako v případě akustických atomizérů. Tlakové pulzy jsou v tomto případě generovány stykem kapaliny s ultrazvukovým kmitajícím prvkem. Ultrazvukový generátor je poměrně drahé zařízení, a proto není tento způsob atomizace příliš často využíván. (43)

## 7 URČENÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ PALIV

Nejjednodušší cestou k využití kapalných biopaliv je náhrada fosilního paliva bez nutnosti zásadní úpravy zařízení. V takovém případě je však nutné, aby se vlastnosti biopaliva co nejlépe shodovaly s vlastnostmi nahrazovaného fosilního paliva. V oblasti průmyslové produkce tepla z kapalných paliv se jedná především o náhradu topných olejů. Nejvhodnějším alternativním biopalivem z pohledu fyzikálně-chemických vlastností je v tomto případě MEŘO, resp. FAME.

Předmětem této práce je srovnání spalovacích vlastností TOEL (při experimentu nahrazen motorovou naftou, která má z hlediska spalování velmi podobné vlastnosti) a MEŘO. Základní vlastnosti těchto paliv jsou dány příslušnými normami, které však předepisují zpravidla pouze horní případně dolní hranici nebo rozmezí hodnot. Pro stanovení některých parametrů při experimentu (objemový průtok paliva, teplota přehřevu, spotřeba vzduchu) bylo proto nutné určit přesnější hodnoty vlastností (hustota, výhřevnost, viskozita, složení). Některé veličiny byly zjištěny pomocí vlastních měření, ostatní byly změřeny v akreditované laboratoři. Následující tabulka uvádí základní vlastnosti TOEL a MEŘO důležité z hlediska spalování a plánování experimentu. Níže jsou podrobněji rozebrány jednotlivé zjištěné parametry.

Veličina	Jednotka	Nafta	MEŘO
Výhřevnost	MJ/kg	43,3 *	38,2 *
Teplota varu	°C	180-370	210-330 **
Hustota (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	836	891
Hustota (30 °C)	kg/m <sup>3</sup>	824	880
Viskozita (20 °C)	mm <sup>2</sup> /s	4,18 *	7,18 *
Viskozita (40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	2,71 *	4,42 *
Obsah C	% hm	84,9 *	74,2 *
Obsah H	% hm	14,1 *	12,6 *
Obsah O	% hm	-	cca 13
Teplota vzplanutí	°C	+66 *	+148 *
Bod filtrovatelnosti	°C	-15	-20 (třída F)
Stech. spotřeba O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg paliva	2,37	2,00
	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /GJ	54,69	52,23
Stech. spotřeba vzduchu	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg paliva	11,41	9,62
	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /GJ	263,57	251,73
Produkce CO <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg paliva	1,59	1,39
	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /GJ	36,67	36,34

Tab. 7 Srovnání vlastností TOEL a MEŘO

(\* údaje dle zkoušky provedené v TÜV NORD pro motorovou naftu a MEŘO (příloha 4), \*\* údaje z Destilační atmosférické křivky MEŘO vypracované Ústavem pro výzkum a využití paliv 5. 10. 2011 (příloha 5), bilanční údaje viz příloha 3

Jednotlivé vlastnosti motorové nafty a MEŘO jsou podobné, z porovnání některých hodnot lze však očekávat, že určité parametry spalovacího procesu se budou lišit.

### 7.1 Srovnání výhřevnosti a hustoty

Kalorimetrickou metodou provedenou v akreditované laboratoři byly zjištěny hodnoty spalných tepel a výhřevností motorové nafty a MEŘO. Bylo zjištěno, že výhřevnost MEŘO je

o 12 % nižší, než výhřevnost motorové nafty. Tento rozdíl musí být pro dosažení stejného spalovacího výkonu kompenzován zvýšeným hmotnostním průtokem paliva do hořáku. Ačkoliv je tento rozdíl částečně kompenzován vyšší hustotou MEŘO (o 6,5 %) výsledný objemový průtok MEŘO bude vyšší než u nafty. Lze tedy očekávat, vyšší tlakové ztráty v dopravním potrubí a v atomizačních tryskách, které budou mít za následek posun výkonové charakteristiky hořáku.

## 7.2 Srovnání destilační křivky a teploty vzplanutí

Důležitou charakteristikou z hlediska přechodu paliva z kapalné fáze do plynné je destilační křivka. Destilační křivka udává, jaký hmotnostní podíl paliva se oddestiluje v daném teplotním intervalu. Destilační křivku lze také vyjádřit ve formě distribuční funkce (obr. 28), kde se jedná o celkový odpařený podíl při dosažení dané teploty. V rámci této práce je vyhodnocena atmosférická destilační křivka motorové nafty a MEŘO vypracovaná Ústavem pro výzkum a využití paliv a.s. (příloha 5). Tabelární vyjádření destilační křivky motorové nafty obsahuje tab. 8, destilační křivku MEŘO obsahuje tab. 9.

Č. frakce	Teplota [°C]	Oddestilovaný podíl [% hm]
1	170 - 200	3,3
2	200 - 212	5,4
3	212 - 225	6,0
4	225 - 245	11,0
5	245 - 265	14,8
6	265 - 290	18,0
7	290 - 320	28,0
8	> 320	13,1
<b>Ztráta</b>		0,4
<b>Suma (kontrola)</b>		100,0

Tab. 8 Destilační křivka motorové nafty

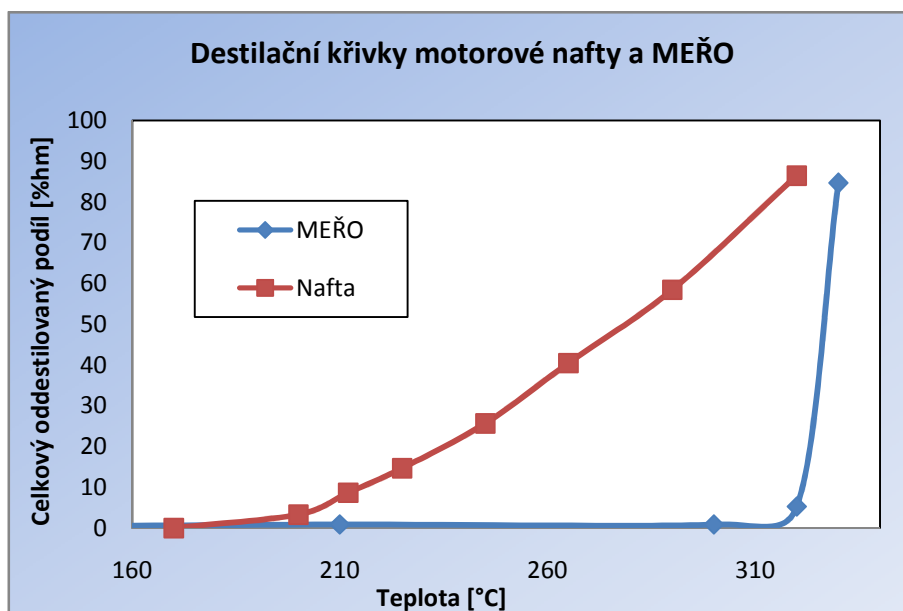
Č. frakce	Teplota [°C]	Oddestilovaný podíl [% hm]
1	85 - 115	0,3
2	115 - 210	0,6
3	210 - 300	0,0
4	300 - 320	4,4
5	320 - 330	79,4
6	> 330	15,0
<b>Ztráta</b>		0,3
<b>Suma (kontrola)</b>		100,0

Tab. 9 Destilační křivka MEŘO

Naměřená data byla následně upravena do podoby distribuční funkce a byla zanesena do grafu, který umožňuje srovnání chování obou paliva při odpařování. Z obr. 28 je patrné, že destilační křivky obou paliva se značně liší. U nafty nastává začátek destilace pozvolna kolem teploty 170 °C a odpařený podíl rovnoměrně narůstá až do teploty nad 330 °C. Je nutné brát v úvahu, že motorová nafta obsahuje cca 6 % MEŘO. S uvážením průběhu destilační křivky

MEŘO lze předpokládat, že u čistého fosilního paliva by byl podíl posledních frakcí poněkud menší.

U MEŘO je začátek destilace posunutý do vyšších teplot, významnější podíl se odlučuje až kolem teploty 300 °C a v rozmezí 320 – 330 °C dojde k odpaření většiny paliva. Oddestilování 0,9 % při teplotách do 210 °C je způsobené přítomností zbytkového metanolu, vody a jiných složek v MEŘO a z hlediska celkového chování při destilaci se jedná o zanedbatelný podíl.



Obr. 28 Srovnání destilační křivky nafty a MEŘO

V souladu s definicí teploty vzplanutí paliva lze předpokládat, že absence nízkovroucích podílů v MEŘO je příčinou vyšší teploty vzplanutí. Zatímco teplota vzplanutí motorové nafty je 66 °C, teplota vzplanutí MEŘO je 148 °C.

Z uvedených rozdílů je patrné, že rychlost hoření MEŘO bude nižší (viz kapitola 3.6.2), protože bude nutná delší doba pro přechod kapalného paliva do plynné fáze. Praktickým důsledkem rozdílné rychlosti hoření je jiné rozložení teplotního pole po délce spalovací komory resp. jiné rozměry plamene. Dalším očekávaným důsledkem je zhoršená stabilita spalování, protože kapka MEŘO letící ve spalovací komoře potřebuje delší čas na odpaření a k zapálení paliva tedy bude docházet ve větší vzdálenosti od hlavy hořáku.

