

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru**

diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Diplomant: Ondřej Plecháček

PRAHA 2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ondřej Plecháček

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru**

Název anglicky

**Effect of ethanol on spark ignition engine emissions**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru.

### Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Vlastní zpracování
6. Výsledky a diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

## Doporučený rozsah práce

50 stran včetně obrázků a tabulek

## Klíčová slova

zážehový motor, etanol, emise

---

## Doporučené zdroje informací

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA, – REMEK, B. Experimentální měření v dopravní technice. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03057-1.

HROMÁDKO, J. Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

MATĚJOVSKÝ, Vladimír. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2005. ISBN isbn80-247-0350-5.



---

## Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

## Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

---

Elektronicky schváleno dne 31. 1. 2020

**Ing. Martin Kotek, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 24. 02. 2020

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru* vypracoval samostatně a použil pouze pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31. 3. 2020

---

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jakubovi Maříkovi, Ph.D. za jeho pomoc, odborné rady, vstřícný přístup a konzultace během zpracování celé práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Kristýně Pimkové, Ph.D. za odborné rady z oblasti biochemie v několika kapitolách rešeršní části práce.

## **Vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru**

**Abstrakt:** Tato diplomová práce je zaměřena na použití etanolu ve spalovacích motorech automobilů. Rešeršní část práce se zabývá obecným popisem v současnosti používaných i právě vyvíjených biopaliv, jejich rozdělením podle skupenství a původu výchozí suroviny a stručným popisem jejich výroby. Následně se detailně věnuje jednomu z nich – etanolu. Popisuje jeho použití ve spalovacích motorech z technického i historického hlediska, uvádí jeho přednosti i nevýhody. Blíže popisuje postup výroby etanolu I. a II. generace, a také vstupní suroviny, které se na jeho výrobu používají.

Praktická část diplomové práce zahrnuje laboratorní měření produkce škodlivých emisí v zážehovém motoru, výkonu motoru a celkové spotřeby paliva, které má za úkol zjistit jaký vliv na tyto parametry má etanol použitý jako příměs ve směsi s motorovým benzínem. Popisuje postup měřicí metody, použité přístroje, softwarové vybavení, zpracování dat a výsledky měření.

**Klíčová slova:** Biopaliva, etanol, fermentace, emise, jízdní cyklus.

## **Effect of ethanol on spark ignition engine emissions**

**Abstract:** Presented diploma thesis encompass the use of ethanol as a biofuel in combustion engines of cars. The theoretical part of the diploma thesis provides general overview of both currently used biofuels and the development of new biofuels respectively; it classifies them according to their physical state and natural resources for their production and describes the procedure of their production. Further the review depicts one of the biofuels – ethanol. It describes the application of ethanol in combustion engines from technical as well as historical point of view, it explains its strengths and weakness as a biofuel. Further it explains the process of a manufacture of the I. and II. generation of ethanol and also natural resources used for ethanol production in detail.

The practical part of the presented diploma thesis concerns the laboratory analysis of harmful emissions production in a spark ignition engine, the performance of the engine and the overall consumption of a fuel in order to estimate the impact of ethanol addition into a petrol. The practical part also describes experimental procedures, applied instruments, a software equipment, data analysis and results of the examination.

**Key words:** Biofuels, ethanol, fermentation, emission, driving cycle.

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Metodika práce</b> .....	<b>2</b>
<b>4 Alternativní paliva pro automobilovou dopravu</b> .....	<b>3</b>
4.1 Alternativní paliva z neobnovitelných zdrojů .....	3
4.2 Alternativní paliva z obnovitelných zdrojů .....	3
<b>5 Biomasa</b> .....	<b>3</b>
<b>6 Biopaliva</b> .....	<b>4</b>
6.1 Tuhá biopaliva .....	5
6.2 Kapalná biopaliva .....	5
6.3 Plynná biopaliva .....	6
<b>7 Generace biopaliv</b> .....	<b>8</b>
7.1 Biopaliva I. generace.....	8
7.2 Biopaliva II. generace .....	8
7.3 Biopaliva III. generace .....	9
7.4 Biopaliva IV. generace.....	10
<b>8 Bioetanol</b> .....	<b>10</b>
8.1 Etanol – základní fyzikální a chemická charakteristika.....	10
8.2 Použití etanolu ve spalovacích motorech .....	12
8.2.1 Použití etanolu v zážehových motorech .....	13
8.2.2 Použití etanolu ve vznětových motorech.....	14
8.2.3 Použití etanolu ve vznětových motorech společně s motorovou naftou .....	14
8.2.4 Použití etanolu ve vznětových motorech bez motorové nafty .....	15
<b>9 Výroba bioetanolu I. generace</b> .....	<b>17</b>
9.1 Vstupní suroviny pro výrobu.....	17

9.1.1 Škrobnaté plodiny .....	17
9.1.2 Cukernaté plodiny .....	19
9.1.3 Fotosyntéza typu C4 .....	20
9.2 Technologie výroby bioetanolu ze škrobnatých plodin .....	22
9.2.1 Škrob .....	22
9.2.2 Příprava zářary ze škrobnatých surovin.....	24
9.2.2.1 Tlakový (pařákový) způsob přípravy zářary .....	24
9.2.2.2 Beztlakový způsob přípravy zářary .....	24
9.2.3 Příprava zřkvasu .....	25
9.2.4 Alkoholové kvašení (fermentace) zářary ze škrobnatých surovin .....	25
9.3 Technologie výroby bioetanolu z cukernatých plodin.....	27
9.3.1 Sacharóza.....	27
9.3.2 Zpracování cukrové řepy.....	28
9.3.3 Příprava melasové zářary .....	28
9.3.4 Alkoholové kvašení (fermentace) melasové zářary .....	29
9.4 Izolace a úpravy etanolu.....	30
9.4.1 Destilace .....	30
9.4.2 Frakční destilace (rektifikace).....	30
9.4.3 Rařinace etanolu.....	32
9.4.4 Odvodňování etanolu .....	32
<b>10 Výroba bioetanolu II. generace.....</b>	<b>33</b>
10.1 Vstupní suroviny pro výrobu.....	33
10.2 Technologie výroby bioetanolu z lignocelulózových materiálů.....	34
10.2.1 Celulóza, hemicelulóza a lignin .....	34
10.2.2 Předúprava lignocelulózových materiálů .....	35
10.2.3 Enzymatické štěpení celulózy.....	36
10.2.4 Alkoholové kvašení (fermentace) zářar z hydrolyzované celulózy.....	36
<b>11 Praktická část .....</b>	<b>38</b>
11.1 Testovací vozidlo .....	38
11.2 Palivové směsi .....	40



11.3 Použité měřicí přístrojové zařízení .....	40
11.3.1 Válcová zkušebna.....	40
11.3.2 Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C .....	41
11.3.3 Laboratorní váha Vibra AJ-6200CE.....	42
11.3.4 Emisní analyzátor VMK.....	44
11.3.5 Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 .....	45
11.3.6 Rotační termoředicí zařízení TSI Rotating Disk Thermodiluter 379020A (ředička) .....	47
11.4 Softwarové vybavení.....	47
11.4.1 Aplikace Datlab v prostředí ControlWeb .....	47
11.4.2 Diagnostický program VAG – COM (VCDS) Standard.....	47
11.4.2 Software EEPS .....	48
11.5 Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC).....	49
11.6 Metodika měření.....	51
11.6.1 Instalace vozidla a přístrojů před zahájením testovacího jízdního cyklu .....	51
11.6.2 Průběh jízdního cyklu WLTC, měření hodnot emisí, měření průběhu výkonu a točivého momentu motoru.....	52
11.7 Výsledky a jejich hodnocení.....	54
11.7.1 Průběh hodnot podílu plyných emisí.....	54
11.7.2 Průběh toku pevných částic .....	60
11.7.3 Průběh výkonu a točivého momentu motoru – vnější otáčková charakteristika.....	62
11.7.4 Spotřeba paliva během jízdních cyklů.....	66
11.7.5 Porovnání testovaných palivových směsí podle naměřených hodnot emisí, parametrů motoru a průměrné spotřeby paliva.....	67
<b>12 Závěr .....</b>	<b>70</b>
<b>13 Seznam použité literatury .....</b>	<b>72</b>
<b>14 Seznam obrázků .....</b>	<b>77</b>
<b>15 Seznam tabulek.....</b>	<b>78</b>

# 1 Úvod

V dnešní době se z důvodu neustále se zvyšujícího tlaku na snižování produkce škodlivých emisí a zmenšování světových zásob ropy, uhlí a zemního plynu stále více diskutuje o nutnosti nahrazení fosilních paliv palivy z obnovitelných zdrojů. Ačkoli se touto otázkou automobilový průmysl a k němu přidružená odvětví už nějakou dobu zabývají, nebyla stále ještě nalezena optimální alternativa ke konvenčním palivům, tedy ve smyslu úplného nahrazení fosilních paliv. Využívání ropy jako suroviny pro výrobu pohonných hmot a jejich následné využití v dopravě a různých průmyslových odvětvích má velmi negativní vliv na životní prostředí.

Na automobilový průmysl je z důvodu snižování produkce škodlivých emisí vyvíjen legislativní tlak, na který je nucen reagovat vývojem motorů, které splňují dnešní přísné emisní normy a také vývojem elektromobilů nebo motorů na alternativní paliva. Vývoj motorů na alternativní paliva a též výzkum alternativních paliv je jednou z cest, jak snížit množství produkovaných škodlivých plynů a částic uvolňovaných do atmosféry, a tím částečně omezit devastaci životního prostředí.

Do dnešní doby bylo vyvinuto poměrně velké množství typů dopravních prostředků, které jako zdroj energie k pohonu nepoužívají konvenční paliva. Jedná se o elektromobily, vozy na vodíkový pohon, vozy s motory na palivo na alkoholové bázi, na bázi esterů rostlinných olejů, nebo s motory na zemní plyn, propan-butanovou směs atd. Některé typy se ukázaly jako méně vhodné, jiné se osvědčily lépe. Stále je ale tento výzkum a vývoj na začátku možné cesty, která by mohla otočit nebo alespoň zásadně oslabit současný trend drastického poškozování ekosystému naší planety, na kterém se více méně podílí téměř všechna odvětví průmyslu a dopravy.

V této práci se budu věnovat použití etanolu jako příměsi ve směsi s klasickým motorovým benzínem, zjišťovat jeho vliv na množství produkovaných škodlivých emisí, na výkonové parametry motoru a výslednou spotřebu paliva. Etanol jsem pro tento účel vybral, protože se jedná o palivo získávané z obnovitelných zdrojů. Pokud bychom opominuli bioetanol I. generace, jehož pozitivní ekologický dopad nepovažuji za příliš zásadní, a uvažovali bychom o bioetanolu II. nebo i III. generace, mohlo by jeho širší uvedení do praxe znamenat výrazně šetrnější dopad na životní prostředí, než je tomu při používání fosilních paliv.

## **2 Cíl práce**

Cílem rešeršní části diplomové práce je nejprve přehledně popsat biopaliva, uvést jejich základní rozdělení podle skupenství i původu výchozí suroviny a stručně popsat postup jejich výroby. Jelikož téma práce je vliv etanolu na produkci emisí zážehového motoru, bude se rešeršní část detailně věnovat právě etanolu. Cílem rešerše je předložit komplexní pohled na tuto látku, který zahrnuje základní popis etanolu z fyzikálně – chemického hlediska a jeho použití ve spalovacích motorech z technického i historického pohledu. Dále rešeršní část práce detailně popíše výrobu etanolu I. a II. generace, včetně vstupních surovin, které se na jeho výrobu používají. Důvod k poměrně komplexnímu pojetí popisu etanolu, včetně bližšího popisu jeho výroby a výrobních surovin, je snaha o co možná nejširší pohled na tuto látku jako možnou alternativu ke klasickým fosilním palivům.

Cílem praktické části diplomové práce je zjištění vlivu etanolu ve směsi s motorovým benzínem na produkci škodlivých emisí v zážehovém motoru, výkonové parametry motoru a celkovou spotřebu paliva. Výsledky laboratorního měření, které bude za tímto účelem realizováno, budou zpracovány, vyhodnoceny a v závěru této práce diskutovány.

## **3 Metodika práce**

Rešeršní část diplomové práce je zpracována na základě podkladů odborné literatury pojednávající obecně o problematice biopaliv, jejich rozdělení a jejich výrobě. Dále práce vychází z podkladů, které popisují etanol, jeho použití ve spalovacích motorech, jeho výrobu a také suroviny potřebné k jeho výrobě.

Dosažení cíle praktické části diplomové práce bylo realizováno v technické laboratoři Katedry vozidel a pozemní dopravy Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze za použití testovacího vozidla, válcové zkušebny, emisního analyzátoru, částicového analyzátoru, laboratorní váhy a potřebného softwarového vybavení. Byly připraveny směsi etanolu s motorovým benzínem o různém poměrovém množství etanolu a tyto směsi byly použity v testovacím vozidle během zkušebního měření na válcové zkušebně. Během testování na válcové zkušebně byl používán jízdní cyklus WLTC třídy 3b.

Výsledky měření byly zpracovány a vyhodnoceny v praktické části této diplomové práce. Postup a metodika měření jsou podrobně popsány v kapitole 11.6.

## 4 Alternativní paliva pro automobilovou dopravu

V současné době se dostává do popředí zájmu otázka nahrazení konvenčních motorových paliv palivy, jejichž použití ve spalovacích motorech je šetrnější k životnímu prostředí. Tato alternativní paliva k motorovým benzínům a naftě získávaným z ropy můžeme rozdělit na paliva z neobnovitelných a obnovitelných zdrojů.

### 4.1 Alternativní paliva z neobnovitelných zdrojů

Alternativní paliva z neobnovitelných zdrojů jsou paliva, která jsou vyráběna ze surovin, jejichž zdroje jsou na Zemi omezené, tedy vyčerpatelné. Stejně jako ropa nebo uhlí jsou tyto suroviny organického původu a patří tedy do skupiny fosilních paliv. Jejich nevýhodou je jejich neobnovitelnost, stejně jako u ropy a uhlí, ale jejich velkou výhodou je významně menší produkce škodlivých emisí při použití ve spalovacích motorech.

Do této skupiny patří:

**Zemní plyn** (CNG – stlačený, LNG – zkapalněný).

**Propan-butan** (LPG) – směs plynů získávaných při rafinaci ropy, jedná se o ropný produkt.

### 4.2 Alternativní paliva z obnovitelných zdrojů

Do této skupiny patří paliva, jejichž zdroje nejsou na rozdíl od fosilních paliv limitované. V současné době je to oblast, kam se z důvodu obnovitelnosti zdrojů, a také menšího dopadu na životní prostředí, upíná mnoho pozornosti.

Do této skupiny patří:

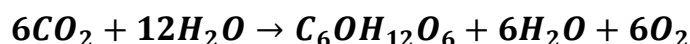
**Vodík** – stlačený, zkapalněný, v pevné bázi – hydridy.

**Biopaliva** – etanol, bionafta, butanol, metanol, bioplyn, dřevoplyn atd.

## 5 Biomasa

Biomasa se označuje souhrn všech látek organického, tedy rostlinného nebo živočišného původu. Všechny tyto látky na planetě Zemi jsou na bázi uhlovodíkových sloučenin. Primární zdroj energie, která umožňuje vznik těchto sloučenin, je energie slunečního

záření. Ta se přeměňuje na energii chemických vazeb vytvářených uhlovodíkových molekul při chemickém procesu zvaném fotosyntéza [1], jež lze vyjádřit sumární rovnicí:



Při fotosyntéze dochází k chemické reakci mezi vzdušným oxidem uhličitým a vodou, za přispění chlorofylu jako katalyzátoru a slunečního záření jako vstupní energie. Jde o řadu chemických reakcí [2], na jejichž konci je jedním z produktů monosacharid glukóza, který dále polymeruje na polysacharid celulózu, jež je základním stavebním prvkem všech rostlin. A právě energii chemických vazeb těchto vytvořených uhlovodíkových řetězců lze následně z biomasy uvolnit. Při spalování (prudké oxidaci), ale i během dalších chemických reakcí, se chemické vazby mezi atomy v uhlovodíkových molekulách a polymerech rozrušují. Tím se uvolňuje energie, a tuto energii ve formě tepla lze přeměnit na mechanickou energii, a v případě potřeby na elektrickou. energii lze takto získávat přímo z primární suroviny, ale je též možné z ní vytvořit různé produkty, které se pak dále dají využívat jako zdroje energie.

Pokud hovoříme o biomase z pohledu využití její energie v dopravě, v energetickém odvětví, nebo i jiných odvětvích, může se jednat o biologický odpad, ale též o cíleně pěstované plodiny, obojí lze následně využívat k získávání energie. energii je možné z biomasy uvolňovat například spalováním, nebo ji lze ve formě tepelné energie odebírat z chemických procesů, které probíhají ve vhodně zvoleném druhu biologického materiálu například při kompostování. Biomasa se dá dále zpracovávat a vyrábět z ní paliva, která nacházejí uplatnění v automobilovém i energetickém průmyslu. Tato paliva se vzhledem ke svému původu označují jako **biopaliva**.

## 6 Biopaliva

Hlavním důvodem k současnému trendu vývoje nových technologií v oblasti výroby a použití biopaliv je nejenom snížení závislosti na ropných produktech, ale také snížení produkce oxidu uhličitého a dalších škodlivých plynů, které vznikají při spalování konvenčních fosilních paliv. Výroba a využití biopaliv, jejichž vstupní surovinou je biomasa rostlinného i živočišného původu, se z dnešního pohledu jeví jako jedna z cest, která by problémy, které s sebou využívání fosilních paliv nese, mohla částečně pomoci vyřešit, nebo alespoň zmírnit.

Z biomasy lze vyrábět za použití různých procesů paliva o pevném, kapalném i plynném skupenství.

## 6.1 Tuhá biopaliva

Tuhá biopaliva rostlinného a živočišného původu využívá k topení lidstvo už od pradávna, ať už jde o dřevo, slámu, živočišný lůj, sušené zvířecí exkrementy atd. Tuhá biopaliva jsou v dnešní době nejvíce využívána pro získávání tepla na topení. V automobilovém průmyslu se dnes už nevyužívají, ale ve 20. až 40. letech 20. století byly hojně používány automobily s generátorem na dřevoplyn, kde vstupní surovinou bylo dřevo, kterým se generátor plnil [3]. V generátoru se tvořil dřevoplyn, který byl přiváděn do standardního benzínového motoru, ve kterém byl spalován.

Mezi suroviny, které se používají k přípravě tuhých paliv, patří sláma, seno, dřevo, různé traviny, v některých krajinách zvířecí exkrementy atd.

Tyto suroviny se nejprve suší a poté se buď mohou přímo využívat na spalování, nebo se zpracovávají pomocí mechanických procesů jako je řezání, štípání, drcení, mletí, lisování.

Mezi tuhá biopaliva například patří:

**Nařezané a naštípané dřevo, rozdrcené dřevěné palivo, štěpka, brikety, pelety, piliny, sláma, různý odpad z rostlinné výroby** atd. [4].

## 6.2 Kapalná biopaliva

Kapalná biopaliva se získávají z biomasy různými procesy, jejichž technologie se odvíjí od typu paliva a druhu vstupní suroviny. Tato paliva zaujímají poměrně početnou skupinu, kterou můžeme dále rozdělit podle typu chemické skupiny daných paliv.

Mezi kapalná biopaliva patří:

**Alkoholová paliva** – bioetanol, biometanol, biobutanol.

**Bio étery butylenu** – etyléter butylenu (etyl-terc-butyl eter, ETBE) a metyléter butylenu (metyl-terc-butyl eter, MTBE) se používají jako okysličovací přísada do motorového benzínu. Vyrábí se katalytickou reakcí izobutylenu a bioetanolu, respektive biometanolu.

**Různé druhy olejů rostlinného původu** – řepkový olej, palmový olej a jiné. Získávají se lisováním, následně filtrací, extrakcí a destilací z olejnatých plodin.

**Metylestery nenasycených mastných kyselin** – metylester řepkového oleje (MEŘO) a různé další metylestery nenasycených mastných kyselin souhrnně označované anglickou zkratkou FAME – fatty acid methyl ester. MEŘO patří do této skupiny také, pouze se jedná o český název konkrétního metylesteru. Získávají se transesterifikací nenasycených mastných kyselin, které jsou přítomny v olejích a tucích [4].

**Syntetická motorová nafta** – vyrábí se pomocí Fischerovy–Tropschovy syntézy ze syntézního plynu, získávaného zplyňováním biomasy.

### 6.3 Plynná biopaliva

Plynná biopaliva se mohou samovolně tvořit přirozenou cestou z biomasy nebo se dají účelně z biomasy získávat řízenými chemickými nebo tepelnými procesy.

Mezi plynná biopaliva patří:

**Bioplyn** – je produktem anaerobní digesce, což je mikrobiální přeměna organických látek bez přístupu vzduchu. Tvoří se samovolně například na skládkách odpadů, přirozených a zemědělských prostředích nebo řízeně v bioplynových stanicích a anaerobních čističkách odpadních vod. Skládá se z metanu ( $\text{CH}_4$ ) a oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) [5].

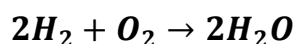
**Dřevoplyn** – vyrábí se zplyňováním biomasy, kdy se při postupných procesech sušení, doutnění, zuhelnění, oxidace a redukce [4] tvoří směs hořlavých plynů – oxidu uhelnatého ( $\text{CO}$ ), vodíku ( $\text{H}_2$ ), metanu ( $\text{CH}_4$ ) s nehořlavými – oxidem uhličitým ( $\text{CO}_2$ ) a dusíkem ( $\text{N}$ ) [6].

**Vodík** – v současné době se vyrábí vodík v největší míře parním reformováním zemního plynu, parciální oxidací ropných frakcí a zplynováním uhlí. U těchto technologií se využívají neobnovitelné zdroje, vodík se ale také vyrábí ze zdrojů obnovitelných například elektrolýzou vody anebo též pomocí technologií, které ho umožňují vyrábět z biomasy.

Jelikož vodík tvoří s uhlíkem uhlovodíkové řetězce, které jsou základní molekulovou strukturou veškeré biomasy, je vodík jejím základním prvkem. Vodík lze vyrábět parním reformováním biomasy, katalytickým parním reformováním bioplynu, katalytickým reformováním etanolu, dekarbonizací uhlovodíků pomocí slunečního záření, vodíkovou fermentací za nepřítomnosti světla a fotofermentací [7].

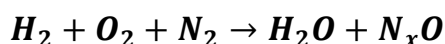
Vodík by se na první pohled mohl zdát jako ideální alternativní palivo budoucnosti pro svoji vysokou výhřevnost (121 MJ/kg ve srovnání s benzínem 44,4 MJ/kg a naftou 43,3

MJ/kg) a hlavně absencí škodlivých emisí při spalování. Při spalování by teoreticky měla vznikat pouze voda podle chemické rovnice:



V praxi by to bylo možné jen v případě, že by byl do motoru místo vzduchu vháněn pouze čistý kyslík, jako je tomu například v kosmických raketách nebo raketoplánech.

V případě použití vzduchu, ve kterém je obsažen dusík, vzniká při spalování při vysoké teplotě ještě určité množství oxidů dusíku.



Ve srovnání s fosilními palivy je spalování vodíku přesto mnohonásobně čistější a šetrnější k životnímu prostředí.

V případě stlačení vodíku do tlakových lahví bez jeho zkapalnění se při standardním tlaku 200 bar u ocelové tlakové lahve o hmotnosti 61 kg a vnitřním objemu 50 litrů dosáhne uskladnění pouze 0,75 kg vodíku. U speciální kompozitové nádrže o hmotnosti 140 kg a vnitřním objemu 200 litrů, která se plní tlakem 700 bar, se dosáhne uskladnění pouze 6 kg stlačeného plynného vodíku. To je pro použití u automobilů nepříznivý poměr hmotnosti nádrže k hmotnosti paliva v ní. Pro stlačení vodíku na tlak 350 bar je potřeba vynaložit energii, která je rovna přibližně 30 % chemické energie vodíku využitelné při spalování. Dalším problémem je pronikání vodíku skrz kov a kompozit, kterému se dá zabránit použitím vrstvy polymeru.

Z hlediska množství paliva se jeví vhodnější vodík zkapalnit a tím dosáhnout větší hmotnosti v nádrži.

To sebou ale nese problém, který se odvíjí od další fyzikální vlastnosti vodíku, a to je jeho bod varu, který má hodnotu  $-252,882\text{ °C}$  při normálním tlaku  $p_n = 101325\text{ Pa}$ . Takže na dosažení kapalného skupenství je nutné ochladit vodík na alespoň tuto hodnotu teploty, což je velmi energeticky a technologicky náročné [8].

I přes výše zmíněná negativa je vodík možnou alternativou k fosilním palivům. Poměrně slibné se například jeví použití vodíku v palivových článcích, kde je jeho chemická energie přeměňována na elektrickou energii.



## **7 Generace biopaliv**

Podle druhu původu biomasy jako výchozí suroviny rozdělujeme biopaliva do čtyř skupin. Toto dělení má zásadní význam, protože od původu výchozích surovin se odvíjí technologie potřebné na samotné získání vstupní biomasy a také následné technologie použité na zpracování biomasy. Toto vše určuje, jaký dopad má v konečném výsledku výroba a používání těchto biopaliv na životní prostředí.

### **7.1 Biopaliva I. generace**

Jako surovina pro výrobu těchto paliv je použita biomasa, která se používá též jako surovina pro výrobu potravin nebo krmiv pro zvířata.

Mezi biopaliva I. generace patří alkoholová paliva vyráběná fermentací sacharidů získávaných z obilí, kukuřice, cukrové řepy, cukrové třtiny, brambor atd. Dále oleje získávané z olejnatých rostlin, například řepkový olej z řepky olejné, ze kterého se dále esterifikací získává metylester a též etylester řepkového oleje. Velkým negativem je, že pěstování plodin, které jsou použity jako surovina pro výrobu biopaliv, zabírá značnou plochu zemědělské půdy, která by jinak byla využita na pěstování plodin pro výrobu potravin. Nebo by se tytéž plodiny, které slouží pro výrobu biopaliv, využívaly na výrobu potravin. Velkým problémem je také to, že se kvůli nové zemědělské půdě na pěstování energetických plodin kácí ve velkém měřítku deštné pralesy. Což se děje například v Indonésii a Malajsii kvůli pěstování palem na produkci palmového oleje, což má katastrofální ekologický dopad nejen v těchto oblastech, ale i v celosvětovém měřítku. Nehledě na to, že poměr spotřebované energie na pěstování těchto plodin je vzhledem k množství následně využitelné energie z vyprodukovaných paliv velmi nepříznivý. Díky tomu nemá použití biopaliv I. generace příliš pozitivní ekologický dopad, z výše uvedených důvodů má vliv na životní prostředí v mnoha případech spíše velmi negativní [9].

### **7.2 Biopaliva II. generace**

Jako vstupní surovina se používá lignocelulosová biomasa, která není využitelná pro výrobu potravin ani krmiv. Jedná se o zbytky obilovin a jiných pěstovaných rostlin, které nemají potravinářské využití, odpadní dřevo z lesní produkce, dřevo z rychle rostoucích dřevin pěstovaných pro tento účel, traviny, biologický odpad atd.

