

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: M4101 Zemědělské inženýrství  
Studijní obor: Zemědělské inženýrství - prvovýroba  
Katedra: Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky  
Vedoucí katedry: doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

### Úpravy pracovních strojů a příslušenství pro pohon dřevoplynem

Vedoucí diplomové práce:  
Ing. Josef Frolík, CSc.

Autor diplomové práce:  
Bc. Petr Šedivý

České Budějovice, 2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr ŠEDIVÝ**  
Osobní číslo: **Z13609**  
Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**  
Studijní obor: **Zemědělské inženýrství**  
Název tématu: **Využití dřevoplynu pro pohon pracovních strojů**  
Zadávací katedra: **Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je posoudit možnosti využití dřevoplynu pro pohon pracovních strojů v zemědělském a lesnickém provozu v návaznosti na vyvinutý dřevoplynový generátor.

1. Vlastnosti, výroba a využití dřevoplynu.
2. Pracovní stroje vhodné pro pohon dřevoplynem.
3. Úpravy pracovních strojů a jejich příslušenství pro pohon dřevoplynem.
4. Měření výkonů motorů a spotřeb paliva u vybraných pracovních strojů.
5. Porovnání naměřených hodnot s klasickými palivy.
6. Doporučení pro praxi.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **60 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

**Mráz, V., Mráz, J.: Dřevoplynové generátory. Naše vojsko, Praha, 1954;**  
**Murtinger, K., Beranovský, J. : Energie z biomasy. ERA, Brno, 2008;**  
**<http://www.gengas.nu/bilder/dokogen.shtml>**  
**<http://drevoplyn.wz.cz/>**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Frolík, CSc.**  
Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky

Datum zadání diplomové práce: **14. ledna 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2015**

  
prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc., dr. h. c.  
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA  
studijní oddělení  
Studentská 13  
370 05 České Budějovice

L.S.

  
doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 25. března 2014

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem lidem, kteří se přímo či nepřímo podíleli na vzniku této práce. Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Josefu Frolíkovi za starostlivé a pečlivé odborné vedení, kritické připomínky a komentáře při hodnocení a interpretaci získaných výsledků, odbornou pomoc a všestrannou podporu při studiu. Dále bych rád poděkoval vedení a pracovníkům ZD Netřebice za pomoc při získávání dat a za laskavé zapůjčení strojů, dále také Ing. Antonínu Marčákovi za poskytnutí všech materiálů a Mgr. Radovanu Šejvlový za uvedení do současného stavu v oblasti zplynování biomasy v ČR.



### **Abstrakt**

Autor se věnuje možnosti využití dřevní štěpky jako paliva traktorů a pracovních strojů v zemědělství a souvisejících oborech, s cílem zvýšení soběstačnosti a dosažení uhlíkové neutrality. Práce porovnává dřevo a konvenční motorová paliva ve skutečném provozu. Součástí práce je návrh funkčního zařízení o výkonu 5 – 10 kW.

Klíčová slova: generátor dřevoplynu, spalovací motory, úprava plynu, přestavby strojů.

### **Abstract**

The author focuses on the possibility of using wood chips as fuel for tractors and machinery in agriculture and related fields, in order to increase self-sufficiency and achieving carbon neutrality. The work compares wood and conventional motor fuels in the real operation. Part of this thesis is to design a functional device with an output of 5-10 kW.

Key words: woodgas generátor, IC engines, condition of woodgas, rebuild of work machines.

<b>1. Úvod .....</b>	<b>9</b>
1.1 Historie generátorového provozu. ....	9
<b>2. Teoretická část.....</b>	<b>13</b>
2.1 Princip zplynování.....	13
2.2 Typy generátorů.....	13
2.2.1 Protiproudý generátor „updraft“ .....	14
2.2.2 Souproudý generátor „downdraft“ .....	14
2.2.3 Vrstevnatý generátor „stratified“ nebo též „open top“ <sup>19</sup> .....	17
2.2.4 Spodový souproudý generátor .....	18
2.2.5 Generátory s křížovým ložem „cross draft“ .....	19
2.2.6 Dvoustupňový generátor „two stage gasifier“ .....	20
2.2.7 Generátory s fluidní vrstvou .....	21
2.3 Filtrace a chlazení generátorového plynu.....	22
2.3.1 Nežádoucí látky v plynu.....	23
2.3.2 Možnosti odstraňování dehtu a TZL.....	25
2.3.3 Vysokoteplotní čištění plynu .....	26
2.3.4 Filtrace za studena a mokré vypírání plynu.....	28
2.4 Tvorba směsi pro spalovací motory .....	33
2.4.1 Směšovač.....	36
2.5 Požadavky na palivo pro generátory .....	37
2.6 Stroje pro výrobu generátorového paliva.....	39
2.6.1 Diskový (kolový) štěpkovač.....	39
2.6.2 Bubnové štěpkovače .....	40
2.6.3 Šnekové štěpkovače.....	41
2.6.4 Štěpkovače s protiběžným ostřím („ROJEK“). ....	41
2.6.5 Jednohřídelový drtič.....	42
2.6.7 Další možnosti výroby paliva pro generátory .....	42
2.7 Sušení dřevní štěpky .....	43
2.7.1 Pasivní způsob sušení.....	43
2.7.2 Aktivní sušení .....	46