Rozdílné chování lze také očekávat ve fázi zapalování hořáku. Zatímco u motorové nafty bude hoření lehčích odpařených podílů podporovat odpaření a zapálení zbytku paliva, u MEŘO bude nutné dodat vyšší iniciační energii nutnou na odpaření výše vroucích složek.

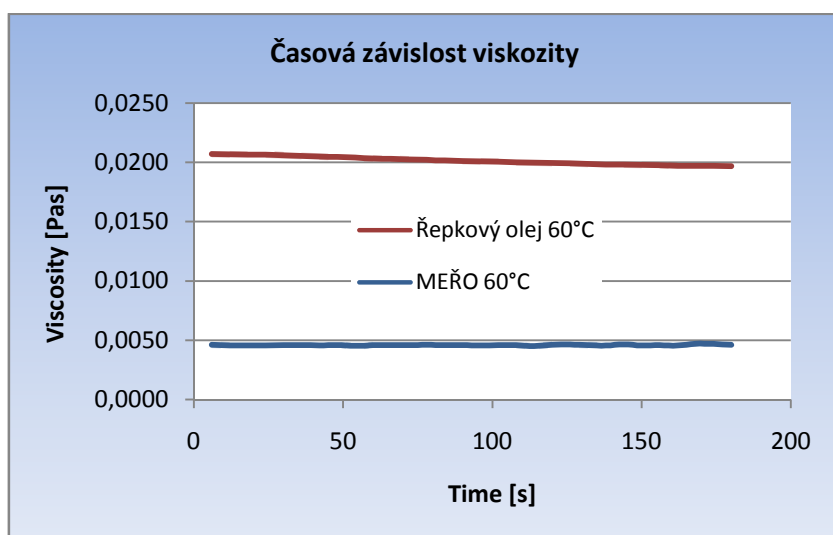
### 7.3 Měření viskozity

V rámci ověřování vlastností MEŘO bylo provedeno měření dynamické viskozity na rotačním viskozimetru Anton Paar Rheolab QC umístěném v laboratořích UPEI. Byla naměřena viskozita MEŘO a pro srovnání také řepkového oleje. Bylo provedeno jedno měření při konstantní teplotě a konstantní smykové rychlosti, jehož cílem bylo ověření závislosti viskozity na čase (reopexie, tixotropie), a poté byly provedeny tři měření při teplotách 20 °C, 60 °C a 80 °C při různých smykových rychlostech, kde bylo cílem zjistit, do jaké míry lze kapalinu považovat za newtonskou.



### 7.3.1 Měření viskozity při konstantní smykové rychlosti

Bylo provedeno 30 měření za celkovou dobu 180 s. Smyková rychlost byla konstantní  $400 \text{ s}^{-1}$ . Teplota byla také udržována na konstantní hodnotě  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Obr. 29 Časová závislost viskozity

Z měření vyplynulo, že žádná z měřených kapalin nevykazuje významnou závislost viskozity na čase a obě měřené kapaliny lze tedy prohlásit za časově nezávislé.

Veličina	Hodnota
Průměrná viskozita [mPa.s]	
- řepkový olej	20,2
- MEŘO	3,9
Relativní odchylka hodnot [%]	
- řepkový olej	2,8
- MEŘO	4,6

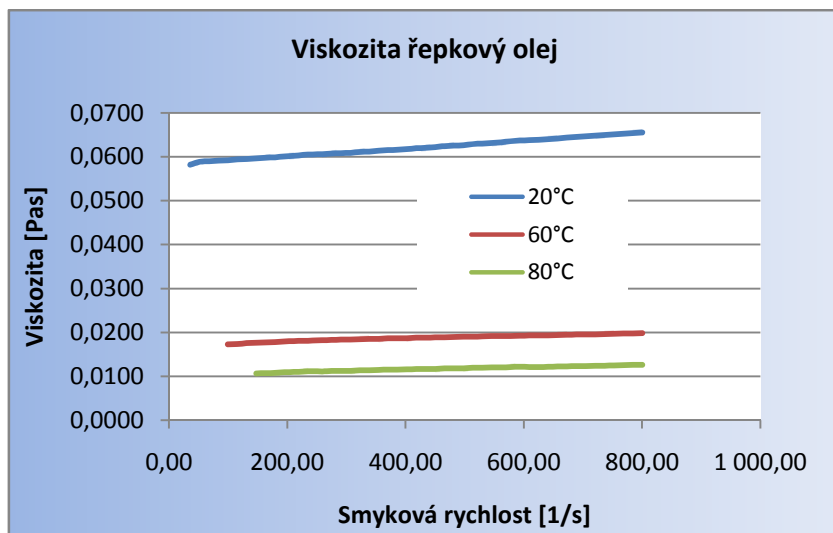
Tab. 10 Měření viskozity paliv při konstantní smykové rychlosti

### 7.3.2 Měření viskozity při proměnné smykové rychlosti

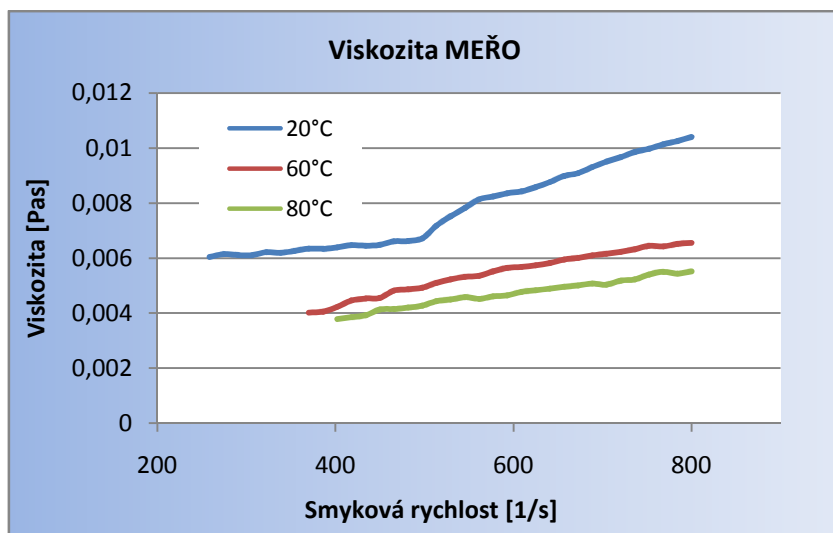
Bylo provedeno 50 měření za celkovou dobu 180 sekund. Smyková rychlost se rovnoměrně zvyšovala z hodnoty  $20 \text{ s}^{-1}$  na  $800 \text{ s}^{-1}$ .

Palivo	Teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	Viskozita (aritm. průměr) [mPa.s]	Relativní odchylka hodnot [%]
Řep. olej	20	62	6,2
Řep. olej	60	18,8	7,9
Řep. olej	80	11,7	9,3
MEŘO	20	7,8	33,9
MEŘO	60	5,4	26,2
MEŘO	80	4,7	19,7

Tab. 11 Měření viskozity s proměnnou smykovou rychlostí



Obr. 30 Závislost viskozity řepkového oleje na smykové rychlosti



Obr. 31 Závislost viskozity MEŘO na smykové rychlosti

U měření MEŘO při vyšších teplotách a nižších smykových rychlostech byla dosažena dolní hranice rozsahu viskozimetru (kolem 0,004 Pa.s), a proto několik počátečních měření chybí. Ze zbylých dat lze však průběh viskozity jednoznačně stanovit.

U řepkového oleje se maximální hodnota relativní odchylky pohybovala do 5 %, a proto lze s dostatečnou přesností považovat viskozitu za nezávislou na smykové rychlosti.

Měření se prokázalo nenewtonské chování metylesteru řepkového oleje. Hodnota viskozity se významně zvyšuje se zvyšováním smykové rychlosti. Protože byl průběh značně nerovnoměrný, byla zkouška za stejných podmínek opakována a průběh viskozity v závislosti na smykové rychlosti se u upakovaného měření shodoval. Běžně využívané metody pro měření viskozity paliv (např. dle ISO 3104) jsou vhodné pouze pro newtonské kapaliny. Nenewtonské chování MEŘO značně komplikuje použitelnost výsledků dosažených pomocí těchto metod pro praktické výpočty. V oblasti atomizace kapalných paliv, kde není známa velikost smykové rychlosti, je stanovení tečného napětí zvláště obtížné.

Ze srovnání viskozity řepkového oleje a MEŘO (obr. 28) je patrné, že reesterifikací se viskozita paliva významně snižuje, což má pozitivní vliv na kvalitu atomizace.

Následně byly akreditovanou laboratoří TÜV Nord zjištěny hodnoty kinematické viskozity MEŘO a topné nafty při teplotách 20 °C a 40 °C (viz tab. 7). Laboratoř provedla měření dle ČSN EN ISO 3104 (měření doby průtoku skleněnou kapilárou). Naměřené hodnoty viskozity byly zaneseny do grafu viskozity kapalných paliv (příloha 6). Grafickou lineární extrapolací pak byly zjištěny hodnoty kinematické viskozity pro ostatní teploty. Z tohoto grafu byla zjištěna minimální teplota MEŘO pro dosažení viskozity 10 cSt, což je maximální hodnota nutná pro správnou funkci atomizéru. Zjištěná teplota je přibližně 5 °C a lze tedy konstatovat, že viskozita není z hlediska teploty přehřevu paliva určující.