Mezi tato paliva patří:

**Etanol** – vyráběný fermentací sacharidů získaných z lignocelulosové biomasy.

**Syntetická motorová nafta** – vyráběná pomocí Fischerovy–Tropschovy syntézy ze syntézního plynu, získávaného zplyňováním biomasy.

**Vodík** – vyrábí se katalytickou konverzí syntézního plynu získávaného z biomasy.

**Butanol** – vyrábí se jako vedlejší produkt aceton-butanolového kvašení.

**Metan, metanol** – vyrábí se katalytickou konverzí oxidu uhelnatého získávaného z biomasy [10].

Biopaliva II. generace mají oproti biopalivům I. generace značnou výhodu v tom, že jako surovinu využívají odpadní biomasu, nebo biomasu, jejíž produkce nekonkuruje produkci surovin na výrobu potravin. Jelikož se částečně jedná i o odpadní biomasu, je celková vstupní energie vynaložená na produkci vstupních surovin nižší, než je tomu u I. generace biopaliv. I z tohoto důvodu jsou biopaliva II. generace oproti biopalivům I. generace z ekologického hlediska výhodnější. Některé z těchto biopaliv se úspěšně vyrábějí, například syntetická motorová nafta a bioplyn, další jsou stále ve fázi vývoje, zlepšování a zkoušení nových výrobních technologií, jako je tomu například u bioetanolu nebo biobutanolu II. generace [9].

### 7.3 Biopaliva III. generace

Biopaliva III. generace jsou v současné době stále ve stádiu výzkumu a vývoje, ale z dnešního pohledu se tento způsob získávání vstupní suroviny na výrobu biopaliv jeví jako velmi slibný.

Hlavními plodinami pěstovanými jako vstupní surovina pro tato biopaliva jsou vodní řasy, mořské i sladkovodní. Řasy, které se pěstují v nádržích nebo též v moři, společně s živinami z vody využívají vzdušný nebo dodávaný kyslíčnický uhlíčitý, který se společně se slunečním zářením podílí na fotosyntéze. Živiny mohou být do vody dodávány ve formě různého biologického odpadu, což je další pozitivum jejich pěstování.

Jejich hlavní výhodou je rychlý růst a s tím spojená velká výtěžnost na využívanou plochu k pěstování. Vodní řasy obsahují vysoký podíl oleje, jehož výnos na plochu může být řádově vyšší než u pěstování suchozemských energetických rostlin.

Olej z řas může být využíván k výrobě bionafty, dále je možné z řas získávat fermentací etanol, termickým rozkladem metan, dále bioplyn a vodík [11].

Do této kategorie biopaliv můžeme zařadit i biopaliva získávaná z geneticky upravených plodin, které by byly vhodnější pro následnou výrobu paliv než plodiny, které se využívají nyní. Jednalo by se například o rostliny s větším obsahem oleje nebo dřeviny s menším obsahem ligninu. Zatím jsou ale technologie, které by to umožňovaly, pouze ve stádiu výzkumu a vývoje bez průmyslového využití v praxi.

## **7.4 Biopaliva IV. generace**

Technologie této generace biopaliv kombinují genetické upravování plodin, aby byly schopné využívat z atmosféry více oxidu uhličitého, než co se následným používáním paliva uvolní, s geneticky upravenými kmeny mikrobů, které jsou vyvinuty pro efektivní výrobu biopaliv za využití energie slunečního záření. Patří sem technologie, které budou přímo využívat energii slunečního záření na výrobu biopaliv, například fotosyntetické dělení vody (oxidace vody). Biopaliva čtvrté generace budou takzvaným negativním zdrojem oxidu uhličitého, jejich výroba a následné používání bude schopné redukovat jeho množství v atmosféře [12].

Tato paliva mají skutečný potenciál nahradit ropné produkty v plném rozsahu a zlepšit celosvětovou negativní ekologickou bilanci. U této kategorie můžeme mluvit o skutečných palivech budoucnosti, které by mohly společně s energetickými úsporami ve všech průmyslových odvětvích zvrátit velmi direktivní cestu poškozování celosvětového ekosystému. Ale až budoucnost ukáže, jak se tato paliva, která jsou v současnosti ve stádiu výzkumu, budou schopna uplatnit v praxi.

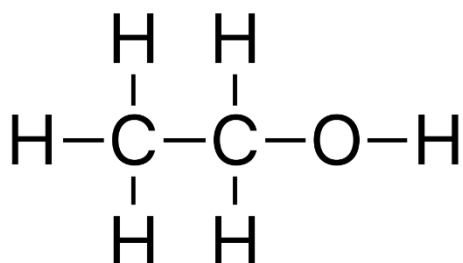
## **8 Bioetanol**

### **8.1 Etanol – základní fyzikální a chemická charakteristika**

Bioetanol je etanol (v chemii používaný systematický název ethanol) vyráběný alkoholovým kvašením (fermentací) jednoduchých sacharidů z biomasy a následnou destilací. Etanol, též označovaný jako etylalkohol nebo líh, patří do chemické skupiny alkoholů. Alkoholy jsou nearomatické hydroxylové deriváty uhlovodíků, kde je jeden nebo i více atomů vodíku ve struktuře molekuly uhlovodíku nahrazen hydroxylovou skupinou OH. Sumární vzorec etanolu je  $C_2H_6O$  a jeho funkční vzorec  $C_2H_5OH$ . Strukturální vzorec

je zobrazen na obr. č. 1. Základní fyzikálně-chemické vlastnosti etanolu jsou uvedeny v tab. č. 1.

Obr. č. 1: Strukturní vzorec ethanolu [13]



Tabulka č. 1: Základní fyzikálně-chemické vlastnosti ethanolu [13]

Chemická skupina	Hydroxyderiváty
Sumární vzorec	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$
Funkční vzorec	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Systematický název	ethanol
Triviální název	líh
Molární hmotnost [g/mol]	46,07
Teplota tání [°C]	-114,4
Teplota varu [°C]	78,3
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	789
Teplota vzplanutí (95 % etanol) [°C]	13
Teplota vznícení [°C]	366
Meze výbušnosti ve směsi se vzduchem (96 % etanol)	3,3 % - 19 %

Etanol je za normální teploty a tlaku čirá bezbarvá kapalina výrazně ostré vůně, těkavá, snadno zápalná. Jedná se o hořlavinu I. třídy nebezpečnosti, její výpary ve směsi se vzduchem jsou výbušné. Etanol je velmi dobře mísitelný s vodou a hygroskopický (váže vodu). Tvoří základní složku alkoholických nápojů, používá se jako rozpouštědlo, základ kosmetických přípravků, ve zdravotnictví jako dezinficiens a antiseptikum. V chemickém průmyslu slouží jako základní surovina k mnoha chemickým procesům, většinou na výrobu dalších organických sloučenin.

Etanol je snadno rozložitelný v přírodním prostředí, za přispění přirozeně se vyskytujících bakterií se rozkládá na oxid uhličitý a vodu [13].

## 8.2 Použití etanolu ve spalovacích motorech

V automobilovém průmyslu našel etanol uplatnění jako alternativní palivo do zážehových i vznětových motorů ve směsi s benzínem i naftou už ve dvacátých letech 20. století. Ve směsi s benzínem se používal mimo jiné z důvodu zvýšení oktanového čísla, jelikož technologie v té době neumožňovaly vyrábět benzíny s vysokým oktanovým číslem. Používání etanolu jako paliva se značně rozšířilo během druhé světové války, zejména v Německu, kvůli nedostatku konvenčních pohonných hmot.

Během hospodářské krize ve 30. letech dvacátého století se v několika státech USA používal směs benzínu s etanolem. V současnosti se v USA do většiny motorových benzínů přidává etanol jako aditivum, většinou v poměrovém množství 10 %. Vstupní surovinou tohoto etanolu je v USA ve velkém množství pro tento účel pěstovaná kukuřice. Státem, kde se etanol jako alternativní palivo ujal ve velkém měřítku, je Brazílie, která spolu s USA patří mezi největší producenty biopaliv na světě, jak bioetanolu, tak i bionafty. Etanol se ve směsi s benzínem používá v Brazílii už od roku 1931. V 70. letech minulého století byl v důsledku první ropné krize, jež měla za následek navýšení ceny ropy o více než 200 %, vytvořen národní program PROÁLCOOL. Tento program měl za úkol omezit závislost Brazílie na ropě právě produkcí etanolu a jeho použitím v automobilové dopravě buď ve směsi s benzínem, nebo samotného etanolu bez benzínu. V roce 1977 se začal přidávat bezvodý etanol do benzínu v poměrovém množství 4,5 %. Po roce 1979, kdy započala druhá ropná krize, se poměrové množství přidávaného bezvodého etanolu zvýšilo na 15 % a poté až na 22 %.

V tomto období s nástupem automobilových motorů využívajících jako palivo hydratovaný etanol nebo směs bezvodého etanolu a benzínu došlo k výraznému navýšení produkce cukrové třtiny, která je v Brazílii pro výrobu etanolu hlavní vstupní surovinou. V polovině osmdesátých let jezdilo v Brazílii dokonce 85,5 % vozů na hydratovaný etanol nebo směs bezvodého etanolu a benzínu [14].

Koncem osmdesátých a začátkem devadesátých let došlo k velkému útlumu výroby hydratovaného etanolu v důsledku znatelného seškrtnání vládou dotovaného programu, což mělo za následek prudký pokles prodeje automobilů s motory na etanol. Pozvolný nárůst prodeje těchto vozů začal po roce 2000 díky různým vládním programům, které zvýhodňovaly používání těchto typů vozidel. V roce 2003 byl společností Volkswagen uveden na trh nový typ motorů schopných využívat jak benzín, tak také hydratovaný etanol. Prodej vozů s těmito motory, rostoucí cena ropy a také fakt, že se etanol jako palivo

začal využívat i v jiných státech světa, a tím se zvýšil jeho odbyt, to všechno mělo za následek znovuoživení brazilského etanolového průmyslu. Mezi lety 2001 a 2007 se též zvýšilo poměrové množství přidávaného bezvodého etanolu do benzínu 25 % [15].

V Evropě je použití etanolu v dopravě velmi rozšířeno ve Švédsku, zemi, která má velmi progresivní environmentální politiku a už od 70. let 20. století se jí velmi úspěšně daří přecházet z fosilních paliv na paliva z obnovitelných zdrojů. V roce 2011 jezdilo ve Švédsku už více než 200 000 vozů, které byly schopny jezdit na palivo E85. Švédsko velké množství etanolu dováží, především z Brazílie, ale též biopaliva samo produkuje. V zemi byly vybudovány továrny na zpracování celulózy ze zemědělského a dřevařského odpadu, ze které se vyrábí bioplyn využívaný například v městské autobusové dopravě.

### **8.2.1 Použití etanolu v zážehových motorech**

Etanol má oproti naftě i benzínu podstatně nižší výhřevnost a v porovnání s benzínem vyšší oktanové číslo. Kyslík, který je v etanolu přítomen, pozitivně ovlivňuje průběh spalování. Proto lze etanol přidávat jako příměs do směsi s benzínem kvůli obsahu kyslíku jako kyslíkatou složku a dále pak také z důvodu zvýšení oktanového čísla. Zvýšení celkového oktanového čísla směsi zvyšuje její odolnost proti samozápalu a vzniku detonačního hoření, které se projevuje klepáním v motoru, znatelným poklesem jeho výkonu a také zvýšenou tendencí k opotřebení. Pro tento účel se přidává etanol do benzínu v maximální poměrové výši do 20 %, do této hodnoty poměrového množství není potřeba žádná větší úprava motoru. Vzhledem k nižší výhřevnosti je vhodné pouze případné seřízení dávkování paliva a úprava palivového příslušenství.

Motory s elektronickými řídicími systémy umožňují použití směsi s různým poměrem etanolu s benzínem, od čistého benzínu až do 85 % etanolu ve směsi, vozy s těmito motory se označují Flexible Fuel Vehicles. Podle koncentrace kyslíku ve výfukových plynech, na kterou má vliv množství etanolu ve směsi, přizpůsobuje řídicí jednotka dávkování paliva a předstih zážehu. Palivové systémy těchto motorů jsou též přizpůsobené agresivnímu působení etanolu, který negativně působí na některé druhy plastů a též může způsobovat rychlejší korozi kovových materiálů. Pro použití směsi s obsahem etanolu 85 % označované E85 nebo i s vyšším obsahem jsou potřeba speciálně upravené motory. Jelikož má etanol vyšší oktanové číslo, umožňuje jeho použití zvýšení kompresního poměru ve válcích motoru až na 15:1, což příznivě ovlivňuje účinnost motoru. Kvůli nižší výhřevnosti etanolu oproti benzínu, tak jak je uvedeno v tab. č. 2, je spotřeba etanolu při daném výkonu

vyšší. Z tohoto důvodu je nutné upravit vstřikovací zařízení přibližně na 1,5 násobku hmotnostního průtoku oproti průtoku při použití benzínu. Jelikož je skupenské výparné teplo etanolu téměř třikrát vyšší než u benzínu, dochází k většímu ochlazení spalovacího prostoru, což způsobuje problémy při startování motoru za nízkých teplot. Na druhou stranu to umožňuje lepší ochlazování spalovacího prostoru a jeho naplnění palivovou směsí [16].

*Tabulka č. 2: Srovnání fyzikálně – chemických vlastností etanolu, benzínu a nafty [16], [17]*

Palivo	Bioetanol	Benzín	Nafta
Teplota varu [°C]	78	30 - 215	163 - 357
Výhřevnost (MJ/l)	21	32 - 33	36
Výparné teplo (MJ/kg)	0,92	0,36	-
Oktanové číslo VM	108	91 - 100	-
Cetanové číslo	8	-	> 51
Obsah kyslíku (% hm.)	34,7	< 2,7	-

### **8.2.2 Použití etanolu ve vznětových motorech**

Jak je uvedeno v tab. č. 2, etanol má v porovnání s naftou výrazně nižší cetanové číslo a nízkou mazací schopnost. Cetanové číslo určuje vznětovou charakteristiku paliva, jeho schopnost se při vstříknutí do spalovacího prostoru vznítit. Cetanové číslo má vliv na startování motoru, jeho výkon, tichý chod i množství škodlivých emisí. Čím vyšší cetanové číslo je, tím jsou zmíněné charakteristiky lepší.

### **8.2.3 Použití etanolu ve vznětových motorech společně s motorovou naftou**

Vzhledem ke zmíněným faktům v předcházejícím odstavci lze etanol bez dalších přísad použít ve vznětových motorech pouze jako pomocné palivo společně s naftou. Etanol je s motorovou naftou velmi špatně mísitelný a výsledná směs je velmi nestálá. Tento problém lze řešit přidáním přísad, které zlepšují mísitelnost a stálost, k tomuto účelu je možné použít například butanol.

Na Katedře vozidel a pozemní dopravy Technické fakulty Zemědělské univerzity v Praze byla testována možnost přímého přimíchávání etanolu do motorové nafty. Během měření

celkové charakteristiky traktorového motoru Zetor 7701, byla použita nejprve samotná motorová nafta a poté směs, která obsahovala poměrové množství 80 % nafty a 20 % etanolu. Její homogenita byla podpořena neustálým mícháním v nádrži. Přínos přidání etanolu v poměrovém množství 20 % byl vyhodnocen pomocí simulace NRTC (Non Road Transient Cycle).

Výsledky tohoto testu ukázaly velmi příznivý pokles produkce nespálených uhlovodíků (18,75 %), oxidů dusíku (17,1 %) a oxidu uhelnatého (12,07 %). Množství produkce oxidu uhličitého byla dle testu víceméně stejná jako při použití samotné motorové nafty. Celkový ekologický přínos přidání etanolu do nafty ve výše zmíněném množství byl vyhodnocen velmi kladně. Jediným negativním parametrem tohoto pokusu bylo zvýšení měrné spotřeby palivové směsi oproti použití samotné nafty, což bylo z důvodu nižší výhřevnosti etanolu.

Další možností použití etanolu ve vznětovém motoru je dvoupalivový systém s dvěma oddělenými nádržemi s různými variantami přípravy výsledné palivové směsi ve spalovacím prostoru.

Jednou z variant je, že se etanol vstříkuje do spalovacího prostoru pomocí samostatného vstřikovacího čerpadla a současně je druhým vstřikovacím čerpadlem vstřikována nafta, která je zápalným elementem.

Dalším technickým řešením je nasávání etanolu do spalovacího prostoru společně se vzduchem, se kterým se mísí etanol buď v karburátoru, nebo pomocí nízkotlakého vstřikování před sací ventil. Nafta se opět vstříkuje a způsobí zapálení celé směsi ve spalovacím prostoru.

Výše uvedené způsoby použití etanolu ve vznětovém motoru společně s naftou jsou poměrně technicky náročné i nákladné. Z tohoto důvodu nejsou zatím v praxi příliš využívány [18].

#### **8.2.4 Použití etanolu ve vznětových motorech bez motorové nafty**

Pokud je etanol použit ve vznětovém motoru bez nafty, je potřeba eliminovat jeho nedostatky oproti motorové naftě. Výrazně nižší cetanové číslo a mazací schopnost a též korozní agresivitu lze velmi dobře vyřešit přidáním vhodných aditiv na bázi organických dusičnanů a dusitanů.

Nutná je také úprava motoru, zvýšení kompresního poměru alespoň na 25:1 a navýšení hmotnostního průtoku paliva vstřikovacím systémem z důvodu menší výhřevnosti etanolu



oproti naftě. Dále je potřeba upravit dobu počátku vstříku, která je u provozu na etanol jiná než u nafty.

V Ústavu pro výzkum motorových vozidel (TÜV ÚVMV s.r.o.) byly na traktorovém motoru zkoušeny dvě varianty etanolového paliva. První variantou bylo palivo E95 obsahující 95 % etanolu a 5 % přísady AVOCET na zlepšení vznětlivosti směsi. Druhou variantou bylo palivo E85 s 85 % etanolu společně s 15 % přísady LC3027 zlepšující vznětlivost směsi.

Výsledky měření uvedené v tab. č. 3 ukázaly, že oproti provozu na motorovou naftu došlo u obou směsí k poklesu maximálního výkonu a maximálního točivého momentu. Tento pokles je způsoben nižší výhřevností paliva a lze ho kompenzovat zvýšením jeho vstřikovací dávky, což má za následek zvýšení měrné spotřeby.

*Tabulka č. 3: Procentuální změna provozních parametrů traktorového motoru v porovnání s provozem na motorovou naftu z testu provedeném v TÜV ÚVMV s.r.o. [18]*

Palivo	$P_e$	$M_t$	$m_{pe}$	Kouřivost	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PT
E95 + AVOCET	-35,9%	-37%	+69,6%	-3,8%	+199%	+562%	+5%	-34%
E85 + LC3027	-33,3%	-34,5%	+63,7%	-97%	+126%	+287%	+33%	-51%

$P_e$  – výkon motoru [kW]

$M_t$  – točivý moment motoru [Nm]

$m_{pe}$  – měrná spotřeba paliva [g/kWh]

**Kouřivost** – kouřivost motoru měřená opacimetrem [1/m]

**CO** – měrná produkce oxidu uhelnatého [g/kWh]

**HC** – měrná produkce nespálených uhlovodíků [g/kWh]

**NO<sub>x</sub>** – měrná produkce oxidů dusíku [g/kWh]

**PT** – měrná produkce pevných částic [g/kWh]

Test dále ukázal oproti provozu na motorovou naftu výrazně vyšší produkci oxidu uhličitého a nespálených uhlovodíků. Z tohoto důvodu je nutné vozidla se vznětovými motory, která využívají k provozu etanolové palivo, vybavit oxidačním katalyzátorem eliminujícím produkci jejich emisí. Produkce oxidů dusíku byla v testu mírně zvýšená, což se dá technicky řešit změnou množství recirkulovaných výfukových plynů.

Z ekologického hlediska byla u obou paliv pozitivně zhodnocena nižší produkce pevných částic a kouřivost, u paliva E85 byl pokles kouřivosti markantní, u E95 pouze mírný [18]. Paliva na bázi etanolu nejsou ve vznětových motorech až na několik výjimek příliš hojně používána. Za zmínku stojí například městské autobusy švédského výrobce SCANIA provozované na palivo E95. Tyto autobusy jsou v poměrně velkém počtu ve Stockholmu a i dalších švédských městech součástí vozového parku městské autobusové dopravy.

## 9 Výroba bioetanolu I. generace

### 9.1 Vstupní suroviny pro výrobu

Vstupními surovinami pro výrobu bioetanolu I. generace jsou zemědělské plodiny, které se též běžně využívají jako surovina pro výrobu potravin a krmiv. Etanol lze vyrábět metodou alkoholového kvašení pomocí kvasinkových kultur ze surovin, které obsahují sacharidy. Jsou to buď cukernaté plodiny obsahující disacharid sacharózu, nebo škrobnaté plodiny, které obsahují polysacharid škrob. Etanol lze samozřejmě vyrábět a vyrábí se i z plodin, které obsahují monosacharidy fruktózu a glukózu, tedy z ovocných plodin. Výhodou je, že se tyto monosacharidy nemusí před samotnou fermentací enzymaticky štěpit, jako je tomu u škrobu, ale tento etanol se většinou používá k výrobě alkoholických nápojů. Primárně se ale ovoce využívá k přímé spotřebě, nebo jako surovina v potravinářství. Pěstování ovoce na výrobu etanolu jako paliva není rozšířené, pravděpodobně z ekonomických důvodů, nákladovost a výtěžnost jsou v tomto případě ve velmi nevýhodném poměru.

Pro výrobu etanolu ve velkém měřítku, jak pro potravinářské, kosmetické a další účely, tak také pro jeho využití jako paliva, se proto používají cukernaté nebo škrobnaté plodiny.

#### 9.1.1 Škrobnaté plodiny

Mezi škrobnaté plodiny, které se využívají na výrobu etanolu, patří obecně hlíznaté plodiny a obiloviny. U hlíznatých plodin mají hlavní zastoupení brambory, z obilovin je to pšenice a především kukuřice, která je společně s cukrovou třtinou pro produkci etanolu jako paliva využívána na světě v největším měřítku.

Kukuřice setá (*Zea mays*) je robustní jednoletá tráva, která dorůstá obvykle výšky jednoho až tří metrů, v některých případech i 6 metrů. Tělo rostliny tvoří dužnaté stéblo složené z článků, které jsou spojené kolénky. Jedná se o jednodomou rostlinu, každá jedna rostlina tedy tvoří samčí i samičí květy. Samčí květenství tvoří prašníkové klásky, samičí

květenství tvoří ztlustělý klas nazývaný též palice, na jejímž povrchu vyrůstají po opylení samčím pylem zrna v kruhových řadách nad sebou. Velikost palic závisí na druhu kukuřice, počet zrn se může pohybovat zhruba od 60 až po více než 1000. Právě tato zrna jsou z kukuřice primárně využívána. Tato rostlina pochází původně ze střední Ameriky, ale postupně se její pěstování rozšířilo do celého světa. Jedná se o teplomilnou rostlinu, ideální teplota pro pěstování se pohybuje v rozmezí mezi 20 – 40 °C, ale některé odrůdy je možné pěstovat i ve výrazně chladnějších podmínkách.

Kukuřice se využívá v potravinářském průmyslu jako surovina pro získávání škrobu, oleje, glukózy a fruktózového sirupu. Kukuřičný škrob nachází uplatnění i v dalších odvětvích, v papírnictví, stavebnictví a ve farmaceutickém i chemickém průmyslu.

Podle složení endospermu zrn se kukuřice rozděluje na pět různých typů, které určují její využití:

**Reventador (pop corn)** – u tohoto typu jsou charakteristická malá zrna s měkkým škrobovým jádrem a tvrdým pláštěm. Pražená zrna se využívají jako pochutina k přímé spotřebě. Pěstuje se na přibližně 1 % celkové rozlohy zemědělské půdy, která je využívána na celém světě na pěstování kukuřice.

**Duro (flint)** – je podobná typu Reventador, ale má větší zrna. Je odolná proti chladu, a proto je její pěstování rozšířeno převážně v horských a chladnějších oblastech. Zaujímá kolem 14 % celkové rozlohy.

**Blando** – tento typ kukuřice se využívá na mouku, její zrna mají měkké škrobové jádro a snadno se melou. Jedná se o nejběžnější typ pro přímou lidskou spotřebu, zabírá přibližně 12 % celkové rozlohy.

**Dentado** – jádro zrn tvoří měkčí škrobový endosperm v tvrdší slupce, která nepokrývá celé jádro. Dentado je nejvyužívanějším typem, zabírá přibližně 73 % z celkové rozlohy zemědělské půdy využívané na produkci kukuřice. Používá se jako krmivo pro dobytek a jako surovina na získávání škrobu, oleje a pro výrobu etanolu.

**Sladká kukuřice** – endosperm zrn obsahuje jen málo škrobu, skládá se převážně z ve vodě rozpustných nízkomolekulárních sacharidů. Díky své příjemné chuti a nutriční hodnotě je určena k přímé spotřebě a užití v potravinářství. Velmi rozšířené je její konzervování ve slaném nálevu za účelem gastronomického využití. Ve srovnání s ostatními typy je pěstována pouze ve velmi malém poměrovém množství.

V rozvojových zemích hraje díky své nutriční bohatosti kukuřice podstatnou roli ve výživě obyvatelstva, například v zemích Latinské Ameriky, v Africe a některých státech v Asii. V ekonomicky rozvinutých zemích je velmi rozšířené její zpracování na krmivo pro dobytek, buď v původní zrnové formě, nebo ve formě siláže, což je způsob konzervace krmiva pomocí anaerobního mléčného kvašení v něm obsažených sacharidů. V některých zemích, například v Mexiku, které je domovskou zemí kukuřice, se z této rostliny využívají jak její zrna, která tvoří základ mnoha tamních potravin, ale také ostatní části rostliny. Z listů se vyrábí například rohože a jiné výrobky, ze stébel střešní krytiny a i další stavební materiál.

Je vhodné zmínit také pěstování geneticky upravené kukuřice (Genetically modified – GM). Genom rostliny lze z důvodu zvýšení odolnosti proti některým škůdcům upravit tak, že se rostlina stane pro tyto škůdce v případě pozření smrtící.

Například jeden z nejběžnějších geneticky upravených druhů kukuřice má do svého genomu vložený gen z genomu půdní bakterie (*Bacillus thuringiensis*). Tato genetická informace je v buněčné cytoplazmě translatována do proteinu, který je po pozření hmyzem aktivován jeho trávicími enzymy a vytváří v jeho trávicí soustavě póry. Taková genetická úprava propůjčuje odolnost proti škůdci zavíječi kukuřičnému (*Ostrinia nubilalis*) a bázlivci kukuřičnému (*Diabrotica virgifera*). Pro ostatní druhy hmyzu je produkován protein neškodný, stejně tak pro člověka a zvířata. Podle latinského jména půdní bakterie se takto geneticky upravená kukuřice nazývá Bt-kukuřice [19].