<b>3. Cíle práce .....</b>	<b>48</b>
<b>4. Praktická část.....</b>	<b>49</b>
4.1 Výroba mechanické energie dřevoplynem .....	49
4.1.1 Metodika měření.....	49
4.1.2 Experimentální zařízení .....	50
4.1.3 Průběh měření.....	54
4.1.4 Výsledky měření .....	56
4.1.5 Vyhodnocení měření.....	57
4.2 Možnosti využití dřevoplynu .....	59
4.2.1 Důvody okrajového využití dřevoplynu.....	60
4.2.3 Možnosti přestaveb stávajících strojů .....	61
4.2.4 Přestavby motorů .....	62
4.3 Návrh jednoduchého zařízení .....	68
4.3.1 Účel použití a základní data.....	68
3.4.2 Popis funkce zařízení .....	72
3.4.3 Popis funkce vodního okruhu.....	73
<b>5. Závěr.....</b>	<b>75</b>
Seznam použitých zdrojů.....	76

Příloha

# 1. Úvod

Jedním z hlavních motorů, které ženou technický pokrok stále vpřed, rozvíjejí ho do nejjemnějších detailů, někdy dokonce i za cenu lehké absurdity je bezesporu obyčejná lidská „lenost“ a odvěká touha po usnadnění činností, které souvisejí se základními lidskými potřebami a jejich naplňováním. První využití technických prostředků souvisí zejména se zemědělstvím, stavebnictvím, vodohospodářstvím a dopravou, kde byla potřeba hrubé fyzické síly největší. Z počátku se jednalo pouze o využití jednoduchých prostředků, jako rádlu, kolo, potrubí, rumpál apod.. Později byla fyzická lidská síla nahrazována silou animální, která se stala po velmi dlouhou dobu prakticky jediným energetickým zdrojem využitelným téměř kdekoliv na rozdíl od kinetické energie vodních toků či větrné energie. S rostoucí potřebou po zdrojích energie se za posledních 200 let začalo využívat uhlí, ropa, plyn a jaderná energie. Bohužel i požití takto významných zdrojů energie nevede k saturaci energetického trhu a potřeba energie stále narůstá. Trendem posledních let je opětovný návrat k obnovitelným zdrojům energie, ke kterým můžeme počítat i dendromasu, tedy dřevo, jehož využití je sice staré jako lidstvo samo, avšak spolu s technickým pokrokem je možné dřevo využít i jinak než prostým spálením. Jedním ze způsobů jak využít chemickou energii dřevní hmoty je zplyňování a následné využití vyrobeného plynu pro různé účely. Myšlenkou využití dřevního plynu (dřevoplynu) pro pohon pracovních strojů, strojních zařízení a traktorů se zabývá tato diplomová práce, která z části vychází z mé bakalářské práce a je vedena snahou o popularizaci a šíření tohoto způsobu využití dřeva i v ČR.

## 1.1 Historie generátorového provozu.

Dřevní plyn nebyl vždy žádanou látkou, ale nejprve vznikal jako vedlejší produkt při výrobě dřevěného uhlí v milířích, kde docházelo ke karbonizaci dřeva a úniku plynu skrz vrstvu hlíny tvořící izolaci. První pokusy o výrobu dřevoplynu zplyňováním provedl Philippe Lebon na konci 18. století, ale teprve v Londýně roku 1812 byla uskutečněna první úspěšná suchá destilace (uvolňování plynných látek z organických sloučenin).<sup>8</sup>Tím ale využití dřevoplynu neskončilo. Francouzský mechanik Jean Lenoir roku 1860 sestrojil plně funkční stacionární plynový motor a již roku 1884 byly v Anglii známy upravené plynové motory. Začátkem 20. století byl zkonstruován T. H. Parkerem první automobil poháněný dřevoplynem s vlastní mobilní zplyňovací jednotkou. V době krize byl dřevoplyn levnou alternativou, trpěl však zásadními nedostatky, mezi které patřilo časté zanášení motorů dehtem. Běžný byl snížený a nestálý výkon. Při větším množství popílku (prachu) docházelo ke zvýšenému opotřebením abrazí konstrukčních částí motorů. Lepší volbou v tuto dobu byly rychle se rozšiřující elektromotory a naftové motory, které nevyžadovaly