## 7.4 Stanovení hustoty

Přesné stanovení hustoty MEŘO je důležité z důvodu přepočtu objemového průtoku měřeného průtokoměry a hmotnostního průtoku, který udává spalovací výkon zařízení. Norma ČSN EN 14213 stanovuje pro 15 °C rozmezí hustot 860–900 kg/m<sup>3</sup> a dále také uvádí vztah pro výpočet hustoty MEŘO při jiných teplotách v rozmezí 20–60 °C:

$$\rho_{(15)} = \rho_{(T)} + 0,723 \cdot (T_1 - 15), \quad [33]$$

kde  $\rho_{(15)}$  je hustota při 15 °C [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{(T)}$  je hustota [kg/m<sup>3</sup>] při teplotě  $T_1$  [°C].

Pro využití normalizovaného vztahu je nutné znát hustotu MEŘO s dostatečnou přesností, protože odchylka v referenční hodnotě hustoty (15 °C) se přenáší do vypočítaných hodnot. Dosazením hodnoty hustoty při 15 °C zjištěné výrobcem při stáčení MEŘO (882 kg/m<sup>3</sup>) byla sestavena rovnice [34] stanovující hustotu MEŘO za teploty  $T_1$  [°C]. Výsledná rovnice má tvar:

$$\rho_{(T_1)} = 892,85 - 0,723 \cdot T_1 \quad [34]$$

Norma zaručuje platnost rovnice pro teploty 20–60 °C, což je pro účely této práce rozsah nedostatečný. V literatuře (47) byly nalezen vztah pro výpočet hustoty řepkového oleje pro teploty 20–300 °C. Empiricky získaná rovnice má tvar:

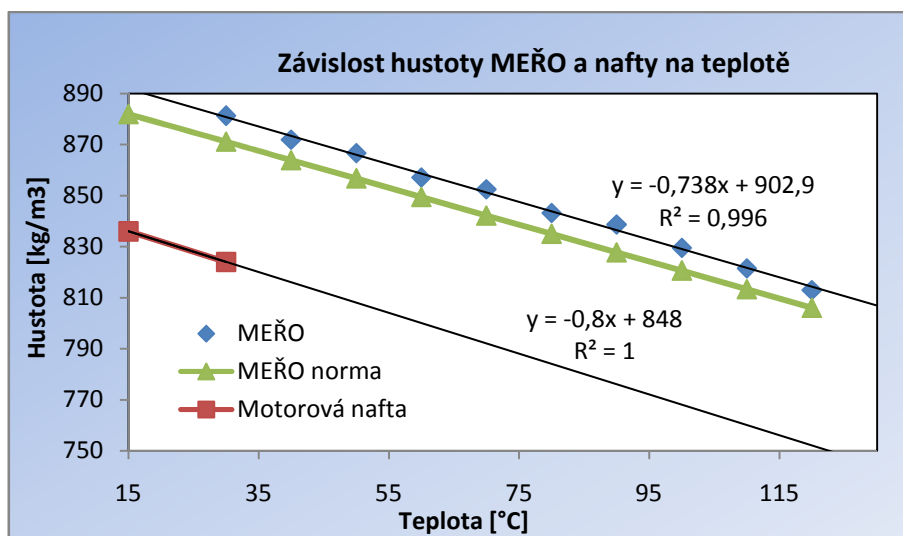
$$\rho_{(T_1)} = 887,25 - 1,22 \cdot T_1 \quad [35]$$

Výsledky získané pomocí obou výpočetních vztahů [34] a [35] se poměrně značně liší. Při teplotě 100 °C je odchylka vypočtených hustot přibližně 55 kg/m<sup>3</sup>, což nelze považovat za přijatelnou hodnotu. Z toho důvodu bylo provedeno vlastní měření. Pro měření byl využit odměrný válec, laboratorní váhy a temperovaná olejová lázeň. Měření bylo provedeno pro naftu při teplotách 15 °C a 30 °C a pro MEŘO při teplotách 30–120 °C. Naměřené hodnoty byly proloženy regresní přímkou, která byla následně upravena na tvar odpovídající předchozím vztahům. Získaná rovnice má tvar:

$$\rho_{(T_1)} = 902,9 - 0,738 \cdot T_1 \quad [36]$$

Sklon přímky dané rovnicí [36] odpovídá velmi dobře sklonu přímky dané normalizovanou rovnicí. Hodnoty hustoty MEŘO vypočtené oběma vztahy se liší přibližně o 10 kg/m<sup>3</sup>, což odpovídá při teplotě 50 °C odchylce do 2 %. Měření bylo potvrzeno platnost

normalizovaného vztahu a přesnost hodnoty hustoty při 15 °C a tento vztah byl dále použit pro výpočty při plánování a vyhodnocování experimentu. Srovnání naměřených dat a hustoty získané dle normalizovaného vztahu ukazuje obr. 32.



Obr. 32 Závislost hustoty MEŘO a nafty na teplotě

## 7.5 Stanovení bilance spalování motorové nafty a MEŘO

Pro stanovení spotřeby vzduchu a tvorby spalin obou paliv je nutné provést materiálovou bilanci spalování. Výpočet spotřeby vzduchu vychází ze stechiometrických rovnic spalování uhlíku a vodíku (rovnice [1] a [2]). Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu je popsán v kapitole 3.3. Obsah jednotlivých složek ve spalinách se vypočte dle vztahu:

$$n_i^{sp} = n_i^{vzd} + n_i^{pal} + n_i^{reakce}, \quad [37]$$

kde  $n_i^{sp}$  je molární množství složky  $i$  ve spalinách [kmol/h],  $n_i^{vzd}$  je molární množství složky  $i$  ve spalovacím vzduchu [kmol/h],  $n_i^{pal}$  je molární množství složky  $i$  v palivu [kmol/h] a  $n_i^{reakce}$  je molární množství složky  $i$  vytvořené reakcí [kmol/h]. V případě spotřebovaného množství (kyslík) má  $n_i^{reakce}$  záporné znaménko.

Detailní bilanční výpočty provedené v tabulkovém procesoru Microsoft Excel jsou uvedeny v příloze 3, základní vypočtení hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Z hlediska bilance spalování je hlavním rozdílem mezi MEŘO a motorovou naftou přítomnost kyslíku v palivu. Zatímco v motorové naftě se kyslík prakticky nevyskytuje, v MEŘO je cca 12 %hm kyslíku. Přítomnost kyslíku v palivu může příznivě ovlivnit kvalitu spalování, protože palivový kyslík se může účastnit oxidačních reakcí. Dalším důsledkem přítomnosti kyslíku v MEŘO je nižší stechiometrická spotřeba spalovacího vzduchu, která má za následek vyšší teoretickou teplotu plamene, což je příznivé z hlediska radiálního přestupu tepla. Menší průtok spalovacího vzduchu hořákem však znamená menší zavíření v místě smíchávání paliva se spalovacím vzduchem, což může za určitých okolností (zejména u nízkých výkonů na hranici regulačního rozsahu hořáku) vytvářet problémy s kvalitou

spalování. Nedokonalé promísení paliva se vzduchem lze identifikovat především přítomností CO ve spalinách, protože dochází k nedokonalému spalování.

Dalším rozdílem je menší poměr C:H v případě MEŘO. To má za následek nižší emise CO<sub>2</sub> vztahované na kilogram spáleného paliva. Z důvodu nižší výhřevnosti MEŘO je však množství produkovaného CO<sub>2</sub> na jednotku vyrobené energie přibližně stejné jako u klasického fosilního paliva, v tomto případě reprezentovaného motorovou naftou (viz tab. 7).

## 8 ZKOUŠKY SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV

### 8.1 Popis zařízení

Zkoušky spalování byly provedeny na zkušební hořáku Ústavu procesního a ekologického inženýrství, FSI VUT v Brně. Zkušebna je vybavena horizontální, vodou chlazenou spalovací komorou o vnitřním průměru 1000 mm a celkové délce 4000 mm. Spalovací komora je rozdělena na sedm sekcí s nezávislým měřením teplot chladicí vody na vstupu a výstupu. Maximální výkon hořáku je omezen teplotou spalin 1050 °C na výstupu ze spalovací komory, což odpovídá výkonu 1500–1800 kW. Spaliny jsou ze spalovací komory odváděny pomocí ocelového kouřovodu o průměru 500 mm. K optické kontrole hoření slouží inspekční otvory umístěné po obou stranách spalovací komory a dva inspekční otvory umístěné na čele komory naproti hořáku.

Při zkouškách byl použit výkonový plyno-olejový hořák s maximálním celkovým výkonem 1400 kW. Plynová část má maximální výkon 1200 kW a umožňuje dvoustupňový přívod paliva. Olejová rozprašovací hlava je umístěna v ose hořáku a upevněna pomocí stavěcích šroubů v požadované poloze, což umožňuje jeho rychlou výměnu. Maximální výkon olejového hořáku je dán použitým typem. Typ použitého olejového hořáku (atomizéru) je popsán v kapitole 8.1.1. Hořák je vybaven plynovým stabilizačním hořákem o výkonu 18 kW s elektrickým obloukovým zapalováním a ionizačním hlídačem plamene.