### 9.1.2 Cukernaté plodiny

Do skupiny cukernatých plodin patří v první řadě cukrová třtina, která je na světě nejvíce využívanou plodinou k získávání potravinářského cukru a také společně s kukuřicí nejvýznamnější surovinou pro výrobu bioetanolu. Cukrová třtina (*Saccharum officinarum*) je víceletá velmi mohutná tráva, jejíž masivní stébla dosahující výšky až 6 metrů a tloušťky 5 cm mohou obsahovat až 20 % sacharózy. Tato rostlina potřebuje pro optimální rychlost růstu stabilní teplotu 30 °C, proto je její pěstování rozšířené v tropickém a subtropickém podnebném pásu. Při nižších teplotách její růst velmi zpomaluje, a při teplotách pod 15 °C dochází k růstové stagnaci.

Mezi nejvýznamnější producenty cukrové třtiny patří Brazílie, Kuba, Mexiko, Indie, Austrálie, její pěstování je též velmi rozšířeno v jižní Africe.

Dalším produktem, který se kromě cukru získává z cukrové třtiny, je melasa. Melasa je cukerný sirup, který zbyde po vykrystalizování sacharózy ze třtinové šťávy. Používá se na výrobu alkoholických nápojů, především rumu, v potravinářském průmyslu na kultivaci kvasinek a též jako surovina na výrobu etanolu pro jeho využití jako paliva v dopravě [20]. Cukrová třtina se pro výrobu bioetanolu jako paliva využívá nejvíce v Brazílii, která je po USA druhým největším producentem bioetanolu na světě.

Další významnou cukernatou plodinou používanou pro výrobu cukru a etanolu je cukrová řepa (*Beta vulgaris var. Altissima*). Jedná se dvouletou zemědělskou plodinu, řadící se mezi okopaniny, které na rozdíl od cukrové třtiny vyhovuje mírné podnebné pásmo. Pro účel použití v cukrovarnickém a lihovém průmyslu se pěstuje jeden rok. Z rostliny se pro získávání cukru využívá její zdužnatělý kořen, takzvaná bulva. Šťáva z cukrové řepy obsahuje průměrně 15 – 18 % sacharózy. V Evropě je cukrová řepa základní surovinou pro výrobu cukru a také je využívána k výrobě etanolu. V současné době se pro výrobu etanolu z cukrové řepy využívá výhradně melasa, která je odpadním produktem cukrovarnického průmyslu [21], [22].

### 9.1.3 Fotosyntéza typu C<sub>4</sub>

Kukuřice a cukrová třtina jsou nejvyužívanějšími rostlinami na výrobu bioetanolu I. generace. Tyto dvě rostliny se z důvodu současné poptávky po biopalivech, ekonomických podmínek, dostupnosti současných zpracovatelských technologií a celkových biologických charakteristik jeví jako velmi vhodné na pěstování za účelem energetického využití. Jednou z biologických charakteristik, díky níž jsou cukrová třtina a kukuřice vhodné pro použití na tento účel, je typ fotosyntézy, který se označuje C<sub>4</sub>.

Fotosyntéza rostlin probíhá ve speciálních buňkách zvaných mezofily, které jsou umístěny v listech. Vzduch se k nim dostává pomocí pórů v listech zvaných stomata (průduchy). V mezofilech vstupuje kyslíčnick uhlíčitý (CO<sub>2</sub>) do takzvaného **Calvinova cyklu**, kde je za pomoci enzymu ribulosa-1,5-bisfosfát-karboxylasa/oxygenasa (RuBisCo) přeměněn na fosfoglycerát a dále pak na glukózu. Kyslík obsažený ve vzduchu snižuje efektivitu tohoto procesu, protože do něj vstupuje také, váže se na RuBisCo a tím zabraňuje navázání kyslíčnicku uhlíčitého. RuBisCo s kyslíkem se pak účastní Calvinova cyklu, ale v tomto případě vzhledem k nedostatku atomů uhlíku nepřispívá ke vzniku glukózy, enzym takto není v cyklu efektivně využit. Tento jev, zvaný fotorespirace, je z tohoto důvodu pro rostlinu energeticky nevýhodný.

Rostliny  $C_3$ , jež se tak nazývají podle typu fotosyntézy, přeměňují  $CO_2$  pomocí RuBisCo na fosfoglycerát. To je tří-uhlíková sloučenina, a proto se tento typ fotosyntézy označuje  $C_3$ .

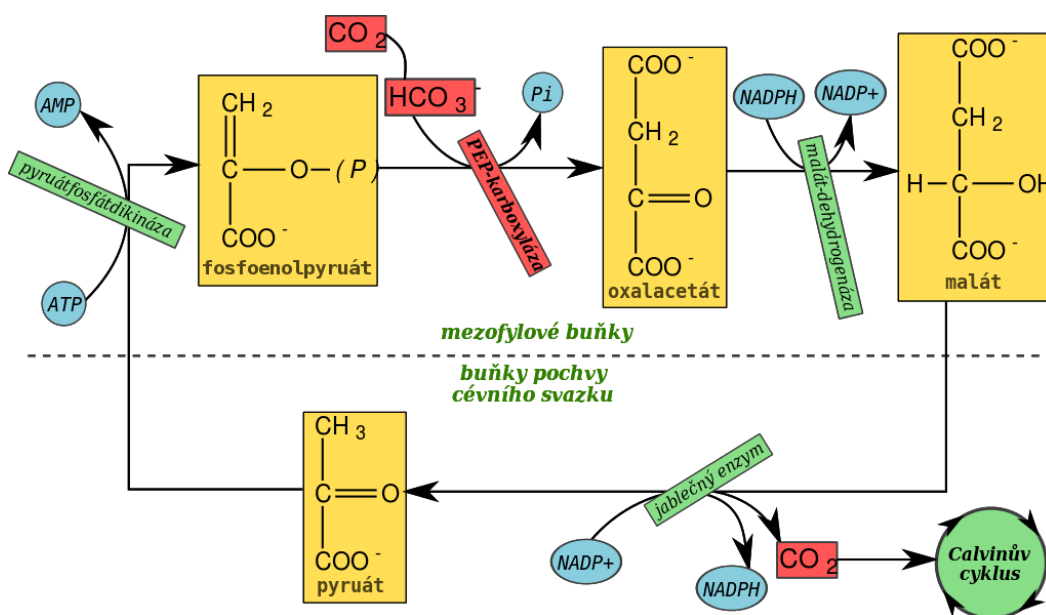
U některých rostlin se vyvinul mechanismus, jak tento proces obejít a jsou nazývány podle typu fotosyntézy jako rostliny  $C_4$ . Tyto rostliny využívají přeměny  $CO_2$  a fosfoenolpyruvátu (PEP) pomocí enzymu PEP-karboxylázy na oxalacetát (čtyř-uhlíkatá sloučenina, proto označení  $C_4$ ) a dále pak na malát nebo aspartát. PEP-karboxyláza na rozdíl od RuBisCo zpracovává pouze  $CO_2$  nikoli kyslík. Malát a aspartát jsou transportovány do buněk pochvy cévního svazku uložených hlouběji v listu a nemají přímý kontakt se vzduchem. V těchto buňkách z malátu nebo aspartátu vzniká  $CO_2$  a pyruvát, a obě tyto sloučeniny jsou transportovány zpět do mezofilu. V mezofilu je pyruvát přeměněn na fosfoenolpyruvát, zatímco  $CO_2$  je vázán na RuBisCo a vstupuje do Calvinova cyklu, jehož konečným produktem je glukóza.

Tento proces bývá označován jako **Hatchův–Slackův cyklus** (viz obr. č. 2), nebo též  **$C_4$  – cyklus**. Ve srovnání s rostlinami  $C_3$ , u kterých probíhá pouze samotný Calvinův proces, jež je vývojově starší a méně efektivní, umožňuje Hatchův–Slackův cyklus rostlinám efektivněji využívat kyslíčnick uhlíčitý a produkovat sacharidy [23].

Právě proto mají kukuřice a cukrová třtina velkou výnosnost na obdělávanou plochu a mají velký potenciál při jejich použití jako vstupní suroviny na výrobu bioetanolu. Je ale potřeba zmínit, že je tomu tak hlavně v zemích s vhodným klimatem a optimálním počtem slunečných dní. Jako je tomu v případě pěstování cukrové třtiny v Brazílii a kukuřice v USA. Například klima ve střední Evropě neumožňuje optimálně využít výše zmíněnou biologickou charakteristiku kukuřice právě z důvodu menšího počtu slunečných dní.

Schematické zobrazení  $C_4$  – cyklu je na obr. č. 2.

Obr. č. 2: Hatchův–Slackův cyklus [24]



## 9.2 Technologie výroby bioetanolu ze škrobnatých plodin

### 9.2.1 Škrob

Výroba etanolu ze škrobnatých plodin je technologicky náročnější než výroba z plodin cukernatých, protože škrob v nich obsažený nelze přímo použít k alkoholovému kvašení.

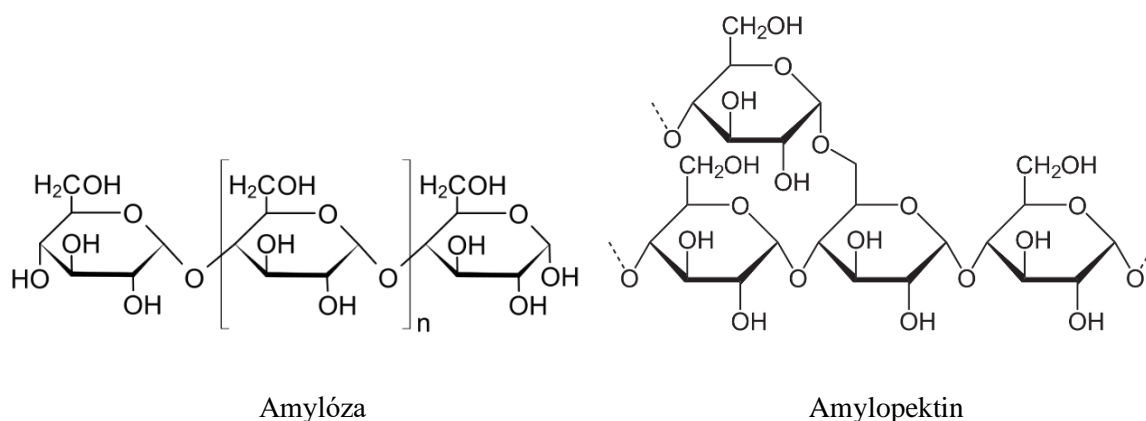
Škrob je uložen v rostlinách ve formě takzvaných škrobových zrn a slouží jako jejich zásobní zdroj energie. Chemický sumární vzorec škrobu je  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

Škrob je polysacharid, který patří do skupiny homopolysacharidů, což jsou polysacharidy, které jsou tvořeny stejnými jednotkami monosacharidů. Pokud jsou tvořeny jednotkami glukózy, jako je tomu například u škrobu, nazývají se glukany.

Škrob je složený ze dvou polymerů, amylozy a amylopektinu, které jsou dále tvořené jednotkami glukózy.

**Amylóza** se skládá z lineárních řetězců tvořených jednotkami glukózy, které jsou vzájemně propojeny O-glykosidovými vazbami  $\alpha$ -(1→4). Vytváří šroubovici, která je stabilizována intramolekulárními vodíkovými můstky. Strukturní vzorec amylozy je zobrazen na obr. č. 3.

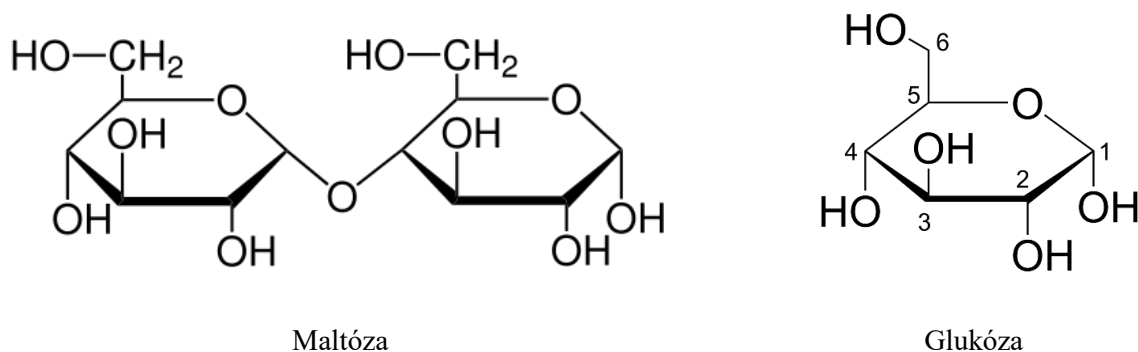
Obr. č. 3: Strukturální vzorec amyulózy a amylopektinu – Haworthova projekce [25], [26]



**Amylopektin** se skládá ze základního řetězce, který má stejnou strukturu jako amyulóza a je přibližně po dvaceti až třiceti glukózových jednotkách větven glykosidovou vazbou  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) [25]. Strukturální vzorec amylopektinu je zobrazen na obr. č. 3.

Škrob je vysokomolekulárním polysacharidem a ten kvasinky, které jsou využívány k alkoholovému kvašení, nedokážou rozložit. U monosacharidů (např. glukóza) a disacharidů (např. sacharóza) je možné provádět fermentaci přímo, kvasinky jsou schopné je svými vlastními enzymy rozkládat. Škrob je nutné před vlastní fermentací enzymaticky rozštěpit na disacharid maltózu a monosacharid glukózu, jež jsou už přímo zkvasitelné. Strukturální vzorce maltózy a glukózy jsou zobrazeny na obr. č. 4

Obr. č. 4: Strukturální vzorec maltózy a glukózy – Haworthova projekce [27], [28]





## **9.2.2 Příprava zápary ze škrobnatých surovin**

Zápara neboli sladká zápara je médium, které je připraveno na vlastní fermentační proces. V případě použití škrobnatých surovin zahrnuje příprava zápary procesy, které pomohou tyto suroviny upravit na vlastní fermentaci. Jak už bylo zmíněno v předchozím odstavci, je nutné škrob obsažený v surovině rozštěpit na zkvasitelné disacharidy a monosacharidy. U výroby etanolu ze škrobnatých surovin jsou používány dvě technologie, a to tlakový způsob (pařákový) a beztlakový způsob [29].

### **9.2.2.1 Tlakový (pařákový) způsob přípravy zápary**

V současnosti se tato technologie už moc nevyužívá, je energeticky náročnější než níže zmíněný beztlakový způsob. Očištěná zrna obilnin nebo hlízy brambor se před tímto procesem nemusí mlít, zpracovávají se celé. Aby se škrob uvolnil ze škrobových zrn obsažených v obilných zrnech nebo v hlízách a zmazovatěl, musí se vstupní surovina zahřát po určitou dobu na teplotu nad 100 °C. To se děje v tlakové nádobě, kde se nejprve propařuje vodní párou za normálního tlaku, poté za zvýšeného 0,2 až 0,5 MPa při teplotě kolem 120 °C. Škrob se uvolňuje ze škrobových zrn, dochází k jeho zmazování, mění se v hustou viskózní kapalinu. Takto upravený škrob se vypouští, chladí a putuje do zapařovací kádě. Zároveň se promíchává se směsí enzymů na ztekucení a zcukření škrobu (podrobněji viz níže) [29].

### **9.2.2.2 Beztlakový způsob přípravy zápary**

U tohoto způsobu je nutné zrna nebo hlízy po očištění namlít na požadovanou jemnost. Mletí se provádí za sucha ve šrotovníkách nebo za mokra v dispergátorech či kladívkových mlýnech na velikost částic přibližně 0,4 až 1,6 mm. V případě suchého mletí se poté přimíchává do namleté suroviny voda, při mokřem už je přítomna při samotném mlecím procesu. Namletá směs s vodou je připravená na enzymatické štěpení škrobu, nejprve na dextriny a poté na zkvasitelné disacharidy a monosacharidy. Používají se speciální enzymatické preparáty, směs takzvaných amylolytických enzymů. Z použité enzymatické směsi jsou nejdůležitější enzymy  $\alpha$ -amyláza,  $\beta$ -amyláza a amyloglukosidáza. Směs ale může dále obsahovat například hemicelulasu, proteázu a celulasu., jejichž použitím lze zvýšit výtěžnost etanolu a snížit viskozitu připravované zápary.

V první fázi dochází k zmazování škrobu, ten se mění v hustou viskózní kapalinu.

V druhé fázi se ve směsi přítomný enzym  $\alpha$ -amyláza podílí na takzvaném ztekucení škrobu, které označuje rozštěpení škrobu na dextriny, což jsou nízkomolekulární polysacharidy. Amylóza se v tomto procesu štěpí na dextriny o šesti až sedmi glukózových jednotkách, amylopektin na dextriny o třinácti glukózových jednotkách.

Ve třetí fázi dochází působením enzymu  $\beta$ -amylázy ke štěpení dextrinů na disacharid maltózu, a pomocí amyloglukosidázy se oddělují jednotlivé jednotky glukózy. Tato fáze se nazývá zcukření škrobu a po ní je výsledný produkt připravený na vlastní fermentaci [29].

### **9.2.3 Příprava zákvasu**

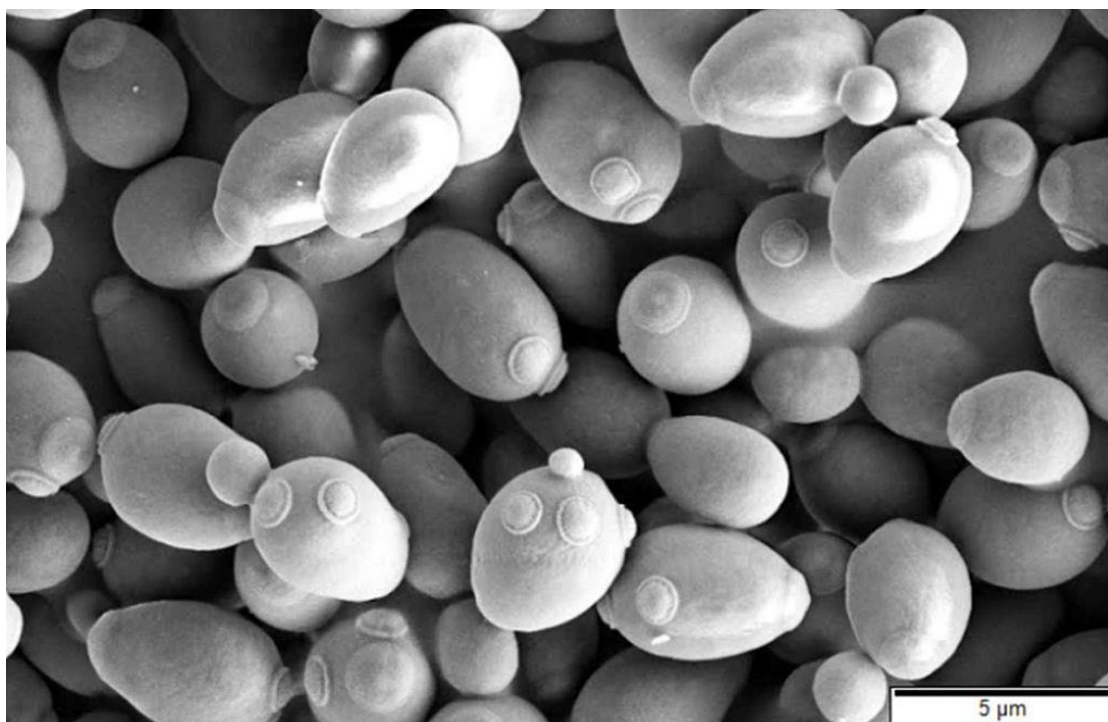
Příprava zákvasu je proces, při kterém se aktivují a namnoží kvasinky určené na fermentaci zápany. Zákvas je připravovaný z alikvotní části zápany přibližně 6 – 8 % jejího celkového množství. Do této části se přidávají kvasinkové kultury a živiny pro optimální průběh kvašení. Kvašení zákvasu probíhá obvykle 24 hodin, optimální je tento proces ukončit ve stádiu, kdy kvasinky zpracovaly dvě třetiny sacharidů původně přítomných ve vstupním médiu pro zákvas. V tomto stádiu se zákvas přidá do připravené sladké zápany a může se zahájit vlastní proces fermentace [29].

### **9.2.4 Alkoholové kvašení (fermentace) zápany ze škrobnatých surovin**

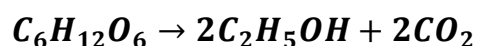
Při alkoholovém kvašení se za pomoci mikrobiotických kultur nazývaných kvasinky přeměňují sacharidy na alkohol. Kvasinky jsou jednobuněčné houbové mikroorganismy patřící do skupiny eukaryotních organismů.

Na alkoholové kvašení, při kterém vzniká etanol, se využívají kvasinky rodu *Saccharomyces*. Nejčastěji používané jsou *Saccharomyces cerevisiae*, které jsou zobrazeny na obr. č. 5. K tomuto druhu jsou ale často také zařazovány různé poddruhy rodu *Saccharomyces*, aby se zajistil optimální průběh kvašení. Například kvasinky spodního kvašení, které mají hydrofilní povrch buněk a snadno sedimentují, a kvasinky svrchního kvašení, u nichž je povrch buněk hydrofobní a jsou vynášeny uvolňujícím se oxidem uhličitým k hladině kvasícího média.

Obr. č. 5: Kvasinky *Saccharomyces cerevisiae* zobrazené elektronovým mikroskopem [30]



Alkoholové kvašení je anaerobní proces, probíhá tedy bez přístupu vzduchu, ale v praxi se nejedná o striktně anaerobní podmínky. Naopak mírné provzdušnění kvasného média hlavně na začátku kvašení optimalizuje množení a aktivitu kvasinkových kultur. Během alkoholového kvašení proběhne nejprve v buňce kvasinky proces zvaný glykolýza, kdy je molekula glukózy přeměněna na 2 molekuly pyruvátu (kyselina pyrohroznová). Pyruvát je poté dekarboxylován na acetaldehyd a oxid uhličitý, v dalším kroku je acetaldehyd redukován na etanol [31]. Alkoholovou fermentaci, kdy z glukózy vzniká etanol a oxid uhličitý lze popsat sumární rovnicí:



Činnost kvasinek se zastavuje při dosažení 14 až 15 % objemové koncentrace etanolu v kvasném médiu. Tato koncentrace je pro kvasinky z hlediska přežití limitní, při vyšší koncentraci už nemohou v médiu přežít. Existují ale speciální typy kvasinek, se kterými lze dosáhnout až 20 % objemové koncentrace etanolu. V praxi se ve většině případů z důvodu optimální efektivity dosahuje hodnoty maximálně 10 až 11 % objemové koncentrace etanolu, protože nad touto hodnotou koncentrace se proces kvašení velmi zpomaluje. Obilné zápary se běžně prokvašují na hodnotu 7 – 8 % objemové koncentrace etanolu.

Rychlost kvašení závisí na více faktorech, na koncentraci a aktivitě kvasinek, složení zářary, pH zářary, teplotě a koncentraci rozpuštěného kyslíku v zářare. Optimální teplota kvašení je 30 °C a pH kvasného média 5.

Při výrobě etanolu ze škrobnatých surovin se nejčastěji používá **periodický způsob kvašení**, u kterého celý proces fermentace probíhá v jedné nádobě (fermentoru).

Používají se dva typy periodického způsobu kvašení:

**Vsádkový periodický způsob** – probíhá bez přítoku kvasného média a používá se hlavně v menších provozech. Proces probíhá při stejném objemu zářary po celou dobu kvašení a skládá se z fáze rozkvašování, kvašení a dokvašování. Jedná se o starší technologii, která se vyznačuje delší dobou kvašení a nízkou produktivitou etanolu.

**Přítokový periodický způsob** – na rozdíl od klasického vsádkového způsobu neprobíhá celý proces při stejném objemu zářary, pro tuto metodu je charakteristický periodický přítok a odtok kvasného média z fermentoru. Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby etanolu ze škrobnatých surovin, je více efektivní než klasický vsádkový způsob. Při optimálních podmínkách lze dosáhnout produktivity etanolu 5 kg/m<sup>3</sup>·h [29].

Dále je možné použít kontinuální a semikontinuální proces kvašení, které se hojně používají při kvašení melasových zářar, a proto budou popsány v kapitole 9.3.4.

## 9.3 Technologie výroby bioetanolu z cukernatých plodin

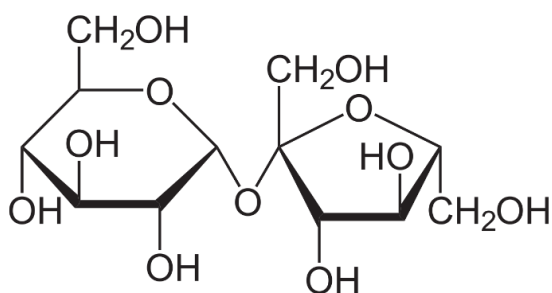
### 9.3.1 Sacharóza

Sacharóza ( $\beta$ -D-fruktofuranosyl- $\alpha$ -D-glukopyranosid) je neredukující disacharid, složený z  $\alpha$ -D-glukózy a  $\beta$ -D-fruktózy, které jsou spojené glykosidickou vazbou. Strukturní vzorec sacharózy je zobrazen na obr. č. 6. Chemický sumární vzorec sacharózy je C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>. Sacharóza je metabolický produkt zelených rostlin, v rostlinách slouží jako transportní rozpustný sacharid. V kyselém prostředí nebo za pomoci enzymu sacharázy se sacharóza štěpí na glukózu a fruktózu, vzniká jejich ekvimolární směs.

Sacharóza je nejběžněji používané sladidlo, její běžné názvy jsou stolní cukr, řepný cukr, třtinový cukr, nebo jen cukr [32].

Sacharóza je kvasinkami přímo zkvasitelná, dovedou ji vlastními enzymy rozkládat, není ji tedy potřeba před vlastní fermentací enzymaticky štěpit jako škrob.

Obr. č. 6: Strukturní vzorec sacharózy – Haworthova projekce [32]



### 9.3.2 Zpracování cukrové řepy

Sklizená cukrová řepa se nejprve vypere vodou a pomocí řezaček rozřeže na proužky tzv. řízky. Z řízků se v extraktoru pomocí horké vody o teplotě 70 – 75 °C extrahuje surová šťáva. Řízky se poté lisují, suší a dále využívají jako krmivo. Extrahovaná surová šťáva se poté pomocí několika technologických kroků čistí od nežádoucích látek, které jsou společně se sacharózou v roztoku přítomné. Dále se upravuje pH šťávy, neutralizují se přítomné kyseliny, aby se zamezilo štěpení sacharózy na glukózu a fruktózu. Takto upravená a vyčištěná šťáva se poté zahušťuje a krystalizuje. Vykrytalizovaná sacharóza se odstředováním odděluje od tekutiny, která pro velký obsah příměsí není schopna vykrytalizovat. Tato hustá sirupovitá tekutina se nazývá melasa a obsahuje přibližně 50 % sacharózy, 18 až 20 % vody a 30 % necukernatých látek organického a anorganického původu.