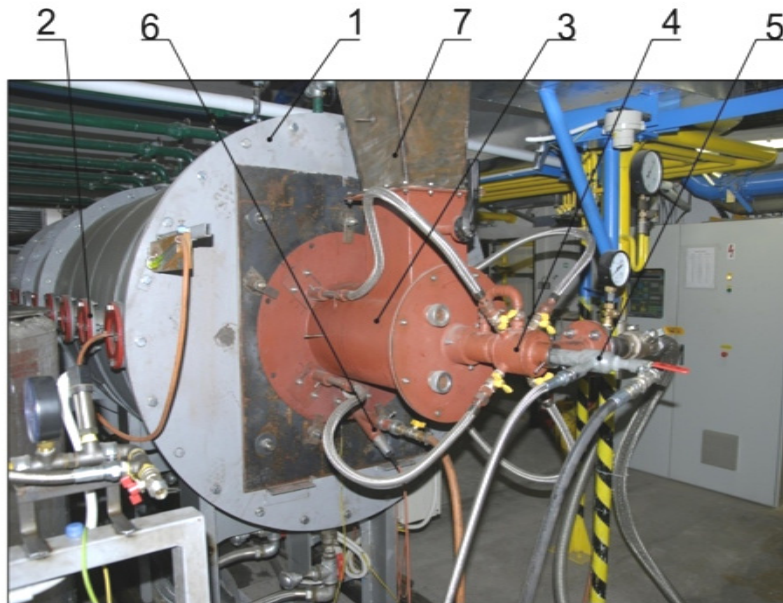
Zkušební zařízení je vybaveno okruhem pro dávkování lehkého topného oleje (LTO) se zásobníkem bez možnosti přehřevu. Palivo je dávkováno pomocí odstředivého čerpadla. Druhý okruh těžkého topného oleje (TTO) je vybaven nerezovým zásobníkem, který umožňuje přehřev pomocí horkovodního topného hadu až na teplotu 130 °C. Pro dávkování paliva slouží v okruhu TTO šroubové čerpadlo. Oba okruhy umožňují vzájemné propojení. Při zkouškách byl použit zásobník LTO pro motorovou naftu a zásobník TTO s přehřevem pro MEŘO. V obou případech bylo pro dávkování použito odstředivé čerpadlo z okruhu LTO. Oba okruhy jsou vybaveny měřením tlaku a průtoku, u okruhu TTO je navíc instalováno měření teploty paliva.

Jako atomizační medium byl použit tlakový vzduch bez přehřevu. Maximální přetlak vytvářený kompresorem je 13 bar. Hodnota přetlaku atomizačního vzduchu byla nastavována podle požadovaného GLR. Přívod tlakového vzduchu je vybaven měřením tlaku a průtoku a teploty.

Spalovací vzduch je do hořáku přiváděn nuceně pomocí ventilátoru a vzduchového potrubí. Spalovací vzduch nebyl při provedených zkouškách přehříván. Ventilátor je vybaven frekvenčním měničem umožňujícím řízení dodávky spalovacího vzduchu. Přívod spalovacího vzduchu je osazen měřením průtoku a teploty spalovacího vzduchu.

K analýze spalin slouží analyzátor TESTO 350XL s předchlazením spalin před vstupem na senzory. Analyzátor je osazen elektrochemickými senzory pro měření koncentrace O<sub>2</sub>, CO, NO a NO<sub>2</sub>. Spaliny jsou odebírány v kouřovodu přibližně 2,5 m za výstupem ze spalovací komory. Data z analyzátoru jsou svedena do ovládacího PC.

Ke sběru dat slouží PC s ovládacím softwarem, který shromažďuje data ze všech dálkových senzorů umístěných na zkušebním zařízení. Ovládací SW zaznamenává data automaticky v časovém intervalu 1 sekunda, dvě minuty a případně na povel operátora. V daném případě měření byl používán záznam na povel operátora a automatické zaznamenávání sloužilo pouze jako záloha a pro vyhodnocování termodynamicky ustáleného stavu.

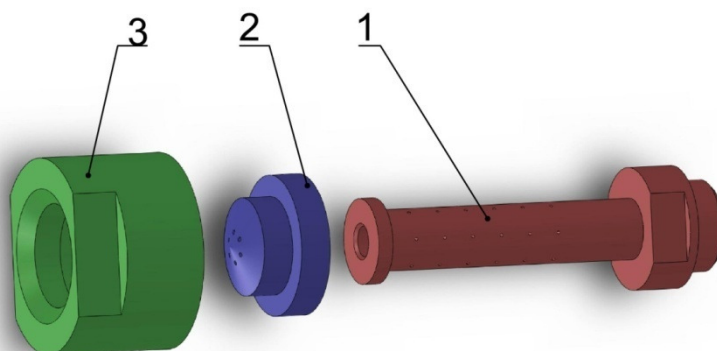


Obr. 33 Zkušební zařízení

- 1) Spalovací komora, 2) Inspekční otvory, 3) Hořák, 4) Plynová část hořáku, 5) Olejová část hořáku, 6) Stabilizační hořák, 7) Přívod spalovacího vzduchu

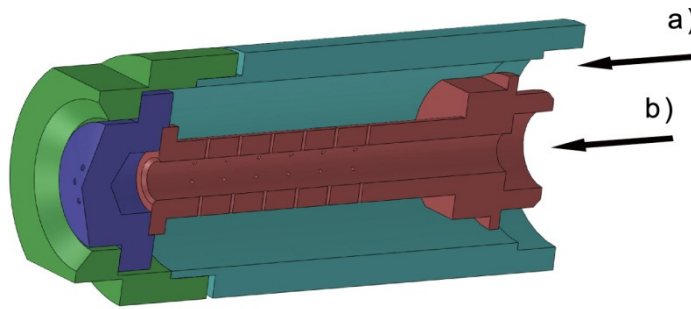
### 8.1.1 Popis použitého atomizéru

Zkoušky byly provedeny s olejovým hořákem s effervescentním atomizérem o maximálním výkonu 120 kg/h. Olejový hořák je tvořen dvěma soustřednými trubkami, kde vnitřní trubkou proudí palivo a mezikružím mezi vnitřní a vnější trubkou proudí atomizační vzduch. V hlavě hořáku (atomizéru) dochází k smísení atomizačního vzduchu s palivem, resp. nasycení paliva atomizačním vzduchem. Vnitřní část směšovací komory má průměr 10 mm a je opatřena 40 aeračními otvory o průměru 0,8 mm. Otvory jsou umístěny po obvodu po 90° po deseti v řadě. Ze směšovací komory proudí směs přes výstupní trysky, které tvoří 6 otvorů o průměru 1 mm s úhlem rozevření 30°. Ve výstupních tryskách dojde k prudkému nárůstu rychlosti a následně k atomizaci kapaliny za tryskou. Konstrukce atomizéru je zobrazena na obr. 34 a, b. Obr. 35 dokumentuje reálné provedení atomizéru.



Obr. 34a Model effervescentního atomizéru použitého při zkouškách v rozloženém stavu, 1) Směšovací část, 2) Výstupní tryska, 3) Převlečná matice





Obr. 34b Model effervescentního atomizéru použitého při zkouškách ve složeném stavu (řez),  
a) Atomizační vzduch, b) Palivo



Obr. 35 Effervescentní atomizér použitý při zkouškách

## 8.2 Plán zkoušek kapalných biopaliv

Cílem zkoušek bylo srovnání spalovacích vlastností kapalného biopaliva a fosilního paliva z hlediska kvality atomizace, kvality spalování a geometrických charakteristik plamene při různých provozních stavech.

Provozní stavy byly charakterizovány:

1. Výkonem hořáku: 475 kW, 700 kW, 900 kW
2. Poměrem atomizačního media a paliva (GLR): 20 %, 15 %, 10 %
3. Použitým palivem: Nafta, MEŘO 30 °C, 70 °C a 110°C

Celkový počet provozních stavů je tedy 36, přičemž při každém z těchto provozních stavů byly zaznamenávány vybrané hodnoty a to celkem 5krát v 30vteřinových intervalech. Do vyhodnocovacích tabulek byla uvedena průměrná hodnota spočtená z těchto pěti hodnot. Sběr dat byl proveden po ustálení výstupní teploty ve spalínovodu. V každém provozním stavu byla také provedena zkouška stability spalování po vypnutí stabilizačního hořáku.

Pro účely posuzování jednotlivých hledisek spalování a zpětnou kontrolu správnosti nastavení byly zaznamenávány tyto parametry:

- Úlet nespáleného paliva ve spalovací komoře
- Stabilita spalování (uhasínání, pulzace nebo utržení plamene)
- Stabilita spalování po vypnutí stabilizačního hořáku



- Složení spalin ( $O_2$ , CO,  $NO_x$ )
- Teplota spalin ve spalínovodu
- Viditelný průměr a délka plamene
- Průtok, tlak a teplota paliva
- Průtok, teplota a tlak atomizačního vzduchu
- Průtok, teplota a tlak spalovacího vzduchu

Měření bylo prováděno při 6 % kyslíku v suchých spalinách. Spalovací vzduch byl přiváděn pomocí ventilátoru z okolí zkušebny a nebyl předehříván, jeho teplota tedy přibližně odpovídala venkovní teplotě.

### 8.3 Popis průběhu experimentu

Před započítáním vlastní zkoušky byla zprovozněna všechna přídatná zařízení, jako je předehřev paliva, chlazení spalovací komory, kompresor na tlakový vzduch, přívod zemního plynu k hořáku a systém dávkování kapalného paliva.

Před spuštěním olejového hořáku bylo provedeno vyhřátí spalovací komory tak, aby teplota ve spalínovodu (T09) byla přibližně konstantní. Poté byl odstaven plynový hořák a spuštěn přívod paliva do olejového hořáku. Plamen byl zapálen a stabilizován pomocí stabilizačního hořáku. Dále byly nastaveny parametry spalování dané plánem zkoušek (viz 8.2), a to požadovaný výkon (nastavování pomocí objemového průtoku paliva), požadovaný přebytek spalovacího vzduchu (6 %  $O_2$  v suchých spalinách) a požadované GLR.