V současné době se na výrobu etanolu z cukrové řepy využívá právě melasa. Na výrobu etanolu je samozřejmě možné využívat i surovou šťávu z cukrové řepy, ale v současnosti její produkce spíše pokrývá výrobu cukru. Při využití celé cukrové řepy, tedy i její surové šťávy, je postup výroby etanolu velmi podobný postupu při použití pouze melasy, liší se jen úpravami vstupní suroviny a použitými příměsmi v záparách. Postup výroby etanolu z řepné melasy je jednodušší, než je tomu u škrobnatých surovin, sacharózu není potřeba před vlastní fermentací enzymaticky štěpit. Výtěžnost etanolu se obvykle pohybuje mezi 30 a 31 litry etanolu na 100 kilogramů melasy [29].

### 9.3.3 Příprava melasové zápary

Před vlastním zpracováním na etanol by měla být melasa přibližně šest měsíců uskladněná, aby se usadily kaly, jejichž přítomnost není pro fermentaci vhodná. Pro skladování slouží

velké ocelové nádrže – melasníky. Melasa se v melasnících z důvodu lepší čerpatelnosti ředí a také se upravuje její pH přidáním kyseliny sírové. Optimální hodnota pH pro nadcházející fermentaci se pohybuje v rozmezí 4,5 – 5. Pro kontinuální kvašení se v případě potřeby melasa sterilizuje, např. chlorovým vápnem.

Při přípravě zápary není nutné do melasy přidávat dusíkaté živiny, ty se v ní přirozeně vyskytují, dodává se pouze fosfor. Obvykle se připravují dva typy zápary, první řidší s nižší koncentrací sacharózy na zahájení fermentace a druhá hustší s vyšší koncentrací na doplňování fermentorů v průběhu kvašení [29].

### **9.3.4 Alkoholové kvašení (fermentace) melasové zápary**

Stejně jako u kvašení zápar ze škrobnatých surovin lze použít na melasové zápary klasický periodický vsádkový způsob nebo periodický způsob přítokový.

Na kvašení melasových zápar se dále používají:

**Semikontinuální způsob kvašení** – během procesu kvašení se skokově odebírá část objemu zkvašené zápary z fermentoru, a tu nahrazuje nová nezkvašená zápara. Tento postup se periodicky opakuje. Proces kvašení se zahajuje ve fermentoru s hustší záparou o vyšší koncentraci sacharózy a vysoké koncentraci kvasinek. Další přítoky, kterými proudí do fermentoru zápara nezkvašená, mají koncentraci sacharózy nižší.

**Kontinuální způsob kvašení** – pro tento způsob kvašení je charakteristický nepřetržitý přítok sladké zápary do fermentoru za současného odtoku zápary prokvašené. Může jít o systém jednoho nebo více fermentorů. V případě více fermentorů situovaných za sebou (tzv. kaskáda) kvasné médium proudí z jednoho fermentoru do dalšího. Rychlost průtoku kvasného média je dána rychlostí množení kvasinek, při příliš velké rychlosti by docházelo k vyplavování kvasinek z fermentorů umístěných v předních pozicích kaskády. První fermentor bývá z důvodu optimálního průběhu kvašení opatřen vzdušněním. Počet fermentorů v kaskádě je od 2 do více jak 10. Nevýhodou kontinuálních systémů je riziko kontaminace kvasného média, proto je potřeba záparu před kvašením sterilizovat. V současnosti je tento způsob kvašení melasových zápar velmi často používán.

**Způsob Melle – Boinot s recyklací kvasinek (s vratnou separací buněk)** – na kvašení melasových zápar je tento způsob pro svou efektivitu velmi často aplikovaný. Spočívá v tom, že se odebere část už prokvašené zápary, která obsahuje lepší kvasinky, následně se odstředí a ošetří v preparační lázni. Během preparační lázně se za pomoci kyseliny sírové

upraví pH na hodnotu 2 až 4, tím se kvasinky aktivují a zároveň se eliminují jiné nežádoucí mikroorganismy. Takto ošetřené kvasinky se aplikují do nové zápary. To umožňuje použití od začátku fermentace vyšší koncentraci kvasinek, a díky tomu se výrazně zvýší rychlost kvašení [29].

## 9.4 Izolace a úpravy etanolu

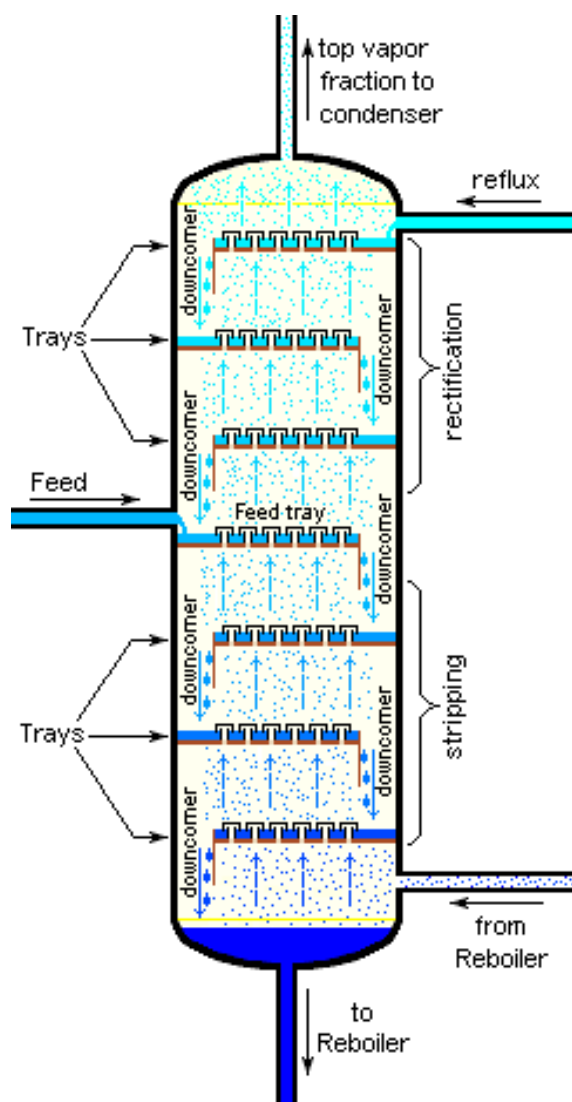
### 9.4.1 Destilace

Destilace je separační metoda, která umožňuje ze směsi od sebe oddělit kapalné látky s odlišnou teplotou varu a těkavostí. Spočívá v tom, že se směs kapalných látek zahřívá a při dosažení teploty varu směs látky s nižším bodem varu a větší těkavostí přechází do plynného skupenství mnohem rychleji než látky s těkavostí menší. Tato látka poté v chladicí části kondenzuje, stéká a je zachycována v nádobě. Tento postup je možné opakovat několikrát až do požadované koncentrace destilované látky. Destilací nelze nikdy dosáhnout 100 % čistoty látky, vždy se při varu směsi odpaří také část ostatních látek přítomných ve směsi. V případě směsi etanolu s vodou se při poměru 95,57 % etanolu a 4,43 % vody při normálním tlaku jedná o azeotropní směs, proto už nelze destilací dosáhnout větší koncentrace etanolu. Tato směs má teplotu varu 78,15 °C a při této teplotě se obě látky odpařují ve stejném hmotnostním poměru, jaký mají v kapalně směsi.

### 9.4.2 Frakční destilace (rektifikace)

Na separaci a zkoncentrování etanolu ze zkvašené zápary se metoda destilace používá, velmi rozšířená je metoda **opakované frakční destilace** označovaná též jako **rektifikace**. Rektifikace je proces umožňující rozdělení jednotlivých složek kapalně směsi. Je velmi využíván například v ropném průmyslu na oddělování jednotlivých ropných produktů a také se používá v lihovarnictví. Proces probíhá v zařízení zvaném kolona, v případě průmyslové destilace etanolu se většinou jedná o kolonu patrovou. Patrová kolona, která je zobrazena na obr. č. 7, je kovová válcová nádoba postavená na výšku, vybavená patry, která mají z jedné strany otvor na stékání kapaliny. Uprostřed kolony je na prostřední patro přiváděna kapalná směs určená k destilaci, v případě záparové kolony je to zápara, která se rozteče po ploše patra a na druhé straně otvorem na stékání protéká do nižšího patra.

Obr. č. 7: Patrová rektifikační kolona [33]



Nižší patro má stékačí otvor na druhé straně, než je místo, na které stéká kapalina z patra horního, kapalina se opět rozteče po ploše patra a stéká otvorem na druhé straně na patro další, kde se děje totéž. Jednotlivá patra jsou tvořena přepážkami, kterými procházejí krátké trubice vyčnívající na horní straně z přepážky. Trubice jsou ze shora zakryty miskami tak, aby páry procházející trubicemi odspodu probublávaly kapalinou roztekle po patře. Zespodu z tzv. vařáku, který je umístěný u spodní části kolony, stoupají páry z vroucí směsi, která do vařáku stéká po jednotlivých patrech. Při styku páry s kapalinou se z kapaliny uvolňuje těkavější etanol a zároveň se z páry kondenzuje méně těkavá voda a další příměsi. Tím se páry na každém patře obohacují o etanol a zároveň se zbavují vody a ostatních příměsí a kapalina se

zase zbavuje etanolové složky. Kapalina stéká po patrech do vařáku, kde je opět zahřívána na teplotu varu. Pára odchází horní částí kolony tzv. hlavou do deflegmátoru, kde částečně kondenzuje na kapalinu. V deflegmátoru kondenzuje převážně voda a další méně těkavé složky páry, a tento kondenzát se vrací zpětným tokem tzv. refluxem zpátky do kolony. Nezkondenzovaná část, kde převažují etanolové páry putuje do kondenzátoru, kde kondenzuje na kapalný surový etanol, jež je výstupním produktem ze záparové kolony. Množství zpětného toku je řízeno mírou chlazení deflegmátoru, čím více se v deflegmátoru páry zchladí, tím větší množství jich zkondenzuje a vrací se refluxem zpátky do procesu. Tím je také výsledný destilovaný etanol koncentrovanější [33].



Výše zmíněný popis se týká **záparové kolony**, na které probíhá separace etanolu ze zápary, vstupní látkou je tu zkvašená zápara. Výstupním produktem ze záparové kolony je surový etanol a zápara zbavená etanolu, která se nazývá **výpalky**. Výpalky ze škrobnatých zápar se využívají jako surovina na přípravu krmiv a melasové výpalky zase na výrobu hnojiv [29].

### 9.4.3 Rafinace etanolu

Surový etanol, který je výstupním produktem ze záparové kolony obsahuje nežádoucí příměsi, které je potřeba z etanolu odstranit. Jsou to těkavé estery a aldehydy, které se označují jako úkap. Dále jsou přítomné vyšší alkoholy např. butanol, propanol a další, dále mastné kyseliny a různé aromatické látky souhrnně označované jako dokap. Odstraňování těchto příměsí se provádí na dalších rektifikačních kolonách, kde se tyto frakce oddělují. Tento čistící proces se nazývá **rafinace**.

Před rafinací je surový etanol naředěn na přibližně 40 % koncentraci. Je to z důvodu lepší účinnosti oddělení frakcí surového etanolu při jeho rafinaci. Takto naředěný surový etanol přichází do rektifikačních kolon, kde je postupně zbaven úkapu, vody a dokapu. Výstupním produktem rafinace je při optimálních podmínkách azeotropní směs etanolu a vody [29].

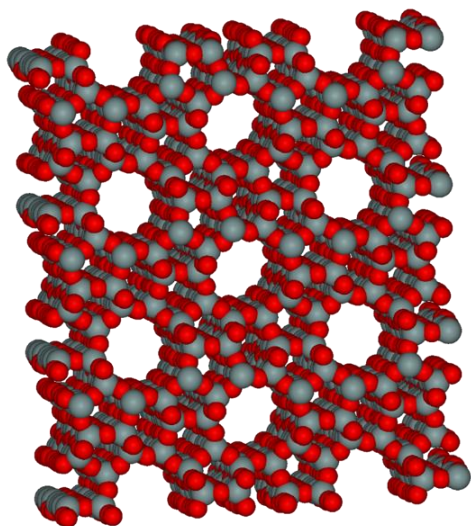
### 9.4.4 Odvodňování etanolu

Rektifikací a rafinací je možné získat azeotropickou směs etanolu o složení 95,57 % etanolu a 4,43 % vody, vyšší koncentrace etanolu nelze těmito technologiemi dosáhnout. Jedná se o takzvaný hydratovaný etanol, který je pro účel použití ve směsi s motorovým benzínem nutné nežádoucí vody zbavit. Lze to provést několika různými metodami, například:

**Odvodňování molekulárními sítí** – provádí se pomocí tzv. zeolitů, což jsou hlinitokřemité materiály mající mikroporézní strukturu. Molekulární struktura krystalové mřížky zeolitu je zobrazena na obr. č. 8. Systém odvodňování tvoří dvě zeolitové kolony, které jsou naplněny zeolitovými kuličkami. Do kolon je přiváděna azeotropní směs etanolu a vody. Směs protéká kolonou, molekuly vody jsou zachycovány v pórech zeolitu a z kolony vytéká odvodněný etanol. Když se první kolona nasytí vodou, přepne se tok hydratovaného etanolu na kolonu druhou. Mezitím se první kolona regeneruje

propařováním horkou párou. Tato metoda je energeticky i ekonomicky výhodná a v současnosti často používaná [29].

Obr. č. 8: Molekulární struktura krystalové mřížky zeolitu [34]



**Destilace za sníženého tlaku** – složení azeotropické směsi je závislé na vnějším tlaku. Za normálního atmosférického tlaku tvoří etanol s vodou azeotropickou směs v poměru 95,57 % etanolu a 4,43 % vody, při tlaku nižším se ve směsi zvyšuje podíl etanolu a snižuje podíl vody. Pokud se v destilační koloně sníží tlak na 9,3 kPa, lze destilací získat téměř čistý etanol, podíl vody je téměř zanedbatelný.

Tato metoda patří z důvodu nutnosti zajištění nízkého tlaku v destilační koloně k ekonomicky méně výhodným [29].

Dále se dá hydratovaný etanol odvodnit metodou **azeotropní destilace**, **extraktivní destilace** nebo též **metodou za pomoci tuhých látek**, které na sebe váží vodu [29].

## 10 Výroba bioetanolu II. generace

### 10.1 Vstupní suroviny pro výrobu

Jak už bylo zmíněno v kapitole 7.2, vstupní surovinou pro výrobu bioetanolu II. generace je lignocelulózová biomasa. Patří sem zbytkové části zemědělských rostlin, odpadní dřevo, dřevo z rychle rostoucích dřevin pěstovaných pro tento účel, různé traviny, biologický odpad atd.

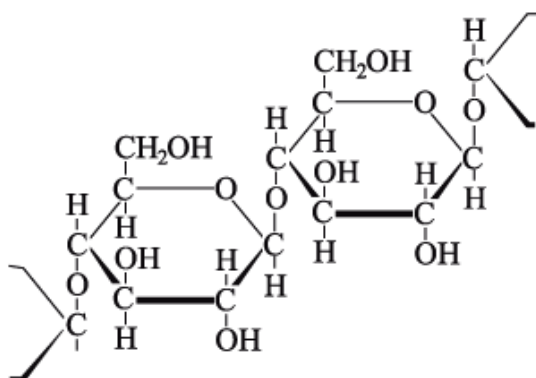
Obecně lze říci, že lignocelulózová biomasa je vláknitá část rostlinného materiálu a jejími hlavními stavebními prvky je celulóza, hemicelulóza a lignin.

## 10.2 Technologie výroby bioetanolu z lignocelulózových materiálů

### 10.2.1 Celulóza, hemicelulóza a lignin

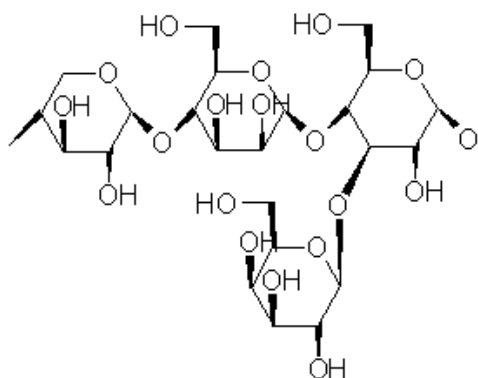
**Celulóza** je polysacharid, který je hlavním stavebním prvkem primárních buněčných stěn rostlin. Molekula celulózy se skládá z přibližně 500 jednotek D–glukózy spojených glykosidovou vazbou  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), které tvoří dlouhé nerozvětvené řetězce. Strukturální vzorec části řetězce celulózy je zobrazen na obr. č. 9. Celulóza polymeruje do dlouhých nevětvených řetězců, které tvoří mikrofibrily, což jsou vlákna složené z velkého počtu molekul celulózy navzájem spojenými vodíkovými můstky. Celulóza je hlavní stavební látkou rostlinných primárních buněčných stěn a společně s ligninem a hemicelulózou tvoří sekundární buněčné stěny. Celulóza není rozpustná ve vodě [35].

Obr. č. 9: Strukturální vzorec části řetězce celulózy [36]



**Hemicelulóza** je polysacharid, který má odlišnou stavbu řetězce než celulóza. V něm jsou kromě glukózy přítomné i další monosacharidy (manóza, galaktóza, arabinóza, xylóza), uronové kyseliny, a případně i různé cukerné methylderiváty. Tvoří rovný řetězec s krátkými postranními řetězci, jak je zobrazeno na obr. č. 10. V buněčných stěnách rostlin tvoří tmelící vrstvu mezi řetězci celulózy a ligninem, na který se váže [37].

Obr. č. 10: Strukturální vzorec části řetězce hemicelulózy – Haworthova projekce [38]

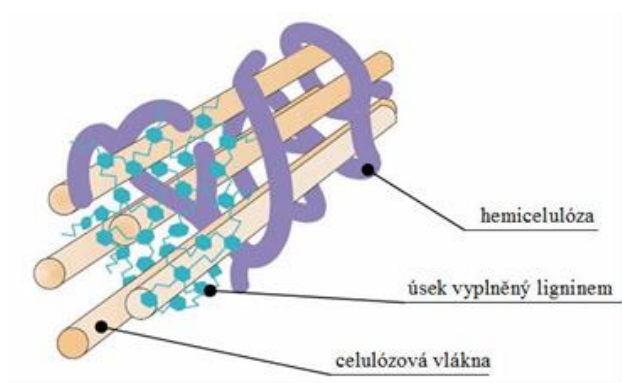


**Lignin** je vysokomolekulární polyfenolická amorfní sloučenina, jejíž základní stavební jednotkou jsou deriváty fenylypropanu. V rostlinách je lignin po celulóze nejčastěji zastoupenou sloučeninou, tvoří přibližně 25 % veškeré rostlinné biomasy, v největší míře je přítomný v sekundární buněčné stěně rostlinných buněk. V dřevinách plní hydrofobní funkci, spojuje mezibuněčná vlákna, zpevňuje buněčné stěny a zabezpečuje jejich dřevnatění. Jedná se o důležitou složku dřeva, dodává mu pevnost, především v tlaku. V buněčné stěně tvoří lignin nepropustnou prostorovou strukturu odolnou proti mikrobiálnímu rozkladu a oxidaci [39], [40].

### 10.2.2 Předúprava lignocelulóзовých materiálů

Celulóza spolu s hemicelulózou a ligninem tvoří rigidní matici, která je zobrazena na obr. č. 11. Aby bylo možné lignocelulóзовý materiál využít k výrobě etanolu, je nutné rozrušit jeho strukturu a následně ho rozložit na zkvasitelné sacharidy.

Obr. č. 11: Modelové zobrazení struktury lignocelulóзовého materiálu [41]



Proto je výroba etanolu z lignocelulózových materiálů náročnější než výroba z cukernatých nebo škrobnatých plodin. Nejprve se lignocelulózový materiál musí upravit mechanicky, drtí se, případně i mele. Další proces je fyzikálně – chemického charakteru, kdy dochází k hydrolyze hemicelulózy a uvolnění ligninu. Lze to provést několika možnými způsoby, nejčastěji používanou metodou je vaření dřevěné drtě v kyselině siřičité za vysokého tlaku a teploty. Během tohoto procesu hemicelulóza hydrolyzuje na monosacharidy a tím se uvolní celulóza k následnému enzymatickému štěpení [40].

### **10.2.3 Enzymatické štěpení celulózy**

Po výše zmíněné předúpravě je uvolněná celulóza v materiálu připravena na enzymatické štěpení na zkvasitelné sacharidy. Používají se na to celulolytické enzymy, které zahrnují tři typy enzymových skupin: endoglukanázy, exoglukanázy a  $\beta$ -glukosidázy.

Endoglukanázy štěpí řetězec celulózy na různě dlouhé řetězce, které pak exoglukanázy rozkládají na celobiózu a glukózu. Celobiózu hydrolyzují  $\beta$ -glukosidázy na jednotlivé glukózové jednotky.

### **10.2.4 Alkoholové kvašení (fermentace) zápar z hydrolyzované celulózy**

Po takto provedené hydrolyze je možné přistoupit k přípravě zápar a jejich fermentaci. Jelikož je hydrolyzovaná směs chudá na živiny pro kvasinky, je nutné je do roztoku doplnit, například přidáním kvasničného extraktu nebo kukuřičných výluhů. Na samotnou klasickou fermentaci se tradičně nejčastěji používají kvasinky *Saccharomyces cerevisiae*. Existuje i možnost, že by fermentace mohla probíhat bez předchozího enzymatického štěpení celulózy. Je to možné, pokud se na fermentační proces použijí bakteriologické kultury *Clostridium thermocellum*. Tyto bakterie jsou schopné rozkládat jak glukózu, tak i celobiózu a celulózu, ale jejich velkou nevýhodou je nízká tolerance ke vznikajícímu etanolu.

Další možností je spojení procesu fermentace s enzymovou hydrolyzou celulózy, tato technologie je označovaná jako SSF (simultaneous saccharification and fermentation – současná sacharizace a fermentace). V tomto případě probíhá hydrolyza celulózy společně s fermentací v jednom bioreaktoru. Během hydrolyzace vznikající glukóza je následně ihned zpracovávána mikroorganismy na etanol. Výhodou je zkrácení doby celého procesu a menší nákladnost. Použití této technologie ale naráží i na problémy, jedním z nich je odlišnost hodnot optimálních teplot u hydrolyzy a fermentace. U hydrolyzy se optimální

teplota pohybuje mezi 45 – 50 °C a u fermentace kolem 30 °C. Z tohoto důvodu je nutné volit kompromisní teplotní podmínky, což má za následek omezení rychlosti a efektivnosti obou procesů. Tento problém by mohl být eliminován použitím termofilních kmenů, které jsou schopné množení a efektivní produkce etanolu za teplot blížících se teplotám, které jsou optimální pro enzymatickou hydrolýzu [42].

Po fermentaci následují procesy rektifikace, rafinace a odvodnění etanolu. Postup těchto procesů je popsán v kapitole 9.4.

## 11 Praktická část

Praktická část diplomové práce popisuje laboratorní měření a zpracování výsledků z měření, které mělo za cíl zjistit vliv etanolu jako příměsi v motorovém benzínu při použití ve standardním zážehovém motoru. V závislosti na poměrovém množství etanolu ve směsi s benzínem byl měřen jeho vliv na produkci škodlivých emisí, výkon motoru, točivý moment motoru a celkovou spotřebu paliva.

Zkušební měření bylo provedeno na válcové zkušebně v technické laboratoři Katedry vozidel a pozemní dopravy v areálu Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze za použití testovacího vozidla a přístrojového vybavení technické laboratoře.

Během měření bylo použito celkem pět palivových směsí, které se od sebe lišily poměrovým složením etanolu a motorového benzínu. U každé směsi byly provedeny tři měřicí cykly WLTC třídy 3b, z jejich výsledků byl pro každou směs vypočítán aritmetický průměr jednotlivých zjišťovaných průběhových hodnot, které byly graficky zpracovány.

### 11.1 Testovací vozidlo

Vozidlo, které bylo využito na zkušební měření, je ŠKODA Karoq 1,5 TSI / 110 kW, modelový rok 2019, které bylo Katedře vozidel a pozemní dopravy ČZU poskytnuto společností ŠKODA AUTO a.s. k výzkumným účelům. Vozidlo je zobrazené na ilustračním obr. č. 12.

*Obr. č. 12: Škoda Karoq 1,5 TSI / 110 kW [43]*



Testovací vozidlo disponuje řadovým přeplňovaným zážehovým motorem s přímým vstříkem paliva. Jedná se o standardní benzínový motor bez možnosti použití paliva s většinovým podílem etanolu, vozidlo tedy nepatří do kategorie Flexible Fuel Vehicle.

Technické parametry vozidla jsou uvedeny v tab. č. 4.

Tabulka č. 4: Parametry testovacího vozu ŠKODA Karoq [44]

<b>Motor</b>	<b>Zážehový, přeplňovaný s přímým vstříkem</b>
<b>Počet válců</b>	<b>4, systém aktivního odpojování válců během jízdy</b>
<b>Počet ventilů</b>	<b>16</b>
<b>Zdvihový objem válců</b>	<b>1498 cm<sup>3</sup></b>
<b>Maximální výkon</b>	<b>110 kW při 5000 - 6000 ot./min.</b>
<b>Maximální točivý moment</b>	<b>250 Nm při 1500 - 3500 ot./min.</b>
<b>Emisní norma</b>	<b>Euro 6d - TEMP</b>
<b>Katalyzátor</b>	<b>Třícestný oxidačně - redukční</b>
<b>Filtr pevných částic</b>	<b>Ano</b>
<b>Palivo</b>	<b>benzín</b>
<b>Emise CO<sub>2</sub></b>	<b>118 g/km</b>
<b>Pohotovostní hmotnost</b>	<b>1378 kg</b>
<b>Celková hmotnost</b>	<b>1915 kg</b>
<b>Pohon</b>	<b>4x2</b>
<b>Převodovka</b>	<b>6 - stupňová, manuální</b>
<b>Maximální rychlost</b>	<b>203 km/h</b>
<b>Kombinovaná spotřeba udávaná výrobcem</b>	<b>5,2 l/100 km</b>
<b>Modelový rok</b>	<b>2019</b>
<b>Výrobce</b>	<b>Volkswagen AG</b>
<b>Karoserie</b>	<b>4 dv. SUV - kombi</b>

Výkon 110 kW odpovídá maximálnímu výkonu udávanému výrobcem u sériově vyráběného vozu. Vozidlo, které bylo poskytnuto výrobcem k testování, mělo motor vyladěný na maximální výkon 130 kW.



## 11.2 Palivové směsi

Na přípravu palivových směsí byl použitý benzín Natural 95 a rafinovaný 96 % etanol. Vybrané technické specifikace z dodacího formuláře benzínu Natural 95 jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5: Technické specifikace benzínu Natural 95

Parametr	Hodnota
Hustota při 15 °C [kg/m <sup>3</sup> ]	751,15 kg/m <sup>3</sup>
Oktanové číslo VM	97,3
Obsah síry	6,6 mg/kg
Obsah etanolu	4,5 % obj.
Obsah ETBE	4,28 % obj.
Tlak par	77,2 kPa

U použitého rafinovaného 96 % etanolu se jednalo o azeotropickou směs etanolu s vodou (95,57 % etanolu a 4,43 % vody).

Celkem bylo použito pět různých palivových směsí lišících se poměrovým složením. Jednalo se o palivové směsi s 4,5 %, 10 %, 15 %, 25 % a 35 % objemového množství etanolu. Jelikož benzín Natural 95 již v sobě 4,5 % etanolu obsahuje, jako výchozí byla na míchání ostatních směsí použita právě tato směs s 4,5 % objemového množství etanolu, což odpovídá čistému Naturalu 95 bez přidaného dalšího etanolu. Při míchání všech směsí se počítalo s původním množstvím etanolu v benzínu Natural 95, etanol se přidával do benzínu v takovém množství, aby bylo dosaženo požadovaných konečných koncentrací etanolu. Pro dosažení přesných hodnot koncentrací byl při míchání jednotlivých směsí používán odměrný válec.

## 11.3 Použité měřicí přístrojové zařízení

### 11.3.1 Válcová zkušebna

Měření bylo provedeno na jednonápravové válcové zkušebně Katedry vozidel a pozemní dopravy ČZU. Základním prvkem válcové zkušebny jsou dva válce navzájem spojené řetězovým převodem. Na jejich pravé straně je k válcům řetězovým převodem připojena soustava setrvačníků. Tato soustava se skládá z pěti setrvačníků, které lze jednotlivě pomocí ovládacího softwaru připojit nebo odpojit v závislosti na provozní hmotnosti

vozidla. Setrvačníky společně s válci a všemi ostatními rotujícími prvky svým výsledným momentem setrvačnosti simulují setrvačnost vozidla. Pokud je celá tato soustava uvedena do rotačního pohybu, její výsledný moment hybnosti simuluje hybnost vozidla při normální jízdě po silnici.

Dalším prvkem, který je napojen na válce na jejich levé straně, je motorgenerátor. Na válce je napojen také pomocí řetězového převodu. Motor vozidla při testu roztáčí válce přední hnací nápravou, která je ustavena oběma koly na válkách. S rostoucí obvodovou rychlostí válců se zvyšuje brzdná síla motorgenerátoru, a tím se simuluje odporová síla vzduchu při normální jízdě, která roste s druhou mocninou rychlosti.

Součástí válcové zkušebny je dále vířivá brzda (dynamometr), která je využívána jako brzdný prvek při měření průběhu výkonu a točivého momentu motoru.

Parametry jednotlivých součástí válcové zkušebny jsou uvedeny v tab. č. 6.

*Tabulka č. 6: Parametry jednotlivých součástí válcové zkušebny*

Součást	Parametr	Hodnota
Válce	Průměr	365 mm
Stejnoseměrný motorgenerátor	Maximální otáčky	3000 ot./min.
	Maximální brzdý výkon	56 kW
	Maximální brzdý moment	305 Nm
Vířivá brzda	Maximální otáčky	8000 ot./min.
	Maximální brzdý výkon	125 kW
	Maximální brzdý moment	478 Nm
Tenzometr	Jmenovité zatížení	2 kN
	Přesnost	0,5 % jmenovitého zatížení
	Opakovatelnost	0,05 %
Sada setrvačníků	Základní simulovaná hmotnost	680 kg
	Přídavné hmotnosti setrvačníků	112,5 kg, 120 kg, 225 kg, 450 kg, 900 kg

### 11.3.2 Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C

Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C zobrazený na obr. č. 13, je při měření umístěn před měřeným vozidlem, které je ustaveno hnací nápravou na válkách zkušebny.

Obr. č. 13: Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C [45]



Ventilátor je původně navržen jako odsávací, ale na válcové zkušebně je instalován tak, že jeho výtláčná trubice míří na přední masku měřeného vozu, aby proud vzduchu odváděl teplo z chladiče a částečně také z výfukového potrubí ve spodní části vozidla. Řídící software nastavuje rychlost otáčení ventilátoru v závislosti na rychlosti otáčení válců zkušebny. Se vzrůstající rychlostí otáčení válců vzrůstá objemový průtok vzduchu tak, aby byly vytvořeny podobné podmínky, jako je tomu při normální jízdě po silnici.

Základní technické parametry odsávacího ventilátoru FILCAR AL-1500/C jsou uvedeny v tab. č. 7.

Tabulka č. 7: Technické parametry ventilátoru FILCAR AL-1500/C [45]

<b>Maximální výkon sání</b>	<b>12 000 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Napájení</b>	<b>230/400 V - 3 f. (50 Hz)</b>
<b>Příkon</b>	<b>11 kW (15 HP)</b>
<b>Otáčky motoru</b>	<b>2 800 ot./min.</b>
<b>Hlučnost</b>	<b>89 dB</b>
<b>Příruba sání a výfuku</b>	<b>Ø 380 mm</b>
<b>Hmotnost</b>	<b>203 kg</b>

### 11.3.3 Laboratorní váha Vibra AJ-6200CE

Laboratorní váha Vibra AJ-6200CE, která je zobrazena na obr. č. 14, je při testování použita na měření průběžného hmotnostního úbytku paliva během testovacího cyklu. Váha je určena pro použití v laboratořích, zlatnictví a různých průmyslových odvětvích.

Obr. č. 14: Laboratorní váha Vibra AJ-6200CE [46]



Jedná se o vysoce přesnou laboratorní váhu, její přesnost zajišťuje snímací člen VIBRA MMTS, který pracuje na principu vibračního článku a je vysoce odolný proti elektromagnetickému i elektrostatickému rušení a změnám teploty. Součástí váhy je sériové datové rozhraní RS232 na připojení k počítači pro vyhodnocování naměřených dat. Technické specifikace váhy jsou uvedeny v tabulce č. 8

Tabulka č. 8: Technické specifikace váhy Vibra AJ-6200CE [46]

Parametr	Hodnota
Maximální váživost	6200 g
Dílek (d) / přesnost	0,01 g
Ověřitelný dílek	0,1 g
Třída přesnosti	I
Způsob kalibrace	Externí
Rozměr měřicí desky	180 x 160 mm
Napájení:	Adaptér / Akumulátor
Komunikační rozhraní ve standardu	RS 232
Přípustná teplota prostředí:	0 °C - 35 °C
Provedení (materiál)	Kov / Plast
Výrobce	VIBRA

### 11.3.4 Emisní analyzátor VMK

Na měření jednotlivých složek plynných emisí ve výfukových spalínách motoru během testování byl použit emisní analyzátor VMK. Jedná se o pěti-složkový emisní analyzátor, který se používá k měření hodnot jednotlivých složek emisí ve výfukových plynech spalovacích motorů. Tento analyzátor je schopen měřit a s frekvencí 1 Hz ukládat okamžité hodnoty emisí oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), nespálených uhlovodíkových sloučenin (H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>), oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) a kyslíku (O<sub>2</sub>). Uhlíkové sloučeniny se analyzují pomocí metody NDIR (Nondispersive Infrared). Tato metoda je založena na principu absorpce infračerveného záření detekovanými plyny. Výfukové plyny jsou odebírány z koncovky výfukového potrubí pomocí sondy, která je součástí analyzátoru. Infračervené záření vycházející ze zářiče se šíří měrnou trubicí, kterou výfukové plyny prochází. Plyny část záření absorbují, zbylá část dopadá na infračervený detektor a následně je vyhodnocován úbytek záření, který je přímo úměrný koncentraci detekovaných plynů. Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) a kyslík (O<sub>2</sub>) se analyzují pomocí elektrochemických článků. Oxid uhelnatý, oxid uhličitý a kyslík přístroj vyhodnocuje v jednotkách procent, nespálené uhlovodíkové sloučeniny a oxidy dusíky v jednotkách ppm (parts per million).

Dosahovanou přesnost jednotlivých složek emisí znázorňuje tab. č. 9.

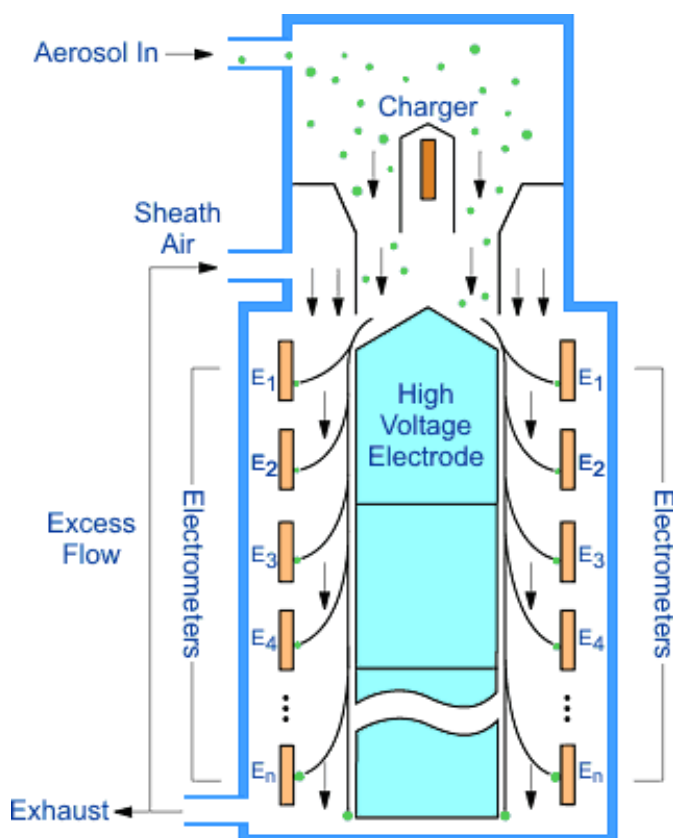
Tabulka č. 9: Přesnost měření jednotlivých složek emisí analyzátozem VMK [47]

Měřená složka	Rozsah	Rozlišení	Nejistota měření
CO	0 - 10 % vol.	0,001 % vol.	0 - 0,67% : 0,02% absolutně, 0,67 - 10% : 3% z naměřené hodnoty
CO <sub>2</sub>	0 - 16 % vol.	0,01 % vol.	0 - 10% : 0,3% absolutně, 10 - 16% : 3% z naměřené hodnoty
H <sub>x</sub> C <sub>y</sub>	0 - 20 000 ppm	1 ppm	10 ppm nebo 5% z naměřené hodnoty
NO <sub>x</sub>	0 - 5 000 ppm	1 ppm	0 - 1000 ppm : 25 ppm, 1000 - 4000 ppm : 4% z naměřené hodnoty
O <sub>2</sub>	0 - 22 % vol.	0,1 % vol.	0 - 3% : 0,1% 3 - 21% : 3% z naměřené hodnoty

### 11.3.5 Částicový analyzátor TSI EEPS 3090

Na měření množství a spektra pevných částic byl při testování použit částicový analyzátor TSI EEPS 3090. Tento spektrometr dovede vyhodnotit nejenom množství pevných částic v odebíraném vzorku výfukových plynů, ale také spektrum jejich velikostí. Na obr. č. 15 je znázorněno zjednodušené schéma spektrometrické detekce pevných částic.

Obr. č. 15: Schéma spektrometrické detekce pevných částic [48]



Výfukové plyny jsou odebírány z koncovky výfukového potrubí pomocí trubicové sondy, která je součástí částicového analyzátoru. Mezi trubicovou sondou a analyzátozem je zapojeno rotační termoředící zařízení, ve kterém se výfukové plyny zředí vzduchem a vytvoří se vzorek o požadované koncentraci a teplotě. Takto upravený vzorek putuje do horní části analyzátoru, kde se částice obsažené v plynu nabíjí na záporné nabíjecí koruně záporným nábojem, aby měl aerosol jednotnou polaritu. Poté

je aerosol nabit kladně na kladné nabíjecí koruně a vstupuje do prstencové oblasti mezi vnitřním sloupcem a vnějším válcem, která se skládá z 22 elektroměrů. Vnitřní sloupec tvoří tři kladně nabitě elektrody, které jsou umístěny nad sebou. Na každé elektrodě je odlišné napětí, na vrchní 85 V, na prostřední 470 V a na spodní 1200 V. Aerosol je transportován dolů prstencovou oblastí pomocí proudu čistého vzduchu, který vniká do analyzátoru tryskami, které se nacházejí pod nabíjecími korunami. Při průchodu aerosolu touto oblastí jsou kladně nabitě částice odpuzovány vlivem elektrostatického pole vnitřního sloupce a dopadají na elektroměry, které jsou umístěny na vnitřní části vnějšího válce. Předávají jim svůj náboj, a tím se v elektroměrech indukuje elektrický proud. Velikost

částice ovlivňuje místo jejího dopadu, nejmenší částice dopadají na elektroměry umístěné v horních částech vnějšího válce. Čím jsou částice těžší, tím je také vyšší jejich setrvačná hmotnost a trvá déle, než je elektrická síla elektrostatického pole vychýlí z původního směru tak, aby dopadly na elektroměry na vnějším válci. Proto dopadají na vnější válec později a v nižších polohách. Přístroj podle četnosti, místa a doby dopadu vyhodnocuje množství a velikost přítomných pevných částic [48]. Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 je zobrazen na obr. č. 16.

*Obr. č. 16: Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 [49]*



Technické parametry částicového analyzátoru jsou uvedeny v tab. č. 10.

*Tabulka č. 10: Technické parametry částicového analyzátoru [49]*

Parametr	Hodnota
Rozsah měřených velikostí částic	5,6 - 560 nm
Rozlišení	16 kanálů na dekádu (32 kanálů celkem)
Počet elektroměrů	22
Režim nabíjení částic	Unipolární difúzní nabíječka
Vzorkovací frekvence	10 Hz
Průtok vzorku	10 l/min.
Teplota vzorku	10 - 52 °C
Provozní teplota	0 - 40 °C
Pracovní tlak (autokorekce přístrojem)	70 - 103 kPa

### **11.3.6 Rotační termoředicí zařízení TSI Rotating Disk Thermodiluter 379020A (ředička)**

Rotační termoředicí zařízení je společně s trubicovou sondou, pomocí které jsou odebírány výfukové plyny, součástí příslušenství částicového analyzátoru TSI EEPS 3090. Toto zařízení upravuje odebrané výfukové plyny z výfukové koncovky vozidla. Výfukové plyny jsou v termoředicím rotačním přístroji naředěny vzduchem na požadovanou koncentraci, ohřáty na požadovanou teplotu a poté jako vzorek proudí do částicového analyzátoru na vyhodnocení. Plyny se během ředění ohřívají, aby se zabránilo kondenzaci vody a těkavých látek. Tato skutečnost by negativně ovlivňovala přesnost měření. Vzduch, kterým se výfukové plyny ředí, je nasáván přes HEPA filtr, aby byl zbaven nežádoucích částic, jejichž přítomnost by ovlivnila výsledky měření.

## **11.4 Softwarové vybavení**

V této kapitole je stručně popsán počítačový software, který byl během testování využíván na řízení přístrojových zařízení, zaznamenání naměřených dat a zobrazování průběžných naměřených hodnot v reálném čase.

### **11.4.1 Aplikace Datlab v prostředí ControlWeb**

Aplikace Datlab byla v programovém prostředí ControlWeb vytvořena zaměstnanci Katedry vozů a pozemní dopravy ČZU. Systém Datlab na řídicím počítači, který je napojen na válcovou zkušebnu, ventilátor FILCAR a váhu VIBRA, ovládá, zaznamenává a zobrazuje nastavení parametrů válcové zkušebny a průběh jízdního cyklu. Zaznamenává a zobrazuje okamžitou i požadovanou rychlost, místa řazení na požadovaný rychlostní stupeň v trase cyklu a průběžnou trasu cyklu. Dále řídí rychlost otáček ventilátoru FILCAR, a tím ovlivňuje velikost objemového průtoku chladicího vzduchu. Aplikace též zaznamenává průběžný hmotnostní úbytek paliva během jízdního cyklu z dat laboratorní váhy.

### **11.4.2 Diagnostický program VAG – COM (VCDS) Standard**

Diagnostický program VAG – COM Standard je počítačový program, který je schopen se prostřednictvím osobního počítače nebo laptopu spojit s řídicími jednotkami všech vozidel vyrobenými koncernem Volkswagen Group od roku 1996, které jsou vybaveny šestnácti – pinovým konektorem OBD. Program je vyvinut pro spuštění v operačním systému



Microsoft Windows. Tento diagnostický nástroj je určen k amatérskému používání pro drobné a začínající autodílny. Umožňuje čtení paměti závad, jejich mazání, jednoduché vyhledávání chyb a základní programování řídicích jednotek [50]. Na obr. č. 17 je zobrazeno grafické uživatelské rozhraní diagnostického programu VAG – COM Standard.

Obr. č. 17: Grafické uživatelské rozhraní diagnostického programu VCDS Standard [50]

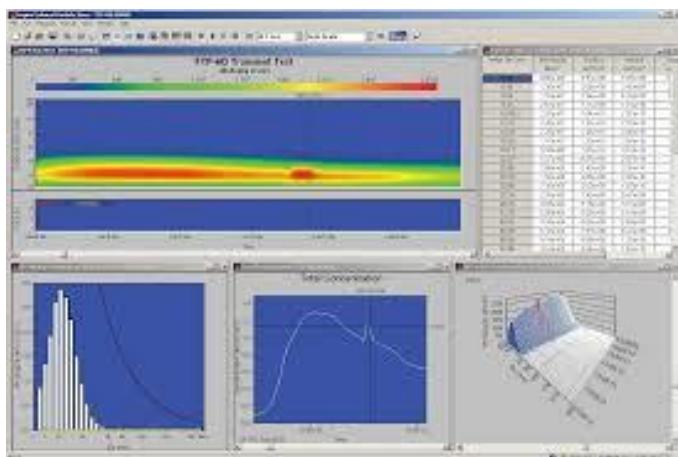


Při měření byly pomocí tohoto programu zaznamenávány otáčky motoru, tlak paliva, hmotnostní průtok vzduchu v sacím potrubí a absolutní tlak v sacím potrubí.

## 11.4.2 Software EEPS

Software EEPS je instalovaný na osobním počítači připojeném k částicovému analyzátoru EEPS. Slouží k ovládání částicového analyzátoru, nastavování a zobrazování jeho parametrů a pro sběr, analýzu a zobrazování dat z měření. Umožňuje průběžné zobrazení celkové koncentrace pevných částic v měřeném vzorku v reálném čase.

Obr. č. 18: Grafické rozhraní softwaru EEPS [51]



Dále pak software zobrazuje pevné částice podle jejich velikosti pomocí histogramu nebo 3D grafu, který zobrazuje rozdělení částic podle velikosti a jejich koncentraci v závislosti na čase. Grafické rozhraní softwaru EEPS je zobrazeno na obr. č. 18.

Naměřená data lze zobrazit také v tabulkovém formátu, kde jsou částice rozdělené podle jejich velikosti s udanou hodnotou jejich počtu na 1 cm<sup>3</sup>. Naměřené hodnoty software ukládá ve formátu, který lze otevřít v tabulkovém procesoru (Microsoft Excel) k dalšímu zpracování.

## 11.5 Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC)

Jízdní cyklus, který pro každou zkoušenou palivovou směs testovací vozidlo třikrát absolvovalo, patří do kategorie testovacích cyklů označovaných WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles). Jedná se o celosvětově sladěné (harmonizované) zkušební testy lehkých vozidel. Tyto testy jsou součástí tzv. WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures – celosvětově harmonizované zkušební postupy pro lehká vozidla). WLTP celosvětová norma, která byla vyvinuta UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) pro určování míry škodlivých emisí a spotřeby paliva u lehkých vozidel. WLTP v období 2017 – 2019 plně nahradila původní evropskou normu založenou na jízdním testovacím cyklu NEDC. Součástí WLTP jsou nejen zkušební jízdní testy WLTC, které se provádějí na válcové zkušebně, ale také zkušební jízdy RDE (Real Driving Emissions), kde se měří hodnoty emisí při reálné jízdě v běžném provozu.

WLTP zahrnuje několik zkušebních cyklů WLTC, které se od sebe liší v závislosti na hodnotě PMR. PMR (Power to Mass Ratio) je poměr jmenovitého výkonu motoru vozidla [W] a jeho pohotovostní hmotnosti [kg]. WLTC jsou podle této hodnoty rozděleny do tří tříd, jak je uvedeno v tab. č. 11.

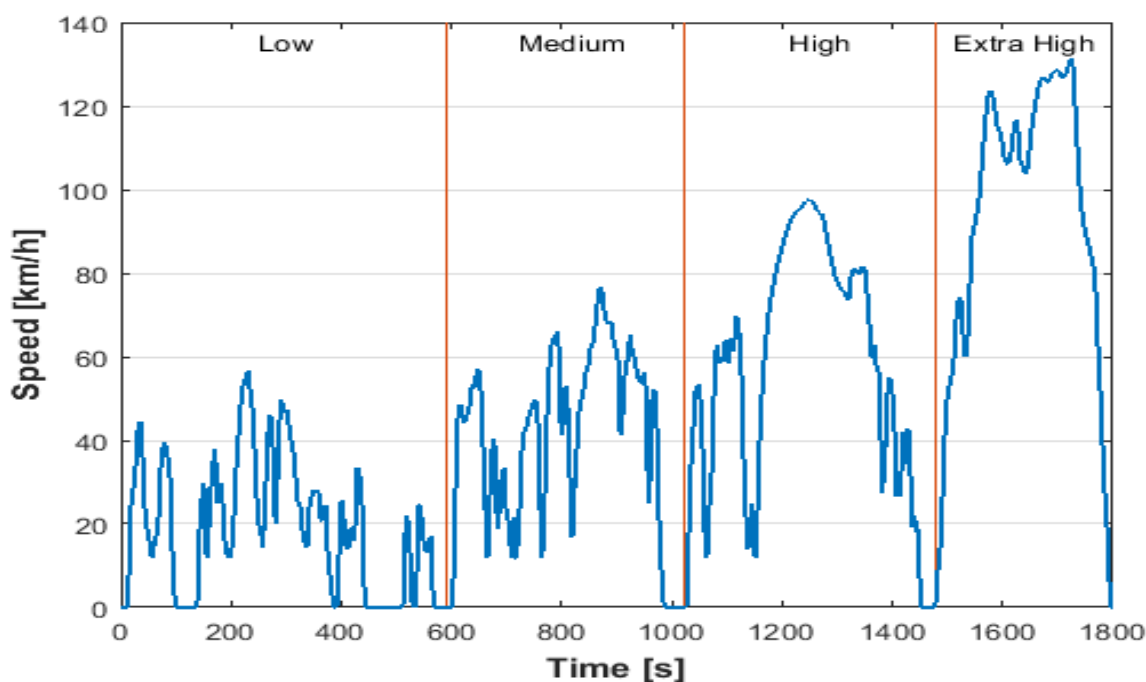
Tabulka č. 11: Třídy WLTC [52]

Category	PMR, W/kg	v <sub>max</sub> , km/h	Speed Phase Sequence
Class 3b	PMR > 34	v <sub>max</sub> ≥ 120	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3
Class 3a		v <sub>max</sub> < 120	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Class 2	34 ≥ PMR > 22	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Class 1	PMR ≤ 22	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1

Třída 3 je rozdělena do dvou podtříd podle maximální dosažitelné rychlosti vozidla, 3a pro vozidla s maximální rychlostí do 120 km/h a 3b s maximální rychlostí vyšší než 120 km/h [52].

Testovací vozidlo ŠKODA Karoq 1,5 TSI s patří poměrem jmenovitého výkonu 110 000 W a pohotovostní hmotnosti 1378 kg a svou maximální rychlostí 203 km/h do třídy 3b. Proto byl během měření používán jízdní cyklus WLTC třídy 3b, jehož grafický průběh je zobrazen na obr. č. 19.

Obr. č. 19: Grafický průběh cyklu WLTC třídy 3b [52]



Jízdní cyklus zahrnuje čtyři různé jízdní režimy, imaginární trasa jízdního cyklu se skládá ze čtyř na sebe navazujících částí. První část se vyznačuje nízkým zatížením motoru a maximální rychlostí okolo 55 km/h, tato část má simulovat jízdu po městě. Druhá část se vyznačuje středním zatížením motoru, s úseky s vyššími akceleracemi a maximální rychlostí okolo 75 km/h. V třetí části je již zatížení motoru vysoké, s úseky vysoké akcelerace a s maximální rychlostí okolo 95 km/h. Čtvrtá část simuluje jízdu po dálnici s nejvyšší rychlostí 131,3 km/h, zatížení motoru je velmi vysoké.

Doba trvání jízdního cyklu je 1800 s, imaginární trasa jízdního cyklu měří 23,27 km, průměrná rychlost vozidla během jízdního cyklu je 46,5 km/h a nejvyšší dosažená rychlost je 131,3 km/h.

## 11.6 Metodika měření

V této kapitole je popsána příprava měřicího stanoviště a postup měření na válcové zkušebně v technické laboratoři Katedry vozidel a pozemní dopravy.

### 11.6.1 Instalace vozidla a přístrojů před zahájením testovacího jízdního cyklu

Testovací vozidlo bylo ustaveno přední hnací nápravou na válce válcové zkušebny, zajištěno parkovací brzdou a přichyceno čtyřmi popruhy k fixačním okům v podlaze. Zepředu byly dva popruhy přichyceny k tažnému oku vozidla a vzadu dva popruhy k jeho tažnému zařízení. Všechny popruhy byly dostatečně dotaženy.

Před masku vozidla byl postaven ventilátor FILCAR AL-1500/C na zajištění odvodu tepla z chladiče motoru a částečně také z výfukového potrubí ve spodní části vozidla. Ventilátor byl připojen ke spínací skříni, která byla propojena s řídicím počítačem.

Řídicí počítač s aplikací Datlab byl propojen s centrálním ovládním válcové zkušebny, spínací skříni ventilátoru a laboratorní vahou Vibra AJ-6200CE.

Na laboratorní váhu byla instalována externí nádrž s připravenou palivovou směsí. Způsob přípravy palivových směsí je popsán v kapitole 11.2. Jako první se testoval samotný benzín Natural 95, který obsahuje 4,5 % etanolu. Do externí nádrže bylo vloženo externí palivové čerpadlo s palivovým filtrem, které bylo napojeno na hadici vedoucí k vysokotlakému čerpadlu v palivovém systému vozidla. Do externí nádrže ústila vratná palivová hadice, která uzavírala nízkotlaký palivový okruh. Účelem této instalace byla možnost měření přesného průběžného hmotnostního úbytku paliva během jízdního cyklu. Úbytek paliva byl zaznamenáván programem Datlab.

Před čelní sklo byl umístěn externí monitor, který byl napojen k řídicímu počítači. Bylo to z důvodu, aby zkušební řidič mohl sledovat průběh trasy jízdního cyklu, dodržovat požadovanou rychlost v závislosti na úseku trasy a řídit požadovaný rychlostní stupeň.

K řídicí jednotce byl připojen přes standardizované diagnostické rozhraní OBD-II druhý počítač s diagnostickým systémem VAG-COM Standard.

Do výfukové koncovky byla vložena trubicová sonda plynového analyzátoru VMK.