Po opětovném ustálení teploty ve spalínovodu (T09) bylo provedeno 5 měření po 30 sekundách. Průměr plamene byl stanoven vizuálním porovnáním s vnitřním průměrem spalovací komory (1000 mm) a délka plamene byla určena srovnáním plamene s bočními průhledítky rozmístěnými po délce komory po 500 mm. Po zaznamenání všech hodnot byl krátkodobě odstaven stabilizační hořák a provedena vizuální kontrola stability spalování. Naměřená data byla následně zpracována do tabulek (příloha 1, příloha 2).

#### 8.3.1 Odchytky od plánovaného průběhu

Prakticky nelze nastavit přesné požadované hodnoty průtoku medií, proto vždy existuje určitý rozdíl mezi plánovanými a reálnými (zpětně dopočtenými) hodnotami výkonu, GLR a přebytku vzduchu. Odchytky reálných parametrů od plánovaných jsou do 5 %, což je z hlediska řešené problematiky přesnost dostatečná.

Byla zjištěna drobná nepřesnost měření manometru P233 udávající tlak atomizačního vzduchu před hořákem. Tento tlak musí být vždy mírně vyšší než tlak paliva před hořákem měřený manometrem P229, jehož přesnost byla ověřena pomocí lokálního analogového manometru. Hodnoty udávané manometrem P233 přibližně o 2 % nižší, než hodnoty skutečné. Na vyhodnocení experimentu nemá tato odchylka žádný vliv.

Dále byla zjištěna nepřesnost teploměru T205, který udává hodnoty přibližně o 20 % vyšší, než reálné. Reálné teploty paliva byly tedy nastavovány podle lokálního teploměru.

### 8.4 Vyhodnocení experimentu

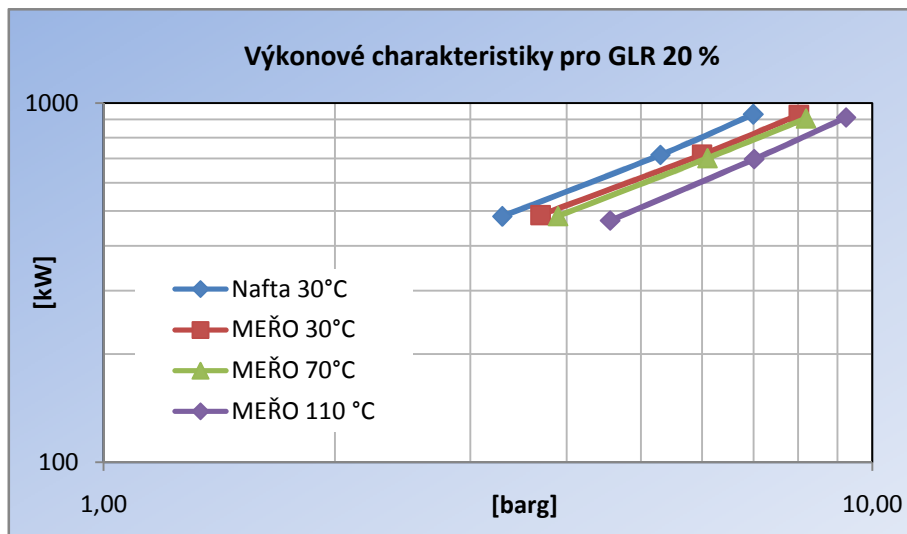
Vyhodnocení experimentu zahrnuje zpracování a zhodnocení výkonových charakteristik hořáku pro jednotlivá paliva a GLR, vyhodnocení závislosti emisí  $NO_x$  a CO na jednotlivých

provozních parametrech a provedení celkového srovnání chování atomizéru při spalování motorové nafty a MEŘO.

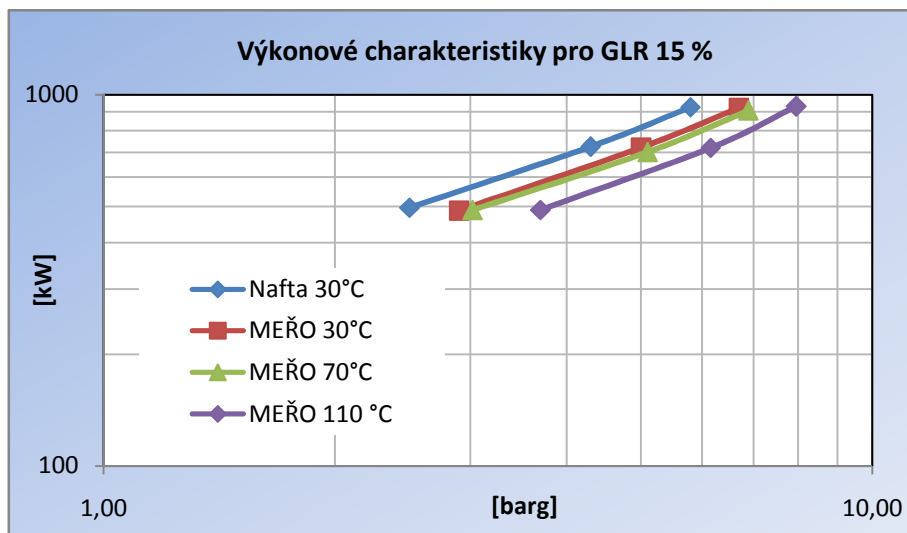
#### 8.4.1 Výkonové charakteristiky

Z tabulkových dat byly vypracovány výkonové charakteristiky pro jednotlivá paliva. Je patrné, že se zvyšující se teplotou se snižuje výkon hořáku při konstantním tlaku paliva, resp. při zachování výkonu je potřeba vyšší tlak před hořákem. Tento trend je způsobený snižováním hustoty MEŘO a tedy větším objemovým průtokem.

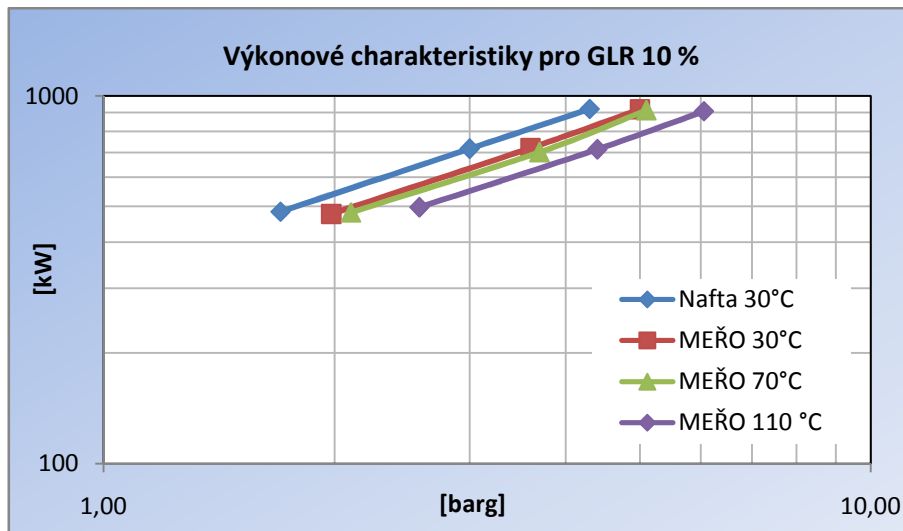
Se zvyšováním teploty se také snižuje viskozita paliva, což by způsobilo opačný efekt, avšak dle měření je tento vliv méně výrazný.



Obr. 36 Výkonové charakteristiky pro GLR 20 %



Obr. 37 Výkonové charakteristiky pro GLR 15 %



Obr. 38 Výkonové charakteristiky pro GLR 10 %

### 8.4.2 Závislost koncentrace NO<sub>x</sub> a CO na výkonu hořáku

Z tabulkových dat byly sestaveny grafy závislostí koncentrace emisí NO<sub>x</sub>, resp. CO ve spalinách. Koncentrace jsou vyjádřeny v mg/m<sup>3</sup> a jsou přepočteny na 3 % O<sub>2</sub> v suchých spalinách, aby byly jednoduše srovnatelné s legislativně danými hodnotami.

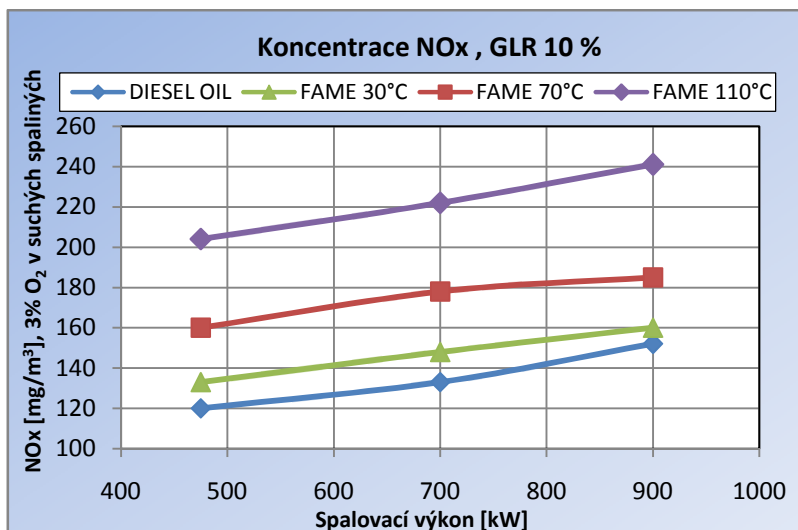
#### Vyhodnocení závislosti emisí NO<sub>x</sub>

Při spalování MEŘO dochází k větší tvorbě emisí NO<sub>x</sub> než při spalování nafty. Koncentrace NO<sub>x</sub> ve spalinách se dále zvyšuje se zvyšující se teplotou předehřevu paliva a se zvyšujícím se GLR. Tuto závislost lze vysvětlit vyšší tvorbou termických NO<sub>x</sub> u MEŘO, kde je vyšší adiabatická teplota plamene. Zvyšující se teplota předehřevu MEŘO a vyšší GLR způsobuje zvýšení teploty plamene. U MEŘO dochází k tvorbě zóny s vyšší teplotou plamene důsledkem strmé destilační křivky, která způsobuje odpaření většiny paliva v jedné části spalovací komory. Dochází k intenzivní lokální oxidaci a tvorbě míst s významně vyšší teplotou. Tyto horké zóny jsou typickým zdrojem termických NO<sub>x</sub> (viz. 5.7.3).