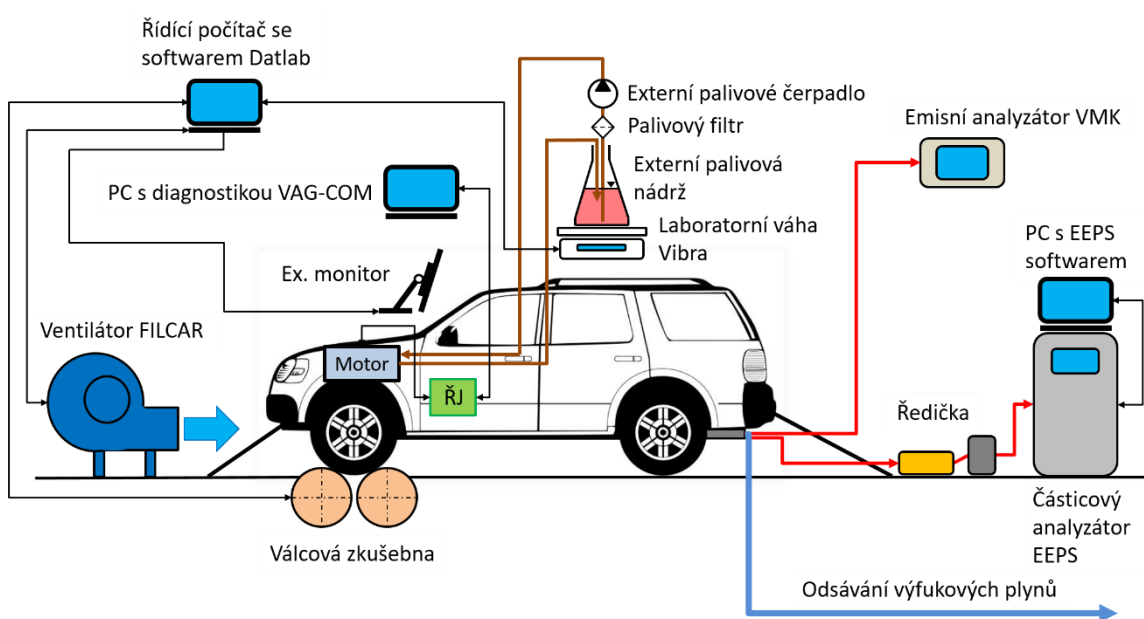
Poté byla do výfukové koncovky vložena také sonda částicového analyzátoru, která byla napojena na rotační termořídící zařízení TSI Rotating Disk Thermodiluter 379020A, a to bylo napojeno na částicový analyzátor TSI EEPS 3090. Částicový analyzátor byl propojen

s třetím počítačem, na kterém byl spuštěn EEPS software pro ovládání a nastavení analyzátoru a pro sběr, analýzu a zobrazování dat z měření.

K výfukové koncovce pak byla umístěna hadice s odsávací koncovkou, která byla napojena na odsávací ventilátor. Ten měl za úkol odvádět přebytečné výfukové plyny ven z technické laboratoře.

Schéma měřicího stanoviště včetně testovacího vozidla, všech použitých přístrojů a jejich vzájemného zapojení je zobrazeno na obr. č. 20.

Obr. č. 20: Schéma měřicího stanoviště



### 11.6.2 Průběh jízdního cyklu WLTC, měření hodnot emisí, měření průběhu výkonu a točivého momentu motoru

Před zahájením jízdního cyklu byly pomocí programu Matlab a centrálního ovládání nastaveny parametry válcové zkušebny. Motorgenerátor byl nastaven podle součinitele odporu vzduchu vozidla a soustava setrvačníků podle celkové hmotnosti vozidla.

Bylo nastartováno testovací vozidlo.

Byly spuštěny oba zbývající počítače a také potřebný software, diagnostický program VAG – COM Standard a software EEPS.

Byl zapnut ventilátor FILCAR na chlazení, externí palivové čerpadlo, emisní analyzátor VMK, částečný analyzátor EEPS, rotační termoregulační zařízení, ventilace na odvod spalin a byla kalibrována laboratorní váha.

Po kontrole veškerého zařízení a softwaru byl zahájen jízdní cyklus WLTC a měření emisí. Vozidlo se na válcích rozjelo, zkušební technik sledoval externí monitor umístěný před předním sklem, na kterém byla zobrazena trasa cyklu, aktuální i požadovaná rychlost a požadovaný rychlostní stupeň. Podle těchto údajů zkušební technik dodržoval požadovanou rychlost a řadil. Řídící počítač v závislosti na otáčkách válců válcové zkušebny nastavoval otáčky ventilátoru. Se vzrůstající rychlostí otáčení válců rostl objemový průtok vzduchu tak, aby byly vytvořeny podobné podmínky, jako je tomu při reálné jízdě po silnici.

Počítač s diagnostickým systémem VAG-COM Standard, který byl k řídicí jednotce připojen přes standardizované diagnostické rozhraní OBD-II, během jízdního cyklu zaznamenával otáčky motoru, tlak paliva, hmotnostní průtok vzduchu v sacím potrubí a absolutní tlak v sacím potrubí.

Data z laboratorní váhy byla zaznamenávána programem Datlab na řídicím počítači.

Počítač s EEPS softwarem zaznamenával hodnoty naměřené částicovým analyzátozem, ale nebyl propojen s řídicím počítačem, stejně jako emisní analyzátor VMK. Naměřená data se musela po testování synchronizovat s časovou osou, aby konkrétní naměřené hodnoty odpovídaly správnému času.

Pro každou palivovou směs byly během testování provedeny tři jízdní cykly WLTC 3b.

Po ukončení třetího jízdního cyklu se měřil průběh výkonu a točivého momentu motoru. Stejně jako tomu bylo u jízdních cyklů, provádělo se měření třikrát. Vozidlo dosáhlo maximální rychlosti na 5. převodový stupeň a poté se na řídicím počítači pomocí programu Datlab zvyšoval odpor vířivé brzdy. Program Datlab z poklesu otáček válců válcové zkušebny a odporové síly dynamometru vyhodnocoval průběh výkonu a točivého momentu motoru.

Po ukončení třetího měření výkonu a točivého momentu byla směs v externí nádrži vyměněna za směs s 10 % objemového množství etanolu a byl zahájen vyplachovací jízdní cyklus. Ten se prováděl proto, aby se palivový systém vozidla zbavil zbytků předešlé směsi v hadicích a palivové soustavě vozidla. Po ukončení vyplachovacího cyklu byla externí nádrž opět vyprázdněna, protože vratnou hadicí se na počátku vyplachovacího cyklu vracela předchozí směs. Poté byla nádrž naplněna novou směsí, opět s 10 % objemového množství etanolu, vozidlo se nastartovalo a zahájily se další tři jízdní cykly. Postup byl totožný jako u předchozí palivové směsi.

To se opakovalo i u ostatních směsí s 15 %, 25 % a 35 % objemového množství etanolu.

## 11.7 Výsledky a jejich hodnocení

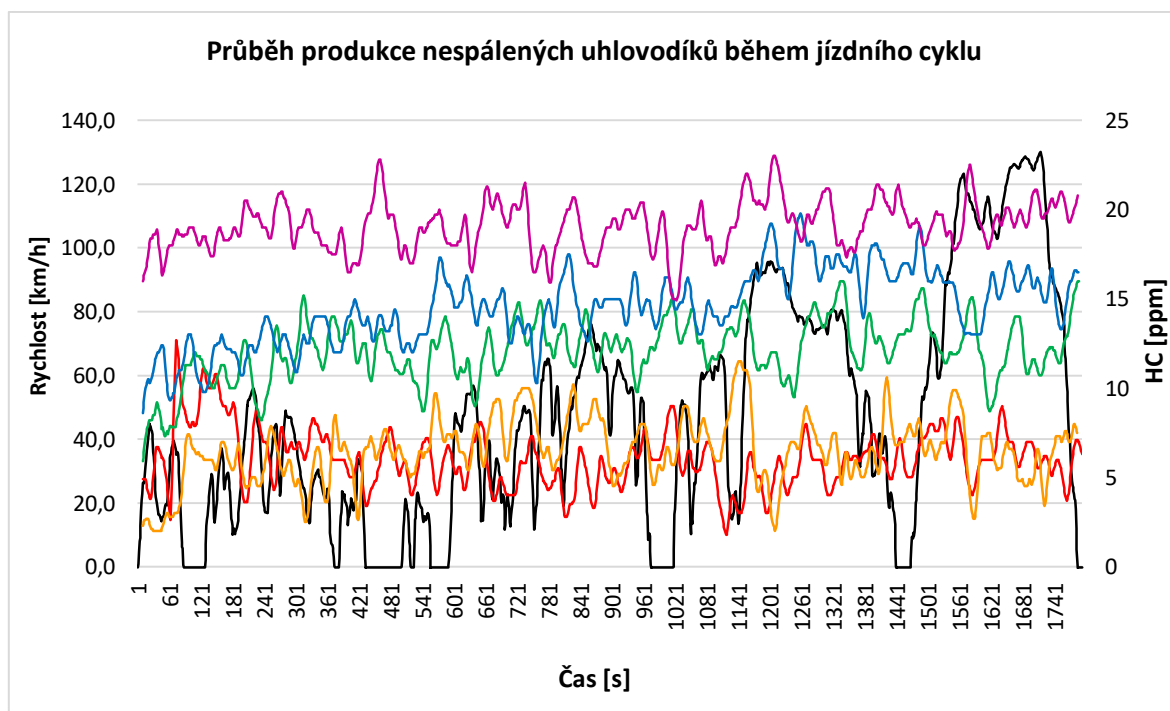
V této kapitole jsou zobrazeny výsledné grafické průběhy hodnot jednotlivých měřených emisí a parametrů motoru včetně jejich popisu a vyhodnocení. Dále jsou tu vybrané hodnoty emisí a parametrů motoru pro každou testovanou palivovou směs uvedeny v tabulkách a palivové směsi jsou mezi sebou porovnány.

### 11.7.1 Průběh hodnot podílu plynných emisí

Naměřené průběžné hodnoty podílu plynných emisí v závislosti na rychlosti a čase během jízdního cyklu jsou zobrazeny na níže uvedených grafech. Každý z těchto celkem čtyř grafů znázorňuje průběh produkce dané detekované plynné složky výfukových zplodin během jízdního cyklu. V každém grafu jsou pro srovnání uvedeny výsledné průběhové křivky pro všechny palivové směsi. Průběhové křivky jsou podle použitých palivových směsí barevně odlišeny. Černě je označena průběhová křivka rychlosti. Barevné odlišení je popsáno pod každým uvedeným grafem.

Na obr. č. 21 je graficky zobrazen průběh produkce nespálených uhlovodíkových sloučenin během jízdního cyklu.

Obr. č. 21: Průběh produkce nespálených uhlovodíků ( $H_xC_y$ ) během jízdního cyklu





Množství nespálených uhlovodíků během cyklu je v grafu vyjádřeno v jednotkách ppm (parts per million). Jednotka ppm je poměrová jednotka, která vyjadřuje jednu miliontinu celku. V tomto případě se jedná o jednu miliontinu z celkového objemu odebíraného vzorku výfukových plynů za sekundu. Z grafu je patrné, že nejnižší podíl nespálených uhlovodíkových sloučenin je při použití čistého Naturalu 95. U směsí s přidaným etanolem je podíl vyšší. Čím větší je zastoupení etanolu ve směsi, tím je také ve výfukových plynech vyšší podíl nespálených uhlovodíkových sloučenin. V tomto ohledu se částečně liší průběh u 10 % směsi. Na začátku jízdního cyklu, při nízkých rychlostech do 30 km/h, je u této směsi produkce nespálených uhlovodíků nižší, než je tomu při použití čistého Naturalu 95. Podobně je tomu i při vysokých rychlostech v závěru jízdního cyklu při rychlosti okolo 130 km/h.

Skutečnost, že u směsí s vyšším podílem etanolu je ve výfukových plynech vyšší podíl nespálených uhlovodíků, se dá vysvětlit tím, že řídicí jednotka kvůli nižší výhřevnosti etanolu reagovala prodloužením doby vstřiku paliva do spalovacího prostoru motoru a tím zvýšila dávku paliva. Tím se zvýšila bohatost směsi, která většinou zvýšený podíl nespálených uhlovodíkových sloučenin ve výfukových plynech způsobuje.

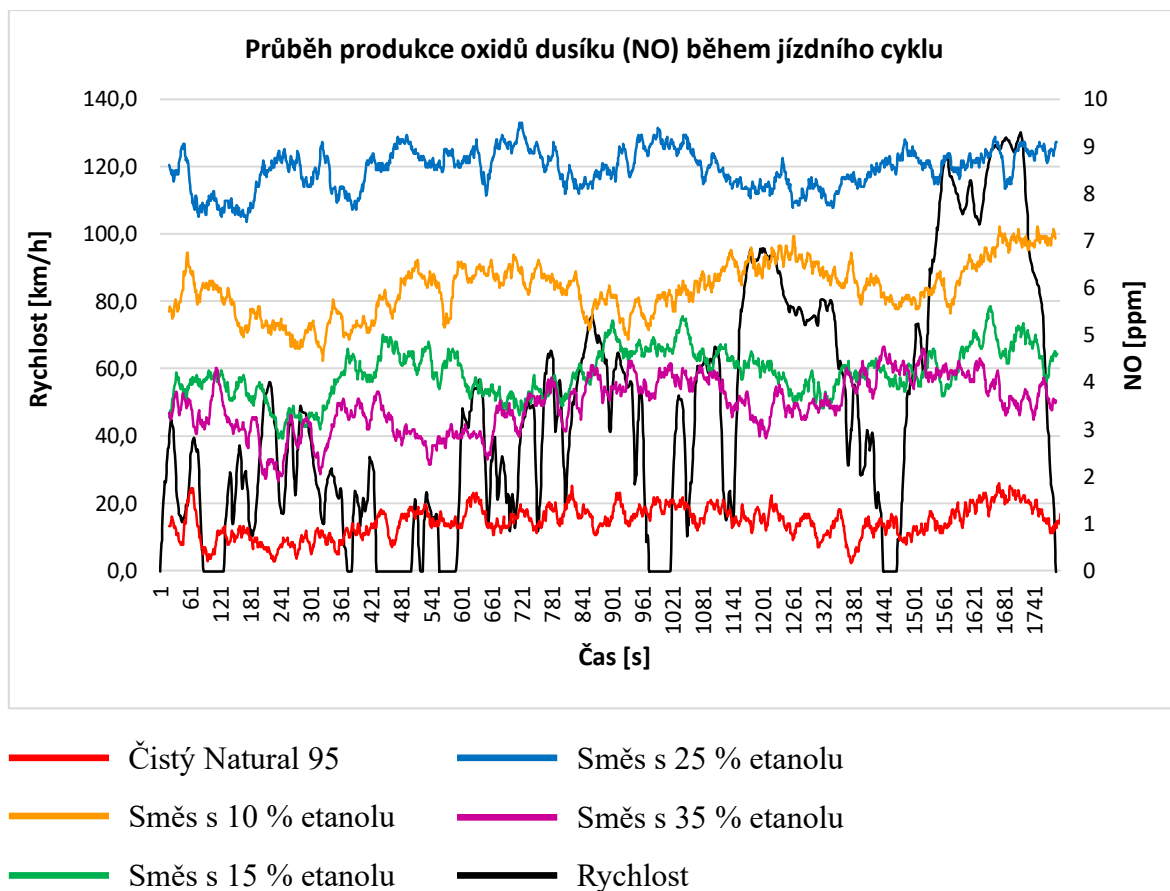
Průběh produkce oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) během jízdního cyklu je graficky zobrazen na obr. č. 22. Hodnoty podílu oxidů dusíku ve výfukových plynech jsou v grafu uvedeny stejně jako v případě nespálených uhlovodíků v jednotkách ppm. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u čistého Naturalu 95. U směsi s 25 % objemového množství etanolu byly naměřeny nejvyšší hodnoty, druhé nejvyšší u směsi s 10 % etanolu, a třetí nejvyšší u směsi s 15 % etanolu. Výsledné průběhy hodnot nevykazují přímou ani nepřímou úměru ke koncentraci etanolu ve směsi.

Důvod, proč jsou výsledné naměřené hodnoty takové, je možná adaptace řídicí jednotky na palivovou směs s etanolem. Příčinou poměrně nízkých hodnot podílu oxidů dusíku při použití směsi s 35 % etanolu může být fakt, že po provedení jízdních cyklů s palivem s 25 % etanolu byly na řídicí jednotce vymazány chyby. Je možné, že se řídicí jednotka po



vymazání chyb u následující 35 % směsi chovala jinak, a proto byla v tomto případě produkce oxidů dusíku druhá nejnižší.

Obr. č. 22: Průběh produkce oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) během jízdního cyklu



Na obr. č. 23 je zobrazen grafický průběh produkce oxidu uhelnatého ( $\text{CO}$ ), který je vyjádřen v procentech z celkového objemového množství všech plynných složek odebíraného vzorku výfukových zplodin. Z grafu je patrné, že se procentuální podíl oxidu uhelnatého zvyšuje u většiny směsí při akceleraci vozidla.

Jednoznačně nejnižší naměřené hodnoty podílu oxidu uhelnatého jsou u směsi s 35 % etanolu, která se také svým průběhem liší od ostatních směsí. Průběhová křivka u této směsi je po většinu doby velmi blízko nulové hodnotě. Při akceleracích je patrný mírný nárůst, který je oproti ostatním směsím velmi malý. Významnější nárůst je patrný při akceleraci v první etapě jízdního cyklu, kdy průběhová křivka přesáhne hodnotu 0,001 %. Nejvýraznější nárůst podílu oxidu uhelnatého při použití této směsi je v závěrečné etapě, při vysoké akceleraci dosahují hodnoty 0,0025 %.

Palivová směs, u které byla naměřena druhá nejnižší produkce oxidu uhelnatého je směs s 10 % etanolu, kde hodnoty podílového množství po téměř celou dobu jízdního cyklu nepřesáhnou hodnotu 0,001 %. Pouze v závěru cyklu při vysokých akceleracích dosahuje průběhová křivka hodnot okolo 0,005 %.

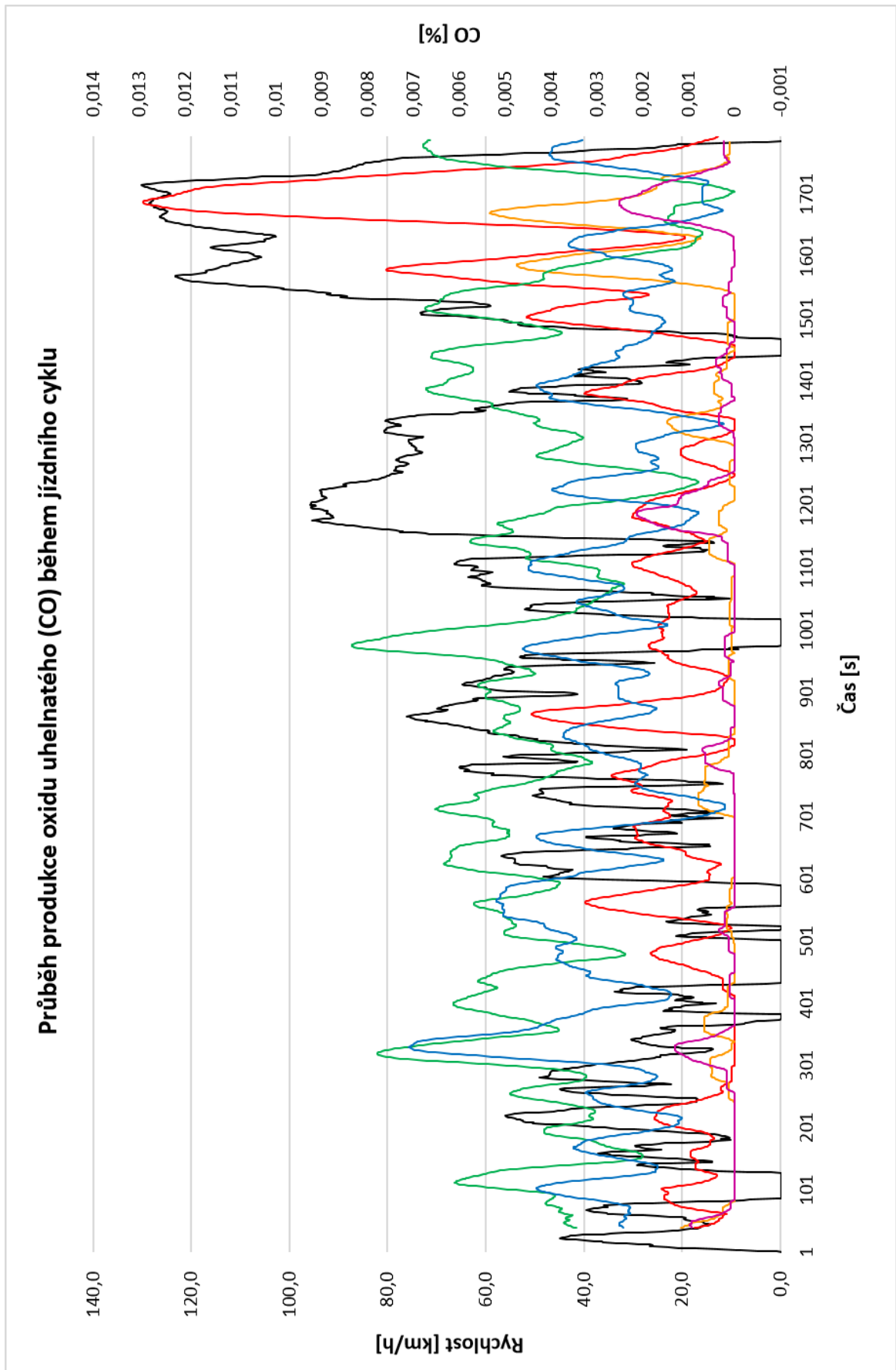
U čistého Naturalu 95, u kterého byla ze všech pěti paliv naměřena třetí nejnižší produkce oxidu uhelnatého, je velmi zřetelný nárůst hodnot s rostoucí rychlostí. V závěrečné etapě, při dosažení nejvyšší rychlosti během testu, dosahují hodnoty podílu oxidu uhelnatého 0,013 % z celkového objemu výfukových plynů. Tato hodnota je u tohoto paliva ze všech testovaných palivových směsí nejvyšší.

U směsi s 15 % etanolu je produkce oxidu uhelnatého ze všech použitých palivových směsí nejvyšší. Jednotlivé peaky průběhové křivky jsou u této směsi opožděné za úseky zvýšené akcelerace. Hodnoty tedy spíše vzrůstají v úsecích decelerace.

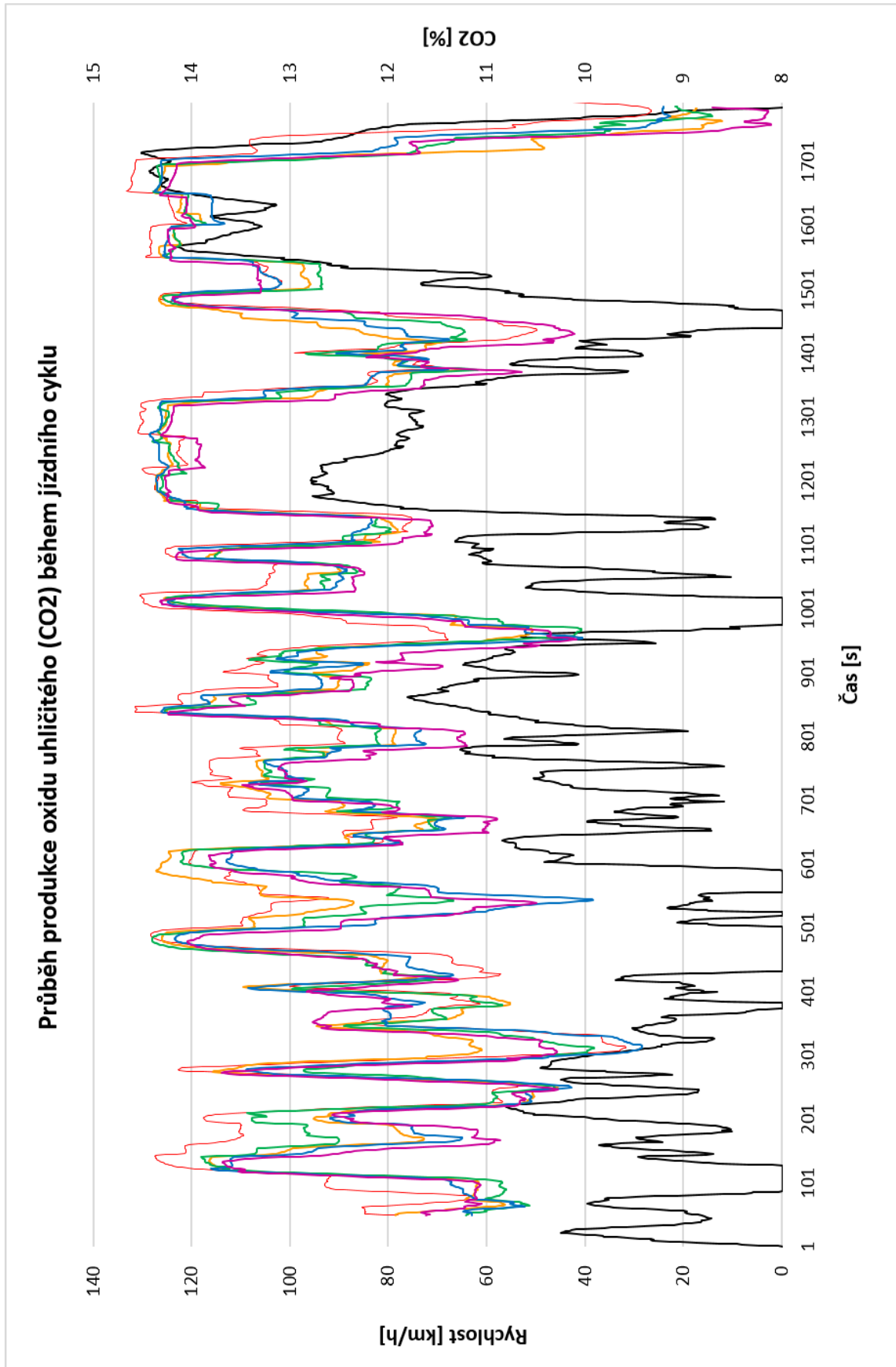
Směs s 25 % etanolu vykazuje druhé nejvyšší průměrné hodnoty podílu oxidu uhelnatého. U této směsi nejsou tak strmé nárůsty hodnot, jako je tomu u směsi s 15 % etanolu a u čistého benzínu.

Na obr. č. 24 je zobrazen grafický průběh produkce oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) během jízdního cyklu. Hodnoty množství oxidu uhličitého jsou stejně jako u předchozího grafu vyjádřeny v procentech. Průběh je u všech směsí velmi podobný bez nějakých výraznějších odchylek. U všech palivových směsí je patrný nárůst produkce oxidu uhelnatého v akceračních úsecích, naopak v úsecích decelerace je zřetelný pokles. Celkové průměrné hodnoty podílu oxidu uhličitého ve výfukových plynech jsou u všech směsí velmi podobné. Nejvyšší hodnota je u čistého Naturalu 95. U směsí s přidaným etanolem platí, že čím větší je koncentrace etanolu ve směsi, tím je produkce oxidu uhličitého nižší.