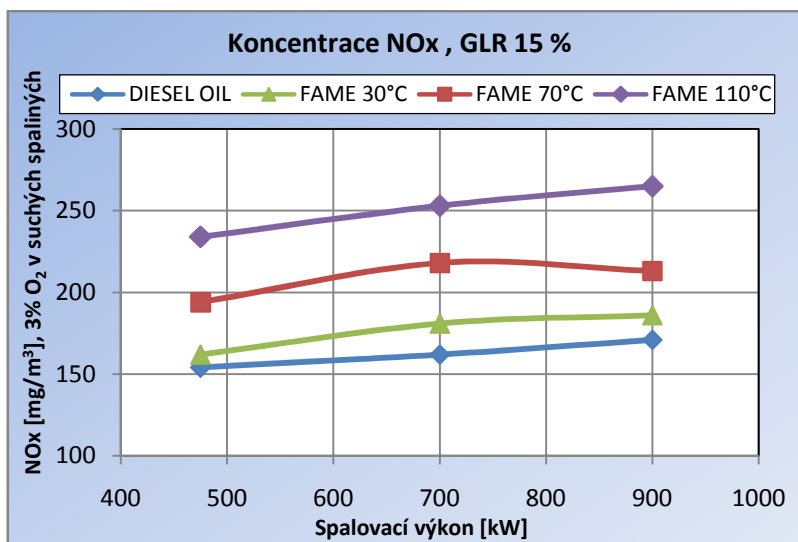
S vyšším spalovacím výkonem se emise NO<sub>x</sub> většinou zvyšují, protože se zvyšuje také teplota spalin. Závislost není tak výrazná jako u předehřevu paliva, protože se zvýšením hodnoty výkonu o 89 % (ze 475 kW na 900 kW) došlo ke zvýšení koncentrace NO<sub>x</sub> maximálně o 18 % (GLR 10 %, MEŘO 110 °C), v některých případech dochází dokonce k poklesu koncentrace NO<sub>x</sub> mezi výkony 700 kW a 900 kW (GLR 15 %, MEŘO 70 °C). Závislosti jsou zobrazeny na obr. 39–41.

#### Vyhodnocení závislosti emisí CO

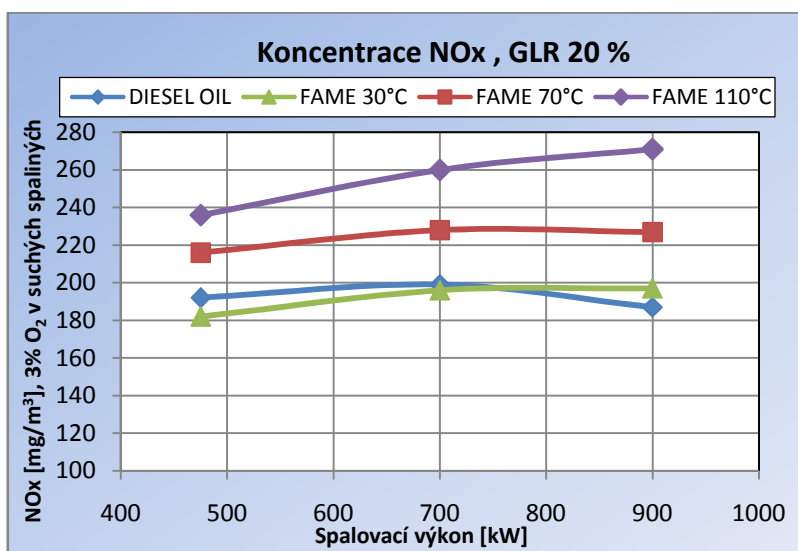
Emise CO jsou ve všech provozních stavech na velmi nízké úrovni. Při spalování MEŘO byly naměřeny nižší koncentrace než u nafty, avšak kromě GLR 15 % nejsou rozdíly významné. Při spalování nafty s GLR 10 % a výkonu 475 kW byly emise CO vyšší, což je patrně způsobeno malými průtoky medií, které způsobí snížení kvality atomizace a zhoršení promíchání paliva se vzduchem. I v tomto provozním stavu však byly emise CO na přijatelné úrovni. U nafty se koncentrace CO se zvyšováním výkonu mírně snižovala, obzvláště v oblasti nízkých výkonů a malých GLR. U MEŘO nebyla závislost emisí CO na výkonu hořáku patrná. Závislosti jsou zobrazeny na obr. 42–44.



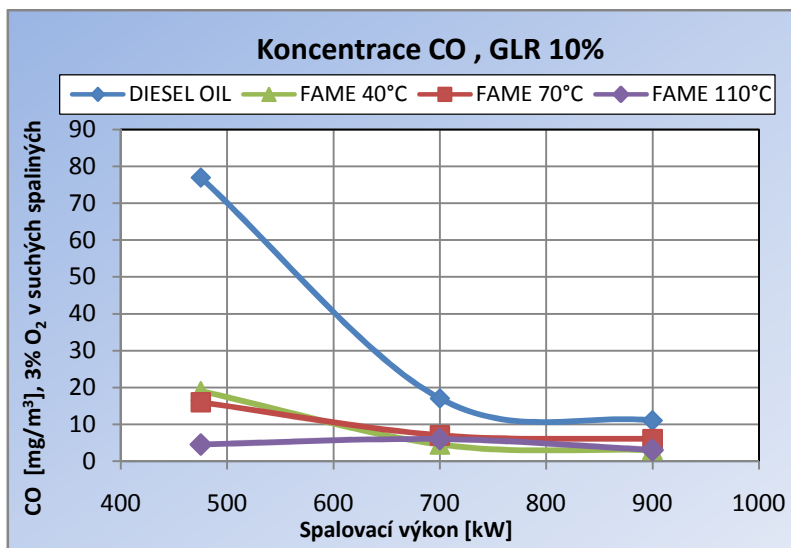
Obr. 39 Závislost koncentrace NOx na tepelném výkonu hořáku, GLR 10 %



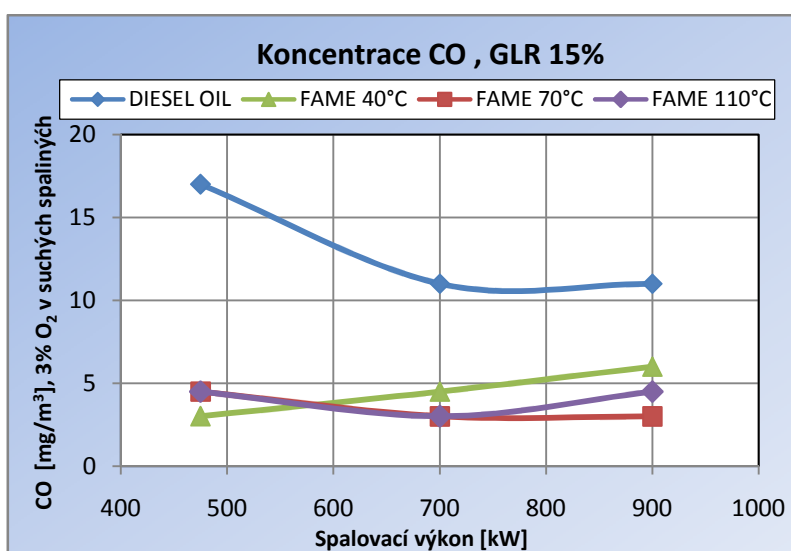
Obr. 40 Závislost koncentrace NOx na tepelném výkonu hořáku, GLR 15 %



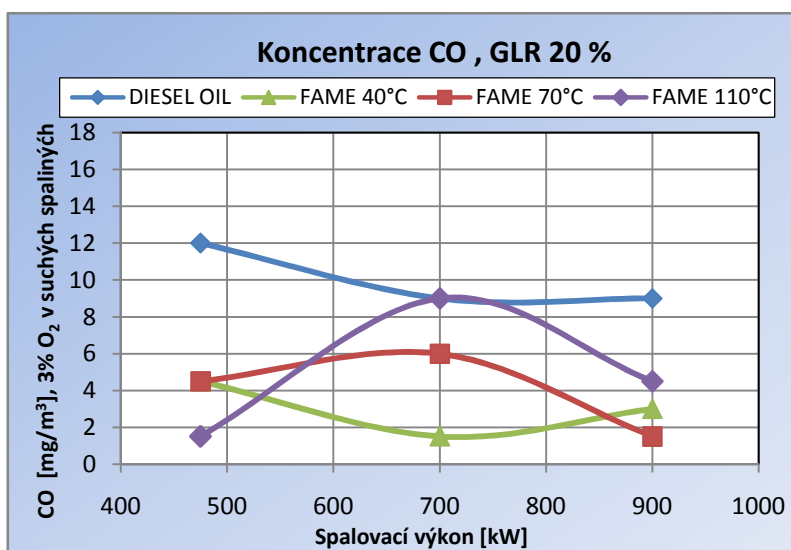
Obr. 41 Závislost koncentrace NOx na tepelném výkonu hořáku, GLR 20 %



Obr. 42 Závislost koncentrace CO na tepelném výkonu hořáku, GLR 10 %



Obr. 43 Závislost koncentrace CO na tepelném výkonu hořáku, GLR 15 %



Obr. 44 Závislost koncentrace CO na tepelném výkonu hořáku, GLR 20 %

### 8.4.3 Celkové srovnání chování atomizéru při spalování nafty a MEŘO

Pro daný výkon byl potřebný tlak paliva před hořákem u MEŘO vyšší než u nafty, protože vlivem nižší výhřevnosti MEŘO bylo nutné dodávat větší průtoky paliva. S rostoucí teplotou se tlak zvyšoval, protože se snižovala hustota paliva a objemový průtok tryskou rostl (viz výkonové charakteristiky).

U nafty se při výkonu 475 kW a GLR 10 % projevilo nedokonalé spalování v podobě zvýšení koncentrace CO. U MEŘO byly nejnižším výkonu (475 kW) pozorovány problémy se stabilitou plamene. Tyto problémy jsou s velkou pravděpodobností způsobeny malými průtoky medií, zvláště spalovacího vzduchu, který nezajišťuje dostatečné víření. Při vyšších výkonech a teplotách byla stabilita spalování lepší.

Spalování MEŘO produkuje více emisí NO<sub>x</sub> než spalování nafty, přičemž zvýšení teploty a GLR způsobilo další zvýšení NO<sub>x</sub>. Příčina je patrně ve vytváření žhavých zón v jádře plamene a zvýšeném vzniku termických NO<sub>x</sub> v těchto oblastech.

Emise CO byly ve všech provozních stavech na velmi nízké úrovni, kromě nafty při 475 kW, GLR 10 %, kdy emise CO dosáhly hodnoty cca 77 mg/m<sup>3</sup>. Se zvyšováním výkonu hořáku (průtoku paliva) se emise CO mírně snižovaly.

U nafty byla zjištěna jednoznačná závislost délky plamene na GLR, kde se snižováním GLR rostla délka viditelného plamene. To je způsobeno zhoršením kvality atomizace u nižších GLR. Délka viditelné části plamene u MEŘO byla celkově menší a závislost na GLR se neprojevila nijak jednoznačně. Délka plamene se zmenšuje s rostoucí teplotou předehřevu paliva. Z uvedených závislostí bylo odvozeno, že významnější roli než jemnost spreje vytvářeného atomizérem, má teplota předehřevu paliva. Čím menší je rozdíl mezi teplotou vzplanutí paliva a teplotou paliva přiváděného do hořáku, tím rychleji dojde k odpaření paliva a jeho zapálení.

Teplota spalin v ústí kouřovodu (T09) se u nafty snižovala se snižováním GLR, vyšší výkony měly na teplotu spalin opačný účinek. Teplota spalin byla u MEŘO vyšší než u nafty, avšak nebyla zde jednoznačná závislost teploty spalin na GLR. Na změnu teploty spalin měla vliv jednak změna rozměrů plamene (rozložení teplot po délce spalovací komory) a také změna adiabatické teploty spalování. Poměr obou vlivů nelze z naměřených dat s jistotou určit.

Celkově byly rozdíly ve spalovacích charakteristikách obou paliv poměrně malé, a chování atomizéru bylo u obou paliv z posuzovaných hledisek podobné. Významný rozdíl lze očekávat v rozložení teplotního pole plamene po délce spalovací komory vlivem rozdílných destilačních křivek. U MEŘO dochází k odpaření většiny paliva v úzkém teplotním rozmezí 300–330 °C, což může způsobit nerovnoměrné zatížení teplosměnných ploch zařízení.

## 9 ZÁVĚR

Zvyšující se spotřeba energií v kombinaci s problematickým využíváním fosilních paliv v budoucnosti si žádá hledání nových přístupů ve výrobě energie. Před zavedením konkrétních zdrojů a technologií do praxe je potřeba technologie podrobit detailnímu průzkumu z pohledu ekologického, ekonomického a také technického. Cílem této práce bylo posouzení použitelnosti kapalných biopaliv jako zdroje pro jednotky menších tepelných výkonů z pohledu vybraných spalovacích charakteristik.

V úvodu práce byly nadefinovány pojmy týkající se problematiky spalování kapalných paliv. Dále bylo provedeno shrnutí základních fyzikálních zákonů a byly uvedeny základní výpočetní vztahy používané v této oblasti.

Další část práce byla zaměřena na rešerši kapalných biopaliv užívaných na území ČR. Byly popsány základní druhy fosilních kapalných paliv a byl stručně popsán způsob jejich výroby. Následně byla popsána základní kapalná biopaliva používaná na našem území, a to metylester řepkového oleje (MEŘO) a biolih. V této části jsou uvedeny vlastnosti obou paliv, způsoby jejich výroby, energetická náročnost výroby a nároky na ornou půdu. V závěru kapitoly jsou uvedena některá jiná potenciálně využitelná kapalná biopaliva.

Dále byla provedena rešerše v oblasti průmyslových hořáků. Bylo uvedeno jejich rozdělení podle různých kritérií, popsány základní části hořáků a byly popsány základní konstrukční varianty.

V závěru teoretické části je podrobněji rozebrána problematika atomizace kapalných paliv. Jsou zde uvedeny základní podmínky a vlastnosti paliva ovlivňující kvalitu atomizace a jsou popsány jednotlivé druhy atomizérů používaných v praxi s důrazem na pneumatické atomizéry.

Před zahájením vlastního experimentu bylo nutné zjistit základní vlastnosti paliv. V rámci této práce bylo provedeno vyhodnocení hustoty MEŘO a nafty u konkrétních vzorků paliv. Dále bylo provedeno měření viskozity MEŘO, kde bylo zjištěno neneutonské chování paliva, což komplikuje použití běžně používaných metod stanovení viskozity paliv.

Vlastní náplní praktické části práce byla příprava plánu a provedení srovnávacích zkoušek s fosilním palivem a vybraným biopalivem. Bylo provedeno měření s naftou při teplotě 30 °C a stejné měření s MEŘO při teplotě 30 °C, 70 °C a 110 °C. Při zkouškách byl použit olejový hořák s effervescentní atomizací. Naměřená data byla zpracována do tabulek a bylo provedeno srovnání obou paliv a vyhodnocení nalezených závislostí. Effervescentní atomizér rozprašoval dostatečně kvalitně u obou paliv, spalování bylo až na určité krajní stavy stabilní. Lze pozorovat určité rozdíly v chování plamene u nafty a u MEŘO způsobené rozdílnými vlastnostmi. Zejména se jedná o rozměry viditelného plamene (MEŘO – menší rozměry), rozdíly v teplotě spalin v kouřovodu (MEŘO – vyšší teplota) a rozdíly ve výkonové charakteristice (MEŘO vyžaduje vyšší tlaky před hořákem). Celkově lze konstatovat, že pozorované spalovací charakteristiky obou paliv jsou velmi podobné a MEŘO se jeví z tohoto pohledu jako použitelný zdroj energie pro jednotky menších spalovacích výkonů.

Z hlediska komplexního posouzení vhodnosti MEŘO jako energetického zdroje pro konkrétní aplikace by bylo vhodné provést detailnější posouzení, zejména srovnání rozložení tepelného zatížení teplosměnných ploch, srovnání kouřivosti např. dle Bacharacha případně zkoušky zapalitelnosti paliva elektrickým jiskrovým zapalováním. Následně by bylo vhodné upravit geometrii atomizéru tak, aby co nejlépe vyhovoval specifickým vlastnostem MEŘO. Nutný by byl také detailní rozbor ekonomické stránky takového řešení s přihlédnutím k ceně paliva a investičním nákladům na technologii.