Obr. č. 23: Průběh produkce oxidu uhelnatého (CO) během jízdního cyklu



Obr. č. 24: Průběh produkce oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) během jízdního cyklu



### 11.7.2 Průběh toku pevných částic

Na obr. č. 25 je zobrazen grafický průběh toku pevných částic během jízdního cyklu.

U čistého Naturalu, u kterého je celková produkce pevných částic nejnižší, je v první polovině jízdního cyklu patrný nárůst okamžitého toku pevných částic v úsecích decelerace a pokles při akceleraci. V druhé polovině cyklu, kde jsou úseky s vyššími akceleracemi, je průběh spíše opačný, růst při akceleracích a pokles při zpomalování.

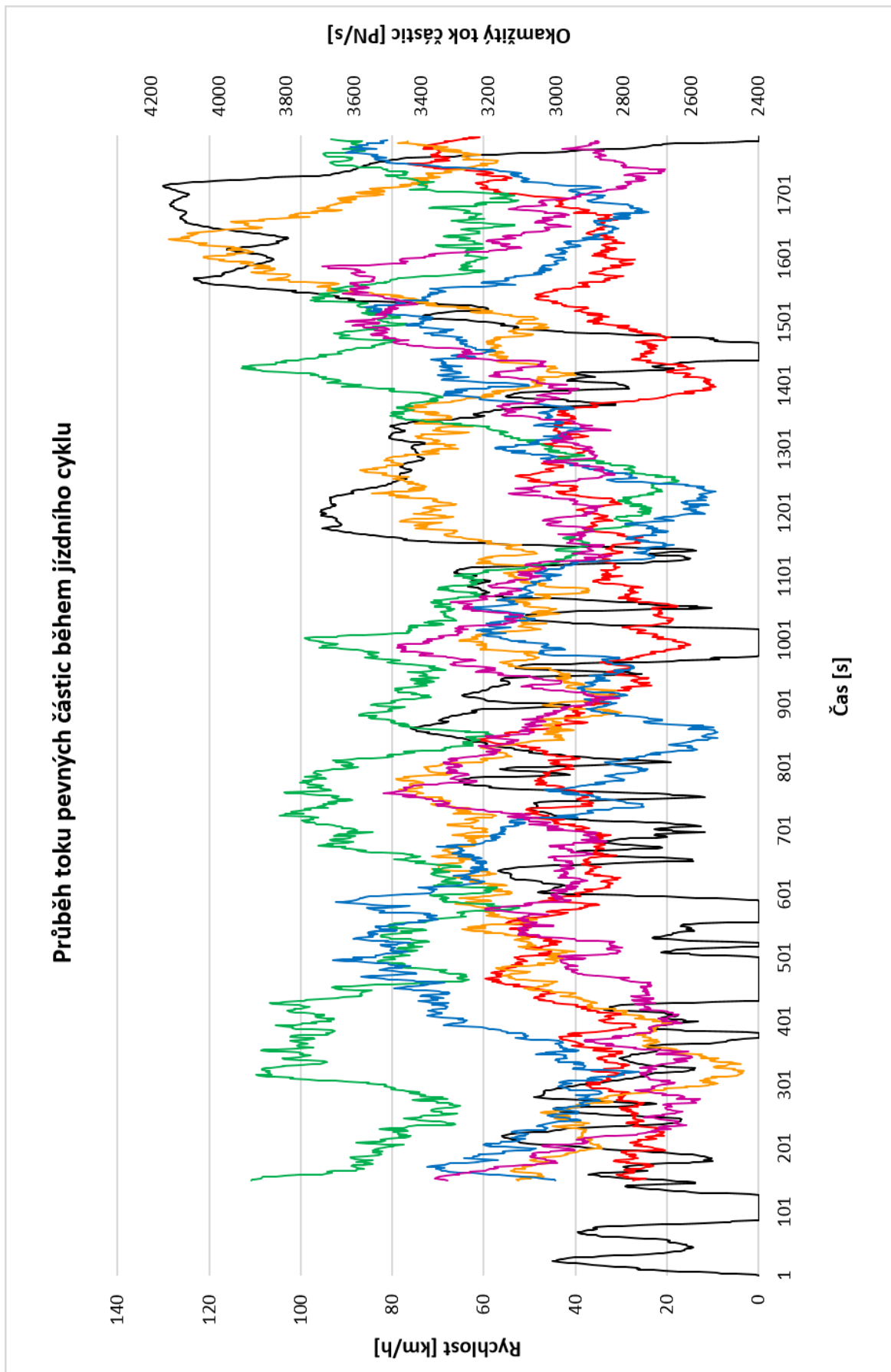
U směsi s 35 % etanolu, u které je po Naturalu 95 druhá nejnižší produkce pevných částic, je průběh podobný. V prvních dvou třetinách jízdního cyklu je zřetelný nárůst spíše v úsecích zpomalování a pokles při zrychlování, ale oproti čistému Naturalu 95 dosahují peaky vyšších hodnot. V poslední třetině cyklu je již patrná růstová tendence v úsecích akcelerace, v úseku nejvyšší rychlosti dosahuje křivka okamžitého toku částic svého vrcholu.

U směsi s 25 % etanolu, u níž je během jízdního cyklu třetí nejnižší produkce pevných částic, je patrný růst toku pevných částic převážně v úsecích decelerace a pokles v úsecích akcelerace. Pouze na začátku první etapy jízdního cyklu je zřetelný růst v akceleračním úseku.

U směsi s 10 % etanolu, u které je hodnota množství pevných částic za jízdní cyklus druhá nejvyšší, je v prvních dvou třetinách jízdního cyklu patrný růst v deceleračních úsecích. V třetí třetině jízdního cyklu, která je charakterizována vysokým zatížením motoru je průběh opačný. S rostoucí rychlostí roste i okamžitý tok pevných částic a při zpomalování zase klesá.

U směsi s 15 % etanolu, která vykazuje nejvyšší hodnoty produkce pevných částic ze všech testovaných paliv, je zřetelný nárůst toku pevných částic převážně v deceleračních úsecích. Pouze ve druhé etapě jízdního cyklu je tomu naopak, růst během akcelerace a pokles během zpomalování.

Obr. č. 25: Průběh toku pevných částic během jízdního cyklu





V tab. č. 12 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty detekovaných složek emisí na 1 kilometr jízdního cyklu.

Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty podílu složek emisí na 1 km jízdního cyklu

Naměřené hodnoty podílu složek emisí na 1 km jízdního cyklu					
Palivová směs	H <sub>x</sub> C <sub>y</sub> [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	Pevné částice
Natural 95	466,9	79,8	0,0019	12,98	2,26 · 10 <sup>5</sup>
Směs s 10 % etanolu	499,0	461,4	0,0005	12,67	2,47 · 10 <sup>5</sup>
Směs s 15 % etanolu	930,9	323,2	0,0044	12,56	2,66 · 10 <sup>5</sup>
Směs s 25 % etanolu	1117,1	656,4	0,0027	12,54	2,38 · 10 <sup>5</sup>
Směs s 35 % etanolu	1470,2	270,8	0,0003	12,39	2,36 · 10 <sup>5</sup>

Z hodnot, které jsou vyhodnoceny v jednotkách ppm, jsou výsledné hodnoty v tabulce získány součtem všech hodnot naměřených za každou sekundu jízdního cyklu. Z tohoto počtu je vypočítána průměrná hodnota na jeden kilometr jízdního cyklu. Z hodnot emisí, jež jsou vyhodnoceny jako procentuální podíl ve výfukových plynech, je ze všech naměřených hodnot za každou sekundu jízdního cyklu vypočítán aritmetický průměr za celý jízdní cyklus, který se zároveň rovná průměrné hodnotě na 1 km. U pevných částic je uveden celkový počet částic v rozsahu měřeného spektra (5,6 - 560 nm) v odebíraném vzorku na 1 kilometr jízdního cyklu.

### 11.7.3 Průběh výkonu a točivého momentu motoru – vnější otáčková charakteristika

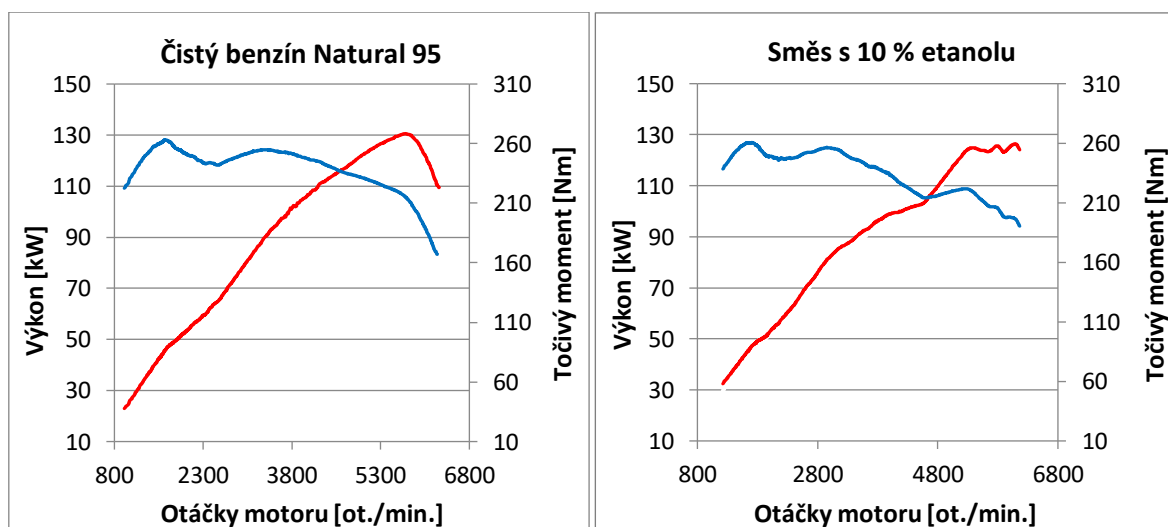
Výsledky měření vnější otáčkové charakteristiky, tedy průběhu výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách motoru, jsou graficky zobrazeny na obr. č. 26. Výsledné grafické zobrazení průběhů hodnot výkonu a točivého momentu motoru ukazují na několik skutečností.

U čistého Naturalu 95 je zřejmý pokles točivého momentu od přibližně 1600 ot./min. do 2500 ot./min., poté točivý moment s rostoucími otáčkami motoru narůstá a přibližně od 3400 ot./min. pozvolna klesá bez žádných významných výkyvů.

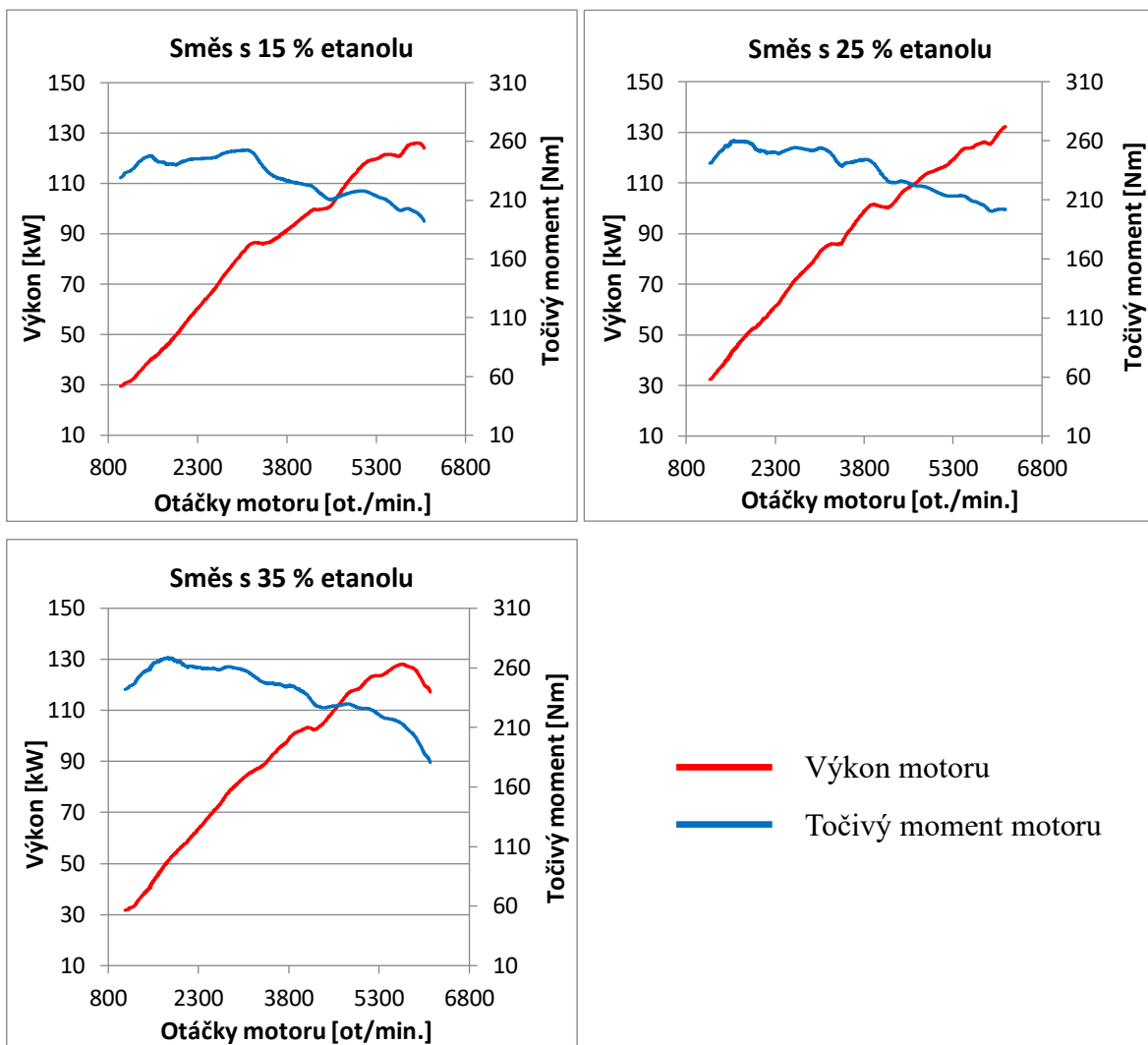
Naproti tomu u palivových směsí s přidaným etanolem je patrný prvotní pokles při podobných otáčkách, jako je tomu u čistého Naturalu 95, ale po následném nárůstu točivý moment opět významně klesá ve středních otáčkách přibližně mezi 4000 až 4700 ot. /min., v závislosti na druhu palivové směsi. Výsledky měření neukazují, že by velikost poklesu točivého momentu byla přímo úměrná koncentraci etanolu ve směsi. U palivové směsi s 10 % a 15 % etanolu je pokles momentu ve středních otáčkách výrazně větší, než je tomu u směsi s 25 % a 35 % etanolu.

Přímá ani nepřímá úměra ke koncentraci etanolu ve směsi není patrná ani u naměřených maximálních hodnot výkonu a točivého momentu, které jsou uvedeny v tab. č. 13. Nejvyšší maximální výkon byl naměřen u směsi s 25 % etanolu a nejvyšší maximální točivý moment u směsi s 35 % etanolu. U směsi s 10 % a 15 % etanolu byly naměřeny nejnižší hodnoty obou veličin. Zajímavý je fakt, že u všech směsí byl naměřen maximální točivý moment při rychlosti otáčení mezi 1698 a 1883 ot./min., pouze u 15 % směsi byl maximální točivý moment při 3160 ot./min. U této směsi točivý moment po prvotním poklesu, který začíná přibližně od 1500 ot./min., opět od přibližně 2000 ot./min. narůstá do své maximální hodnoty 256 Nm. K takovému průběhu, kdy je nejvyšší točivý moment v oblasti druhého peaku dochází pouze u této směsi. U ostatních směsí včetně čistého Naturalu 95 točivý moment vykazuje nejvyšší hodnoty v oblasti prvního peaku.

Obr. č. 26: Vnější otáčková charakteristika motoru – jednotlivé palivové směsi





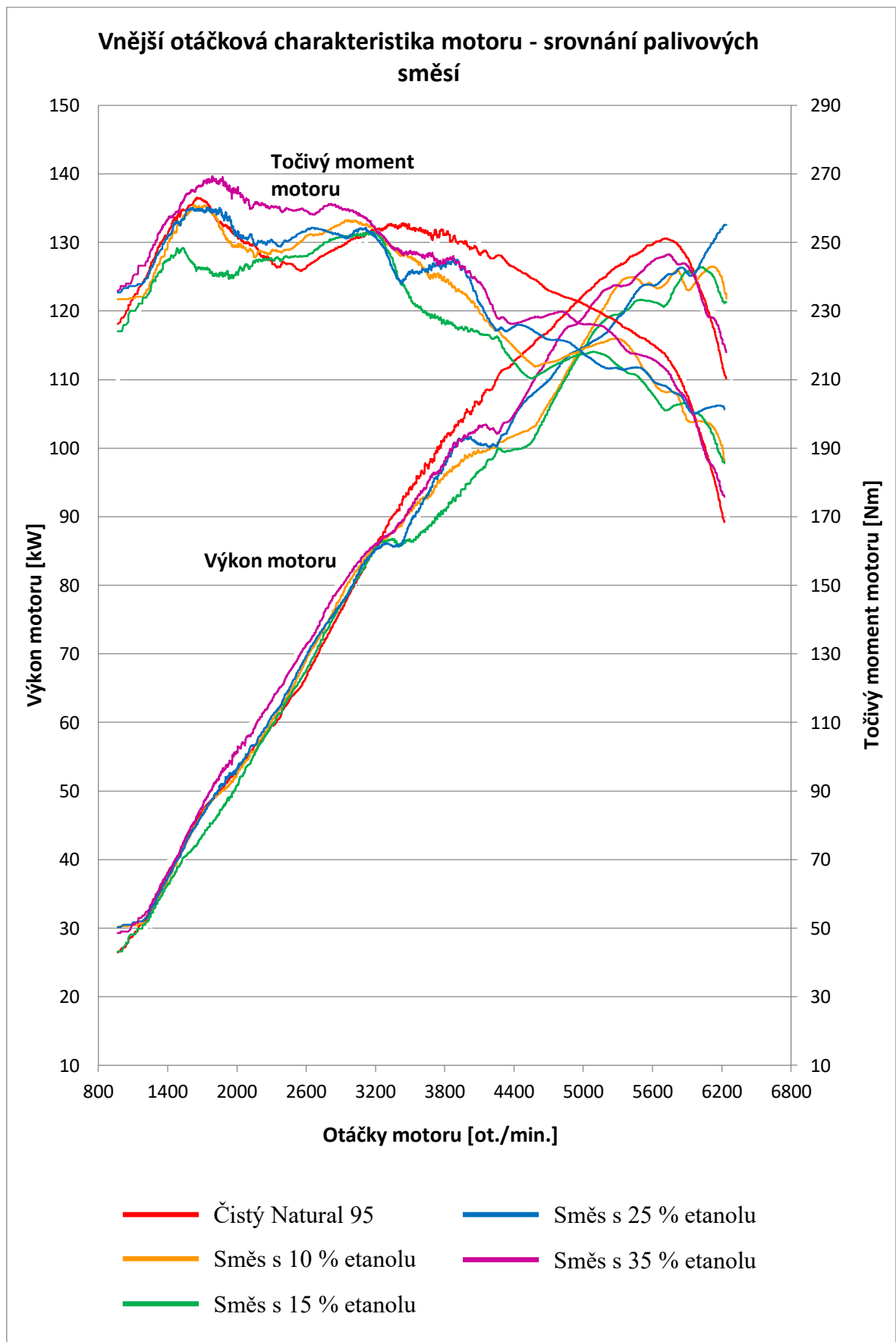


Tabulka č. 13: Maximální výkon a točivý moment motoru při použití testovaných palivových směsí

Palivová směs	$P_{\max}$	při otáčkách	$M_{\max}$	při otáčkách
Čistý benzín Natural 95	131 kW	5753 ot. /min.	264 Nm	1698 ot. /min.
Směs s 10 % etanolu	127 kW	6134 ot. /min.	262 Nm	1728 ot. /min.
Směs s 15 % etanolu	127 kW	6055 ot. /min.	256 Nm	3160 ot. /min.
Směs s 25 % etanolu	133 kW	6309 ot. /min.	264 Nm	1879 ot. /min.
Směs s 35 % etanolu	128 kW	5768 ot. /min.	273 Nm	1883 ot. /min.

Na obr. č. 27 je pro srovnání zobrazen grafický průběh výkonu a točivého momentu všech testovaných palivových směsí.

Obr. č. 27: Vnější otáčková charakteristika motoru – srovnání palivových směsí



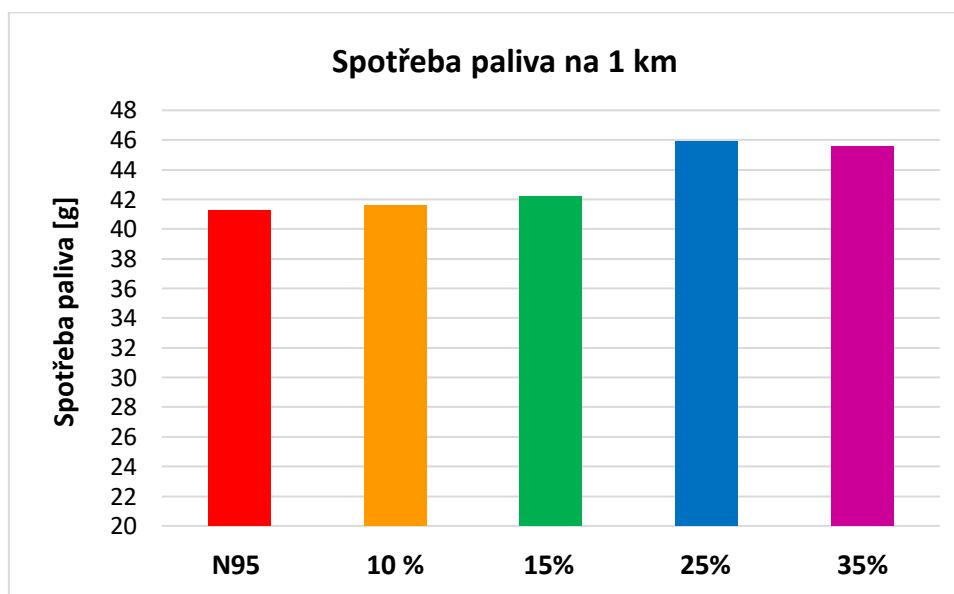
### 11.7.4 Spotřeba paliva během jízdnicích cyklů

Pro každé palivo byla průměrná spotřeba za 1 jízdnicí cyklus vypočítána jako aritmetický průměr ze všech tří měřených jízdnicích cyklů. Z průměrné spotřeby za 1 jízdnicí cyklus byla získána průměrná spotřeba na jeden ujetý kilometr trasy jízdnicího cyklu. Hodnoty průměrné spotřeby jsou pro každé palivo uvedeny v tab. č. 14 a graficky zobrazeny na obr. č. 28.

Tabulka č. 14: Průměrná spotřeba paliva na 1 km jízdnicího cyklu

Palivová směs	Spotřeba [g/km]
Natural 95	41,24
Směs s 10 % etanolu	41,61
Směs s 15 % etanolu	42,18
Směs s 25 % etanolu	45,59
Směs s 35 % etanolu	45,89

Obr. č. 28: Průměrná spotřeba paliva na 1 kilometr jízdnicího cyklu



Z grafu je patrné, že s rostoucím objemovým množstvím etanolu ve směsi roste i celková spotřeba paliva. Tento fakt lze vysvětlit výrazně nižší výhřevností etanolu oproti benzínu. Aby motor při použití směsi s etanolem dosáhl požadovaného výkonu, musí řídicí jednotka prodloužit dobu vstřiku palivové směsi, a to má za následek celkové zvýšení spotřeby paliva.

Na výsledném grafickém zobrazení je velmi zajímavé to, že u palivové směsi s 25 % etanolu je vyšší spotřeba paliva, než je tomu u směsi s 35 % etanolu. Teoreticky by měla

být nejvyšší spotřeba u směsi s nejvyšší koncentrací etanolu, což v tomto případě neplatí. Důvod, proč není u 35 % směsi nejvyšší spotřeba, ale je tomu u směsi s 25 %, může záviset na více faktorech. Roli mohl během měření hrát rozdílný atmosférický tlak, teplota, vlhkost vzduchu a také odlišné zahřátí motoru před zahájením jízdního cyklu.

### 11.7.5 Porovnání testovaných palivových směsí podle naměřených hodnot emisí, parametrů motoru a průměrné spotřeby paliva

Pro celkové porovnání palivových směsí je pro každou detekovanou složku emisí a ostatních měřených parametrů vytvořeno pořadí od 1 do 5, kde číslo 1 určuje nejpriznivější výsledek a číslo 5 nejméně příznivé. Palivové směsi jsou podle naměřených hodnot z tabulek č. 12, 13 a 14 porovnány v tab. č. 15.

Tabulka č. 15: Porovnání testovaných palivových směsí

	Nespálené uhlovodíky	Index	Oxidy dusíku	Index	Oxid uhelnatý	Index
1.	Natural 95	1,00	Natural 95	1,00	Směs s 35 % etanolu	1,00
2.	Směs s 10 % etanolu	0,94	Směs s 35 % etanolu	0,29	Směs s 10 % etanolu	0,61
3.	Směs s 15 % etanolu	0,50	Směs s 15 % etanolu	0,25	Natural 95	0,15
4.	Směs s 25 % etanolu	0,42	Směs s 10 % etanolu	0,17	Směs s 25 % etanolu	0,11
5.	Směs s 35 % etanolu	0,32	Směs s 25 % etanolu	0,12	Směs s 15 % etanolu	0,07
	Oxid uhličitý	Index	Pevné částice	Index	Max. výkon motoru	Index
1.	Směs s 35 % etanolu	1,00	Natural 95	1,00	Směs s 25 % etanolu	1,00
2.	Směs s 25 % etanolu	0,99	Směs s 35 % etanolu	0,96	Natural 95	0,98
3.	Směs s 15 % etanolu	0,99	Směs s 25 % etanolu	0,95	Směs s 35 % etanolu	0,96
4.	Směs s 10 % etanolu	0,98	Směs s 10 % etanolu	0,91	Směs s 10 % etanolu	0,95
5.	Natural 95	0,95	Směs s 15 % etanolu	0,85	Směs s 15 % etanolu	0,95
	Max. točivý moment	Index	Spotřeba	Index		
1.	Směs s 35 % etanolu	1,00	Natural 95	1,00		
2.	Směs s 25 % etanolu	0,97	Směs s 10 % etanolu	0,99		
3.	Natural 95	0,97	Směs s 15 % etanolu	0,98		
4.	Směs s 10 % etanolu	0,96	Směs s 35 % etanolu	0,90		
5.	Směs s 15 % etanolu	0,94	Směs s 25 % etanolu	0,90		

Kvůli přesnějšímu porovnání palivových směsí je u každé měřené složky emisí (nebo parametru motoru či spotřeby) pro každou směs vytvořen poměrový index. Index je stanoven tak, že palivová směs na prvním místě (nejpříznivější výsledek) má index 1. U ostatních směsí jsou jejich indexy počítány jako poměr hodnoty měřené složky emisí směsi z tab. č. 12 (u parametrů motoru z tab. č. 13 a u spotřeby z tab. č.14) na prvním místě a hodnoty měřené složky emisí dané směsi, u které se stanovuje poměrový index. Například u nespálených uhlovodíků je na prvním místě Natural 95 s hodnotou 466,9 ppm, má tedy index 1. Směs s 10 % etanolu je na druhém místě s hodnotou 499 ppm. Index je vypočítán jako podíl hodnoty 466,9 ppm a 499 ppm, jeho hodnota je tedy:  $466,9 / 499 = 0,94$ .