## 11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- (1) British Petroleum. *Statistical Review of World Energy 2010*. Online: 2010. Citace: 20. 12 2010. Dostupné z: <http://www.bp.com/statisticalreview>.
- (2) Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Národní program hospodárného nakládání s energií a využívání jejích obnovitelných a druhotných zdrojů*. Online: 16. 1 2006. Citace: 23. 12 2010. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument6742.html>.
- (3) KADRNOŽKA, Jaroslav. *Globální oteplování země*. 1. vyd. Brno : VUTIUM.2008. ISBN 978-80-214-3498-1.
- (4) CÍLEK, Václav - KAŠÍK, Martin. *Nejistý plamen*. 1. vyd. Praha : Dokořán. 2008. ISBN 978-80-7363-218-2.
- (5) BECHNÍK, Bronislav. *Konkurenceschopnost obnovitelných zdrojů energie*. Online: 29. 6 2009. Citace: 20. 12 2010. Dostupné z: <http://energie.tzb-info.cz/energeticka-politika/5751-konkurenceschopnost-obnovitelnych-zdroju-energie>.
- (6) Wikipedia. *Spalování*. Online: 3. 6 2010. Citace: 2. 1 2011. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalov%C3%A1n%C3%AD>.
- (7) PERRY, H. John. *Chemical Engineer's Handbook*. 4th edition. New York : McGraw-Hill Book Company. 1963. LCCN 61-13168.
- (8) ZÁMOSTNÝ, Petr. *Bezpečnost chemických výroby: Rizika spojená s hořlavými látkami*. Prezentace on-line. Citace: 9. 1 2011. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/N111001-p-004/prezentace.ppt>.
- (9) STEINLEITNER, Hans-Dieter. *Tabulka hořlavých a nebezpečných látek*. Berlín: Staatdruckerei der Deutschen Demokratischen republik. 1980. Český překlad: Novotný V. - Benda E. Svar požární ochrany ČSSR.
- (10) Paramo, a.s. *Bezpečnostní list: Bezolovnaté automobilové benzíny*. Online: 10. 08 2005. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: [http://www.biokont.cz/images/1169746260\\_sb\\_autobenzin\\_24\\_.pdf](http://www.biokont.cz/images/1169746260_sb_autobenzin_24_.pdf).
- (11) Paramo, a.s. *Bezpečnostní list: Motorová nafta B, D, F*. Online: 01. 06 2007. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: [http://www.biokont.cz/images/bl\\_motorova\\_nafta.pdf](http://www.biokont.cz/images/bl_motorova_nafta.pdf).
- (12) Česká rafinářská, a.s. *Naše výrobky*. Citace: 15. 1 2011. Dostupné z: <http://www.ceskarafinerska.cz/cz/nase-vyrobky.aspx>.
- (13) BABINEC, František. *Aplikovaná fyzikální chemie*. Brno : Vysoké učení technické v Brně. 1991. ISBN 80-214-0367-5.
- (14) Výzkumné energetické centrum, VŠB-Technická univerzita ostrava. *Kinetika spalovacích reakcí*. Online. Citace: 15. 2 2011. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/kinetika.pdf>
- (15) PITZ, J. Wiliam. *Combustion Chemistry. Physical and Life Sciences Directorate*. Online: 8. 2 2011. Citace: 10. 3 2011. Dostupné z: [https://www-pls.llnl.gov/?url=science\\_and\\_technology-chemistry-combustion](https://www-pls.llnl.gov/?url=science_and_technology-chemistry-combustion).
- (16) BAUKAL, E. Charles. *Industrial burners handbook*. 1st edition. New York : CRC Press LLC, 2004. ISBN 0-8493-1386-4.



- (17) Wikipedia. *Palivo*. Online: 26. 7 2010. Citace: 10. 11 2010. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Palivo>.
- (18) Úřad vlády ČR. *Zpráva nezávislé odborné komise pro posouzení energetických potřeb České republiky v dlouhodobém časovém horizontu*. Online. Praha :, 2008. Citace: 2.1.2011. Dostupné z: <http://www.vlada.cz/assets/media-centrum/aktualne/Pracovni-verze-k-oponenture.pdf>
- (19) BLAŽEK, Josef- RÁBL, Vratislav. *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vyd. Praha : VŠCHT Praha. 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- (20) Wikipedia. *Alkany*. Online: 2. 11 2010. Citace: 6. 1 2011. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Alkany>.
- (21) Paramo, a.s. *Topné oleje*. [Online] [Citace: 15. 1 2010.] <http://www.paramo.cz/cs/nabidka-produktu/topne-oleje/>.
- (22) Petroleum.cz. *Topné oleje*. Online: 2011. Citace: 10. 3 2011. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/topne-oleje.aspx>.
- (23) Český statistický úřad. *Souhrnná energetická bilance ČR*. Online. Citace: 28. 3 2011. Dostupné z: [http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislotab=E NE0020UU&&kapitola\\_id=34](http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislotab=E NE0020UU&&kapitola_id=34).
- (24) SOUČEK, Jiří. *Výroba a užití kapalných biopaliv*. Online: 1. 3. 2006. Citace: 19. 1. 2011. Dostupné z: [http://www.scienceshop.cz/attachments/HOL-Texty\\_biopal.doc](http://www.scienceshop.cz/attachments/HOL-Texty_biopal.doc).
- (25) Český statistický úřad. *Osevní plochy zemědělských plodin*. Tabulka online: 2. 18 2010. Citace: 14. 2 2011. Dostupné z: [http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/zem\\_cr](http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/zem_cr).
- (26) Český statistický úřad. *Sklizeň zemědělských plodin*. Online: 18. 2 2010. Citace: 14. 2 2011. Dostupné z: [http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/zem\\_cr](http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/zem_cr).
- (27) JEVIČ, Petr. *Energetická bilance a životní cykly biogenních pohonných hmot – 2*. Biom.cz. Online: 15. 11 2010. Citace: 24. 01 2011. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticka-bilance-a-zivotni-cykly-biogennich-pohonných-hmot-2>.
- (28) Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Statistiky*. Online. Citace: 26. 01 2011. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/cz/energetika-a-suroviny/statistiky-energetika/#category453>.
- (29) PLP a.s., Trmice. *Kvasný líc - Bioethanol, Podniková norma PN 10-PLP-07*. Online: 2007. Citace: 25.1.2011. Dostupné z: [http://www.plp.cz/data/PND\\_bioethanol.pdf](http://www.plp.cz/data/PND_bioethanol.pdf)
- (30) MELZOCH, Karel - RYCHTERA, Mojmír. *Lihovarnictví a výroba lihovin: Syllabus k předmětu*. Online: 14. 05 2010. Citace: 26. 01 2011. Dostupné z: [http://eso.vscht.cz/cache\\_data/1174/www.vscht.cz/kch/kestazeni/sylaby/liho.pdf](http://eso.vscht.cz/cache_data/1174/www.vscht.cz/kch/kestazeni/sylaby/liho.pdf).
- (31) KLASS, Donald. *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*. Illinois: Entech International, Inc. 1998. ISBN 0-12-410950-0.
- (32) GNANSOUNOU A.- DAURIAT E. *Energy balance of bioethanol: A synthesis*. ENERS Energy Concept. Online. Citace: 2. 2 2011. Dostupné z: [http://www.eners.ch/downloads/eners\\_0510\\_ebce\\_paper.pdf](http://www.eners.ch/downloads/eners_0510_ebce_paper.pdf).
- (33) Biofuels platform. *Production of bioethanol in the EU*. Online. Citace: 2. 2 2011. Dostupné z: <http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/eu-bioethanol.php>.
- (34) Petrol.cz. *Biobutanol jako kvalitní náhrada benzínu*. Online: 20. 05 2010. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: <http://www.petrol.cz/alternativa/clanek.asp?id=13844>.

- (35) LAURIN, Josef. *Rostlinné oleje jako motorová paliva*. Biom.cz. Online: 29. 10 2010. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/roslinne-oleje-jako-motorova-paliva>.
- (36) Jan Horák. *Surová glycerinová fáze - GVS.HHcorporation*. Online. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: <http://www.hhcorp.cz/glycerinova-faze/default.htm>.
- (37) CZERNICHOWSKI, Albin a kol. *Waste glycerol konversion into syngas*. Online: 2008. Citace: 07. 02 2011. Dostupné z: <http://albin.czernichowski.pagesperso-orange.fr/ECP/Gly%20preprint.pdf>.
- (38) RYCHTERA, Mojmír a kol. *Lihovarství, droždářství a vinařství*. 1. vyd. Praha: VŠCHT Praha. 1986. Č. publikace: 440-33749.
- (39) Wikipedia. *Fisher-Tropschova syntéza*. Online: 30. 03 2010. Citace: 30. 01 2011. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Fisher-Tropschova\\_synt%C3%A9za](http://cs.wikipedia.org/wiki/Fisher-Tropschova_synt%C3%A9za).
- (40) The Carbo-V process. [Online] Choren. [Citace: 30. 01 2011.] <http://www.choren.com/en/carbo-v/carbo-v/>.
- (41) BAUKAL E. R. Charles - SCHWARTZ E. *The John Zink Combustion Handbook*. New York : CRC Press, 2001. ISBN 978-0-8493-2337-9.
- (42) DIZ Bohemia. *Práškové hořáky*. Online. Citace: 10. 02 2011. Dostupné z: [http://www.dizbohemia.cz/burner\\_cz.html](http://www.dizbohemia.cz/burner_cz.html).
- (43) BAYVEL, L.-ORZECOWSKI, Z. *Liquid Atomization*. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 1993. ISBN 0891169598.
- (44) MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. 4. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně. 2004. ISBN 80-214-2640-3.
- (45) LEFEBVRE, H. Arthur. *Atomization and Sprays*. Boca Raton : CRC Press, 1989. ISBN 0-89116-603-3.
- (46) SOLOMON, A.S.P. *Flow and Atomization in Flashing Injectors*. Atomization and Spray Technology. č.1. 1985, Sv. 1.
- (47) TATE, R.E. a kol. *The densities of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 °C*. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Online: 2006. Citace: 25. 2 2011. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3B-4HNS7H4-1/2/4d6466cd3f2d9d9de8613bd1a79abd3c>.
- (48) HERZOG, Howard. *An Introduction to CO<sub>2</sub> Separation and Capture Technologies*. Online: 1999. Citace: 24. 2 2011. Dostupné z: [http://sequestration.mit.edu/pdf/introduction\\_to\\_capture.pdf](http://sequestration.mit.edu/pdf/introduction_to_capture.pdf).

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Nezpracovaná tabulková data ze zkoušek spalování
- Příloha 2: Zpracovaná naměřená data seřazená podle jednotlivých paliv
- Příloha 3: Bilance spalování TOEL a MEŘO
- Příloha 4: Protokol o zkoušce – zjišťování vlastností MEŘO a nafty, TÜV Nord
- Příloha 5: Destilační křivka zpracovaná Ústavem pro výzkum a využití paliv
- Příloha 6: Grafické vyjádření viskozity MEŘO a ropných paliv v závislosti na teplotě
- Příloha 7: Fotodokumentace