U parametrů motoru, maximálního výkonu a maximálního točivého momentu, kde jsou nepříznivější nejvyšší hodnoty, je podíl obrácený. Například u maximálního výkonu je na prvním místě směs s 25 % etanolu a na druhém je Natural 95. Natural 95 má index počítaný jako podíl hodnoty 131 kW a 133 kW (hodnoty z tab. č. 13), hodnota indexu je:  $131/133 = 0,98$ .

Tento způsob je zvolen z toho důvodu, aby umožnil porovnání jednotlivých palivových směsí. U některých složek měřených emisí jsou výsledné naměřené hodnoty velmi rozdílné. Například u nespálených uhlovodíkových sloučenin (tab. č. 12) s rostoucí koncentrací etanolu v palivové směsi výrazně roste i jejich produkce. Ještě větší rozdíly jsou patrné u oxidu uhelnatého a také u oxidů dusíku (tab. č. 12). U oxidu uhelnatého je u směsi s 35 % etanolu podíl ve výfukových plynech pouze 0,0003 %, u směsi s 15 % etanolu 0,0044 %, což je téměř patnáctinásobek. Naproti tomu u oxidu uhličitého jsou rozdíly velmi malé. Natural 95, který je na posledním místě, má v tab. č. 12 průměrnou hodnotu podílu ve výfukových plynech 12,98 % a směs s 35 % etanolu, která je na místě prvním, 12,39 % . Tento rozdíl je velmi malý, což také ukazuje index 0,95, který Natural 95 u této naměřené složky má. Podobně je to u pevných částic, maximálního výkonu, maximálního točivého momentu a průměrné spotřeby paliva.

Podle součtu jednotlivých indexů je stanoveno pořadí palivových směsí, čím vyšší je konečná hodnota součtu, tím lepší je celkové hodnocení palivové směsi. Výsledné pořadí testovaných palivových směsí je uvedeno v tab. č. 16.

Tabulka č. 16: Výsledné pořadí testovaných palivových směsí

Pořadí	Palivo	Součet indexů
1.	Natural 95	7,06
2.	Směs s 10 % etanolu	6,51
3.	Směs s 35 % etanolu	6,44
4.	Směs s 15 % etanolu	5,52
5.	Směs s 25 % etanolu	5,44

Výsledek porovnávání podle součtu poměrových indexů ukazuje, že se nejlepších výsledků dosáhlo s čistým benzínem Natural 95 (obsahuje 4,5 % etanolu). Druhých nejlepších výsledků se dosáhlo s palivovou směsí s 10 % etanolu. Výsledek není příliš překvapivý, protože testovací vozidlo disponuje normálním řadovým benzínovým motorem bez úpravy na palivo s větším obsahem etanolu.

Z tohoto hlediska překvapivě dobře v testu dopadla směs s 35 % etanolu, ačkoli motor testovacího vozidla nebyl na tento typ paliva upraven. U této směsi byl ve výfukových plynech naměřen nejnižší podíl oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Zároveň byl také při použití této směsi naměřen nejvyšší točivý moment motoru. Na druhou stranu byl u této směsi naměřen nejvyšší podíl nespálených uhlovodíkových sloučenin. Nejhuře z hlediska celkového porovnání palivových směsí dopadla směs s 25 % etanolu, ale na druhou stranu byla při jejím použití naměřena nejvyšší hodnota maximálního výkonu.

Je třeba zmínit, že konečné výsledné pořadí testovaných palivových směsí není absolutní, záleží také na tom jakou charakteristiku mají vybraná kritéria, podle kterých bylo konečné pořadí určeno. Například u naměřených hodnot nespálených uhlovodíků záleží také o jaké konkrétní sloučeniny jde. Míra škodlivosti nespálených uhlovodíkových sloučenin produkovaných ve spalovacím motoru na tomto faktu závisí. U pevných částic také záleží na jejich velikostním spektru, míra jejich škodlivosti závisí na jejich velikosti. Obecně se dá říci, že čím menší pevné částice jsou, tím je jejich potenciální škodlivost vyšší. U parametrů motoru je zase také podstatný celkový průběh otáčkové charakteristiky, jak se motor chová v celém rozsahu otáček. Konečné porovnání palivových směsí je do této práce zahrnuto hlavně z důvodu lepší přehlednosti výsledků a nebylo přímo cílem výzkumu.

## 12 Závěr

Rešeršní část diplomové práce se věnovala celkovému přehledu biopaliv, jejich rozdělení podle skupenství a původu výchozí suroviny. Dále se věnovala především etanolu, jeho základnímu popisu z fyzikálně - chemického hlediska, jeho použití ve spalovacích motorech z technického i historického pohledu, popisu jeho výroby a vstupních surovin, které se na jeho výrobu používají.

Praktická část diplomové práce se zabývala zjišťováním vlivu etanolu ve směsi s motorovým benzínem. Laboratorní měření, které bylo za tímto účelem realizováno, zahrnovalo měření hodnot podílového množství škodlivých emisí ve výfukových plynech, průběhu otáčkové charakteristiky motoru a spotřeby paliva při použití celkem pěti palivových směsí s různým podílem etanolu. Palivové směsi, které byly použity na testování zahrnovaly čistý benzín Natural 95 (obsahující 4,5 % etanolu) a směsi s 10 %, 15 %, 25 % a 35 % etanolu. Laboratorní měření bylo provedeno na válcové zkušebně v technické laboratoři Technické fakulty ČZU v Praze. Na testování bylo využito vozidlo ŠKODA Karoq 1,5 TSI. Pro každou testovanou palivovou směs byly provedeny tři měřicí jízdní cykly kategorie WLTC třídy 3b. Naměřená data byla graficky zpracována, popsána a vyhodnocena.

Podle výsledků měření měl etanol ve směsi s benzínem negativní vliv na produkci nespálených uhlovodíkových sloučenin. S rostoucím procentuálním zastoupením etanolu ve směsi rostl ve výfukových plynech i podíl nespálených uhlovodíkových sloučenin. Dalším negativním vlivem etanolu byla zvýšená tvorba oxidů dusíku. U směsí s přidaným etanolem byl během testování výrazně vyšší podíl oxidů dusíku než u čistého Naturalu 95. Zajímavým faktem je, že druhá nejnižší produkce byla naměřena u směsi s 35 % etanolu. V porovnání s čistým Naturelem 95 sice bylo podílové množství oxidů dusíku 3,4 krát vyšší, ale oproti ostatním směsím s etanolem byl výsledek u této palivové směsi překvapivě dobrý. Nejvyšší podíl oxidů dusíku byl zaznamenán u směsi s 25 % etanolu.

Výsledky měření také potvrdily předpokládaný fakt, že s rostoucím zastoupením etanolu ve směsi roste celková spotřeba paliva. Potvrzení této skutečnosti, která je zapříčiněná výrazně menší výhřevností etanolu oproti benzínu, bylo očekáváno.

U palivových směsí s přidaným etanolem byly také naměřeny vyšší hodnoty počtu pevných částic. Nejlépe v tomto ohledu dopadl čistý Natural 95 s nejnižším počtem pevných částic na 1 ujetý kilometr jízdního cyklu, druhou nejlépe hodnocenou směsí byla

směs s 35 % etanolu. Nejvyšší počet pevných částic na 1 km byl naměřen u směsi s 15 % etanolu.

U oxidu uhelnatého byly nejnižší hodnoty jeho podílu ve výfukových plynech naměřeny u paliva s 35 % etanolu. U této směsi se v tomto případě dá hovořit o velmi pozitivním přínosu přítomného etanolu. U ostatních směsí byly naměřené hodnoty násobně vyšší. Druhé nejlépe hodnocené palivo v tomto ohledu byla směs s 10 % etanolu, nejhůře dopadla směs s 15 % etanolu.

U oxidu uhličitého je vliv etanolu také pozitivní, ačkoli rozdíly mezi jednotlivými palivovými směsmi jsou velmi malé. Nejnižší hodnoty podílu oxidu uhličitého byly naměřeny u směsi s 35 % etanolu nejhorší u čistého Naturalu 95.

Nejvyšší hodnota maximálního výkonu motoru byla naměřena u směsi s 25 % etanolu, nejnižší u směsi s 15 % etanolu. U této měřené veličiny byly rozdíly mezi testovanými směsmi minimální.

U naměřených hodnot maximálního točivého momentu byly rozdíly také velmi malé. Nejvyšší hodnota byla naměřena u směsi s 35 % etanolu, nejnižší u směsi s 15 % etanolu.

Z hlediska celkového porovnání všech testovaných palivových směsí, do kterého je zahrnuto posouzení všech výsledných měřených hodnot, nejlepších výsledků se dosáhlo s čistým benzínem Natural 95. Jako druhá nejlépe hodnocená byla palivová směs s 10 % etanolu. Tento výsledek není příliš překvapivý, protože testovací vozidlo disponuje normálním řadovým benzínovým motorem bez úpravy na palivo s větším obsahem etanolu. Z tohoto důvodu překvapivě dobře v testu dopadla směs s 35 % etanolu, která byla v celkovém hodnocení na třetím místě. Ačkoli motor testovacího vozidla nebyl na palivo s vyšším obsahem etanolu upraven, dosáhlo se použitím této směsi během testování lepších výsledků než u směsi s 15 % etanolu, což byl poměrně překvapivý výsledek. Nejhorších celkových výsledků naměřených hodnot se dosáhlo s palivovou směsí s 15 % a 25 % etanolu. Proto by se předmětem výzkumu, který by navazoval na závěry této práce, mohlo stát použití paliv s obsahem etanolu vyšším než 30 %, nebo naopak nižším než 15 %.

Etanol se z dnešního pohledu jeví jako vhodné alternativní palivo, které má potenciál nahradit tradiční fosilní paliva. Ale je velmi podstatné, jaké vstupní suroviny se na jeho výrobu používají. Pokud by se v budoucnosti uvažovalo o celosvětovém nahrazení fosilních paliv právě etanolem, nesměla by být jeho výroba omezena pouze na výrobu etanolu I. generace. Z hlediska udržitelnosti zdrojů má výroba v tak masivním měřítku význam pouze tehdy, pokud bude zaměřena hlavně na výrobu etanolu II. a III. generace.



### 13 Seznam použité literatury

- [1] TEPLÁ, Milada. Fotosyntéza. [www.studiumbiochemie.cz](http://www.studiumbiochemie.cz). [online]. 30.7.2018. [cit. 21. 9. 2019]. Dostupné z: <http://www.studiumbiochemie.cz/fotosynteza.html>
- [2] JOHNSON, M. P. Photosynthesis. *Essays in Biochemistry*. 2016 Oct 31, **60**(3), 255–273.
- [3] MRÁZ, V., MRÁZ, J. Dřevoplynové generátory. Vydání I. Praha. Naše vojsko. 1954. 86 s.
- [4] TRÁVNÍČEK, Petr, VITÁZEK, Ivan, VÍTĚZ, Tomáš, KOTEK, Luboš Kotek, JUNGA, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Vydání I. Praha. ASTRON studio CZ, a.s. 2015. 209 s. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [5] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Bioplyn* [online]. c2019 [cit. 22. 9. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Bioplyn&oldid=18071050>
- [6] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Dřevoplyn* [online]. c2017 [cit. 22. 9. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C5%99evoplyn&oldid=15607160>
- [7] *HYTEP Česká vodíková technologická platforma*. Výroba vodíku z biomasy. [online]. ©2019. [22. 9. 2019]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [8] POLNICKÝ, Václav. *Vodík jako biopalivo pro spalovací motory*. Brno. 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [9] HROMÁDKO, Jan, HROMÁDKO, Jiří, MILER, Petr, HÖNIG, Vladimír a CINDR, Martin. Technologie výroby biopaliv druhé generace. *Chemické listy*. 2010, **104**(8), 784-790. ISSN 0009-2770.
- [10] HOMOLA, Petr. *Katalytická konverze oxidu uhelnatého na metan(ol)*. Praha. 2014. Studentská esej. Karlova Univerzita v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta.
- [11] ALAM, Firoz, MOBIN, Saleh and CHOWDHURY, Harun. Third generation biofuel from Algae, *6th BSME International Conference on Thermal Engineering*. ICTE. 2014, 764-768.
- [12] ARO, Eva-Mari. *Ambio*. From first generation biofuels to advanced solar biofuels, 2016, **45**(Suppl. 1), 28-30 DOI 10.1007/s13280-015-0730-0
- [13] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Ethanol* [online]. c2019 [cit. 24. 9. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Ethanol&oldid=18045413>

- [14] FOLTÝN, Ivan, ZEDNÍČKOVÁ, Ida. *Problematika biopaliv v Brazílii*. Praha. 2008. Informační studie. Ústav zemědělské ekonomiky a informací.
- [15] HINČICA, Vít. Cukrovarnický průmysl v Brazílii. *LISTY CUKROVARNICKÉ a ŘEPAŘSKÉ*. 2013, 66-70
- [16] LAURIN, Josef. Motory na paliva s kvasným lihem. *XXXVII. International conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines*. KOKA. 2006, 8 s.
- [17] POSPÍŠIL, Milan, ŠÍŠKA, Jakub, ŠEBOR, ŠEBOR, Gustav. *Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě*. Praha. Informační studie. Ústav technologie ropy a petrochemie. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Projekt MZe NAZV č. 81323.
- [18] HROMÁDKO, Jan, HROMÁDKO, Jiří, MILER, Petr, HÖNIG, Vladimír, ŠTĚRBA, Pavel. Využití bioethanolu jako paliva ve spalovacích motorech. *Chemické listy*. 2011, **105**(8), 122-128. ISSN 0009-2770.
- [19] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Kukuřice setá* [online]. c2019 [cit. 9. 10. 2019].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kuku%C5%99ice\\_set%C3%A1&oldid=18122569](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kuku%C5%99ice_set%C3%A1&oldid=18122569)
- [20] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Cukrová třtina* [online]. c2019 [cit. 14. 10. 2019].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cukrov%C3%A1\\_t%C5%99tina&oldid=18127571](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cukrov%C3%A1_t%C5%99tina&oldid=18127571)
- [21] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Cukrová řepa* [online]. c2019 [cit. 19. 10. 2019].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cukrov%C3%A1\\_%C5%99epa&oldid=17821646](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Cukrov%C3%A1_%C5%99epa&oldid=17821646)
- [22] PULKRÁBEK, Josef. Okopaniny. [agrobiologie.cz](http://agrobiologie.cz) [online]. c2019 [19. 10. 2019].  
Dostupné z:  
<http://agrobiologie.cz/SMEP3/Okopaniny/okopaniny/php/skripta/kapitolaf9ef.html?titulkey=5&idkapitola=152#top>  
19. 10. 2019 18:37
- [23] Khanova škola.C-4 photosynthesis. [khanovaskola.cz](http://khanovaskola.cz) [online]. c2019 [cit. 19. 10. 2019]. Dostupné z: <https://khanovaskola.cz/video/32/172/2356-c4-fotosynteza>

- [24] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Hatchův–Slackův cyklus* [online]. c2019 [cit. 19. 10. 2019]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hatch%C5%AFv%E2%80%93Slack%C5%AFv\\_cyklus&oldid=18068628](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hatch%C5%AFv%E2%80%93Slack%C5%AFv_cyklus&oldid=18068628)
- [25] *Wikiskripta: Škrob* [online]. c2019 [cit. 19. 10. 2019]. Dostupné z:  
<https://www.wikiskripta.eu/w/%C5%A0krob>
- [26] *Wikiwand: Amiloza* [online]. c2019 [cit. 19. 10. 2019]. Dostupné z:  
<https://www.wikiwand.com/bs/Amiloza>
- [27] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Glukóza* [online]. c2019 [cit. 24. 10. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Gluk%C3%B3za&oldid=17326521>
- [28] *Wikimedia Commons: Maltóza* [online]. c2019 [cit. 24. 10. 2019]. Dostupné z:  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malt%C3%B3za.svg>
- [29] RYCHTERA, M., PATÁKOVÁ, P., MELZOCH, K. *Biotechnologie v potravinářském průmyslu*. Ústav Biotechnologie. ub.vscht.cz. [online]. c2019 [cit. 27. 10. 2019]. Dostupné z: <https://ub.vscht.cz/files/uzel/0015847/biotpotrprum.pdf?redirected>
- [30] *Wikipedia: The Free Encyclopedia: Saccharomyces cerevisiae* [online]. c2019 [cit. 29. 10. 2019]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces\\_cerevisiae](https://en.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces_cerevisiae)
- [31] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Alkoholové kvašení* [online]. c2019 [cit. 7. 11. 2019]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Alkoholov%C3%A9\\_kva%C5%A1en%C3%A1D&oldid=17996974](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Alkoholov%C3%A9_kva%C5%A1en%C3%A1D&oldid=17996974)
- [32] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Sacharóza* [online]. c2019 [cit. 26. 10. 2019]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sachar%C3%B3za&oldid=17316365>
- [33] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Kolona (chemie)* [online]. c2017 [cit. 10. 11. 2019]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolona\\_\(chemie\)&oldid=15428251](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolona_(chemie)&oldid=15428251)
- [34] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Zeolit* [online]. c2019 [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zeolit&oldid=18004588>
- [35] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Celulóza* [online]. c2019 [cit. 14. 11. 2019]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Celul%C3%B3za&oldid=17753757>
- [36] *Encyklopédia poznania: Chémia: Celulóza* [online]. c2019 [cit. 14. 11. 2019]. Dostupné z: <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/4995/celuloza>

- [37] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Hemicelulóza* [online]. c2018 [cit. 14. 11. 2019].  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hemicelul%C3%B3za&oldid=16258979>
- [38] *Wikipedia: The Free Encyclopedia: Hemicellulose* [online]. c2019 [cit. 14. 11. 2019].  
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose>
- [39] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Lignin* [online]. c2017 [cit. 15. 11. 2019].  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lignin&oldid=15391283>
- [40] PAULOVÁ, L., PAVLOVÁ, E., OLŠAN, V., JAISAMUT, K., LIPOVSKÝ, J., RYCHTERA, M., MELZOCH, K. Využití odpadních materiálů na bázi lignocelulózy jako suroviny pro výrobu bioetanolu. *Chemmagazín*. 2010. č. 5, ročník XX, 16–18, ISSN 1210-7409
- [41] Úroda: Nový pohled na hodnocení organické hmoty při pěstování meziplovin. *uroda.cz* [online]. c2019 [cit. 15. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.uroda.cz/novy-pohled-na-hodnoceni-organicke-hmoty-pri-pestovani-meziplovin/>
- [42] PAULOVÁ, L., JAISAMUT, K., PATÁKOVÁ, P., RYCHTERA, M., MELZOCH, K. Možnosti produkce bioetanolu z fytomasy a odpadních materiálů na bázi celulózy. *Chemmagazín*. 2011. č. 5, ročník XXI, 8–10, ISSN 1210-7409
- [43] *Automobil Škoda Karoq 1.5 TSI 110 kW Style MAN*. katalog automobilů.cz [online]. 2020 [cit. 19. 2. 2020]. Dostupné z: <http://skoda.katalog-automobilu.cz/automobil/skoda-karoq-1-5-tsi-110-kw-style-man>
- [44] Certifikát VinCheck, číslo certifikátu: 5a956v572834 | 12.02.2020 17:38:35 | VIN: TMBJR7NU8KJ006012
- [45] *Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C*. Technology-garage.cz. [online]. [cit. 19. 2. 2020]. Dostupné z: <http://www.technology-garage.cz/odsavaci-ventilator-filcar-al-1500c-ventilator-11-kw-15-hp-pro-carvantruckbus>
- [46] *Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE*. GAPA.cz [online]. [cit. 19. 2. 2020]. Dostupné z: <http://www.gapa-vahy.cz/produkty-laboratorni-vaha-vibra-aj-6200ce-detail-8003?tabs=Informace%20o%20produktu>
- [47] *Emisní analyzátor VMK*. Emise. Katedra vozidel a pozemní dopravy ČZU. [online]. [cit. 20. 2. 2020]. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvdpd/merici-vybaveni/emise?editmode=0>
- [48] *Updated Inversion Matrices for Engine Exhaust Particle Sizer™ (EEPS™) Spectrometer Model 3090*. [online]. [cit. 20. 2. 2020]. Dostupné z:

<https://www.tsi.com/getmedia/22bf0106-13d9-4503-b179->

[bc76cb55e100/Updated\\_Inversion\\_Matrices\\_EEPS-005-A4-web?ext=.pdf](https://www.tsi.com/getmedia/22bf0106-13d9-4503-b179-bc76cb55e100/Updated_Inversion_Matrices_EEPS-005-A4-web?ext=.pdf)

[49] *Částicový analyzátor TSI EEPS 3090*. Emise. Katedra vozidel a pozemní dopravy

ČZU. [online]. [cit. 20. 2. 2020]. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvdp/merici->

[vybaveni/emise?editmode=0](https://katedry.czu.cz/kvdp/merici-vybaveni/emise?editmode=0)

[50] *VCDS-Standard*. vag-com.cz. [online]. [cit. 21. 2. 2020]. Dostupné z: <http://www.vag->

[com.cz/zbozi/3588/VCDS-Standard.htm](http://www.vag-com.cz/zbozi/3588/VCDS-Standard.htm)

[51] TSI Incorporated Corporate Headquarter. Model 3090 Engine Exhaust Particle

Sizer™ Spectrometer. Particle Instruments [online]. [cit. 21. 2. 2020]. Dostupné z:

[file:///C:/Users/User/Downloads/eeps--espectrometros-emisiones-motores%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/eeps--espectrometros-emisiones-motores%20(1).pdf)

[52] *Emission Test Cycles: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)*.

DieselNet [online]. 2019.01 [cit. 22. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.>

[com/standards/cycles/wltp.php](https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php)

## 14 Seznam obrázků

<b>Obr. č. 1</b> Strukturní vzorec ethanolu [13].....	11
<b>Obr. č. 2</b> Hatchův–Slackův cyklus [24].....	22
<b>Obr. č. 3</b> Strukturní vzorec amylozy a amylopektinu – Haworthova projekce [25], [26]...	23
<b>Obr. č. 4</b> Strukturní vzorec maltózy a glukózy – Haworthova projekce [27], [28].....	23
<b>Obr. č. 5</b> Kvasinky <i>Saccharomyces cerevisiae</i> zobrazené elektronovým mikroskopem [30].....	26
<b>Obr. č. 6</b> Strukturní vzorec sacharózy – Haworthova projekce [32].....	28
<b>Obr. č. 7</b> Patrová rektifikační kolona [33].....	31
<b>Obr. č. 8</b> Molekulární struktura krystalové mřížky zeolitu [34].....	33
<b>Obr. č. 9</b> Strukturní vzorec části řetězce celulózy [36].....	34
<b>Obr. č. 10</b> Strukturní vzorec části řetězce hemicelulózy – Haworthova projekce [38].....	35
<b>Obr. č. 11</b> Modelové zobrazení struktury lignocelulóзовého materiálu [41].....	35
<b>Obr. č. 12</b> Škoda Karoq 1,5 TSI / 110 kW [43].....	38
<b>Obr. č. 13</b> Odsávací ventilátor FILCAR AL-1500/C [45].....	42
<b>Obr. č. 14</b> Laboratorní váha Vibra AJ-6200CE [46].....	43
<b>Obr. č. 15</b> Schéma spektrometrické detekce pevných částic [48].....	45
<b>Obr. č. 16</b> Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 [49].....	46
<b>Obr. č. 17</b> Grafické uživatelské rozhraní diagnostického programu VCDS Standard [50].....	48
<b>Obr. č. 18</b> Grafické rozhraní softwaru EEPS [51].....	48
<b>Obr. č. 19</b> Grafický průběh cyklu WLTC třídy 3b [52].....	50
<b>Obr. č. 20</b> Schéma měřicího stanoviště.....	52
<b>Obr. č. 21</b> Průběh produkce nespálených uhlovodíků ( $H_xC_y$ ) během jízdního cyklu.....	54
<b>Obr. č. 22</b> Průběh produkce oxidů dusíku ( $NO_x$ ) během jízdního cyklu.....	56
<b>Obr. č. 23</b> Průběh produkce oxidu uhelnatého (CO) během jízdního cyklu.....	58
<b>Obr. č. 24</b> Průběh produkce oxidu uhličitého ( $CO_2$ ) během jízdního cyklu.....	59
<b>Obr. č. 25</b> Průběh toku pevných částic během jízdního cyklu.....	61
<b>Obr. č. 26</b> Vnější otáčková charakteristika motoru – jednotlivé palivové směsi.....	63
<b>Obr. č. 27</b> Vnější otáčková charakteristika motoru – srovnání palivových směsí.....	65
<b>Obr. č. 28</b> Průměrná spotřeba paliva na 1 kilometr jízdního cyklu.....	66

## 15 Seznam tabulek

<b>Tabulka č. 1</b> Základní fyzikálně-chemické vlastnosti etanolu [13].....	11
<b>Tabulka č. 2</b> Srovnání fyzikálně – chemických vlastností etanolu, benzínu a nafty [16], [17].....	14
<b>Tabulka č. 3</b> Procentuální změna provozních parametrů traktorového motoru v porovnání s provozem na motorovou naftu z testu provedeném v TÜV ÚVMV s.r.o. [18].....	16
<b>Tabulka č. 4</b> Parametry testovacího vozu ŠKODA Karoq [44].....	39
<b>Tabulka č. 5</b> Technické specifikace benzínu Natural 95.....	40
<b>Tabulka č. 6</b> Parametry jednotlivých součástí válcové zkušebny.....	41
<b>Tabulka č. 7</b> Technické parametry ventilátoru FILCAR AL-1500/C [45].....	42
<b>Tabulka č. 8</b> Technické specifikace váhy Vibra AJ-6200CE [46].....	43
<b>Tabulka č. 9</b> Tabulka č. 9: Přesnost měření jednotlivých složek emisí analyzátozem VMK [47].....	44
<b>Tabulka č. 10</b> Technické parametry částicového analyzátozem [49].....	46
<b>Tabulka č. 11</b> Třídy WLTC [51].....	49
<b>Tabulka č. 12</b> Naměřené hodnoty podílu složek emisí na 1 km jízdního cyklu.....	62
<b>Tabulka č. 13</b> Maximální výkon a točivý moment motoru při použití testovaných palivových směsí.....	64
<b>Tabulka č. 14</b> Průměrná spotřeba paliva na 1 km jízdního cyklu.....	66
<b>Tabulka č. 15</b> Porovnání testovaných palivových směsí.....	67
<b>Tabulka č. 16</b> Výsledné pořadí testovaných palivových směsí.....	69