složitou údržbu. Kvůli těmto nevýhodám byl odsunut na druhou kolej. Tyto nevýhody byly z velké části podpořeny neznalostí konstrukce generátoru, jeho údržby a absencí čištění výchozího plynu. Největšímu zájmu se této technologii dostalo až s hospodářskou krizí po 1. světové válce a s příchodem 2. světové války v letech 1938 až 1945, se kterou byl spojen nedostatek ropných paliv a jejich přidělový systém. Většinu benzínu a nafty využívaly složky armády.<sup>8</sup> Došlo k širokému využití generátorů plynu v zemědělství, v průmyslu, pro pohon stacionárních motorů, v automobilové a lodní dopravě. Dokonce i armáda využívala generátory u vozidel sloužících pro cvičné boje nebo transport materiálu. Ve Švédsku v roce 1945 i navzdory nespolehlivosti pohonu na dřevoplyn, jej využívalo více než 40 % dopravních prostředků. V Dánsku dokonce 90 % vozidel. Odhaduje se, že bylo v provozu 9 miliónů zplyňovacích jednotek. Po 2. světové válce vzrostla dostupnost ropných paliv a zájem v oblasti zplyňování upadl, i přes svůj strategický význam nebylo dále podporováno. Nicméně ve Švédsku pokračovali ve výzkumu, který byl urychlen Suezskou krizí roku 1956<sup>8</sup>. V roce 1957 spustila švédská vláda výzkumný program za účelem příprav na rychlý přechod k autům na dřevoplyn v případě náhlého výpadku zásobování ropou. Švédsko nemá žádné zásoby ropy, ale má rozlehlé lesy, které lze využít na palivo. Cílem výzkumu bylo vyvinout a zdokonalit standardizované zařízení, které by bylo možné uzpůsobit pro použití ve všech druzích dopravních prostředků<sup>9</sup>. Omezení dodávek ropy Suezským průplavem zajistilo zplyňovacím technologiím místo ve Švédských nouzových strategických plánech. Výzkum provedl Národní švédský institut pro testování zemědělské techniky, který je stále v činnosti<sup>8</sup>. Výzkum podpořený výrobcem aut Volvo vedl k získání obsáhlých teoretických znalostí a praktických zkušeností. Bylo vyvinuto několik aut a traktorů. Výsledky jsou shrnuty v dokumentu FAO – Wood gas as engine fuel<sup>23</sup> z roku 1986, kde se také rozebírají některé experimenty z jiných zemí. Švédští a zejména finští amatérští inženýři využili tato data k dalšímu rozvoji této technologie<sup>9</sup>.

V našich podmínkách se generátorový pohon začal rozšiřovat po 1. světové válce a to zejména v mlýnech, hamrech, zámečnických dílnách a k pohonu těžších mechanismů, kde se používal jako alternativa ke klasickému parnímu stroji v místech kde nebylo možno využít kinetickou energii vodního toku či vzduchu. Parní stroj tehdy vyžadoval vysoké pořizovací a provozní náklady pro svou složitost a poměrně nízkou účinnost. Generátorový provoz nabízel levnější řešení pohonu. K tomuto účelu se upravovaly stacionární zážehové a vznětové motory, které pak pomocí transmisních hřídelů a plochých řemenů poháněly nejrůznější stroje a zařízení od mlecí stolice přes buchar až po vrtačku či soustruh. Nejvíce zastoupeným palivem bylo uhlí jako dehtu prosté palivo, které snižovalo nároky na odstraňování dehtu z plynu. Uhlí bylo zplyňováno v protiproudých generátorech různých konstrukcí. Pro ukázkou uvádím úryvek z knihy Josefa Trefulky: *“V letácích výrobců, v novinách atd. bývají občas otiskována hesla: „Dřevo místo benzínu“, “90% úspora“, “Upravte svůj benzinový motor na dřevoplyn“, “Plyn levnější než*

voda“, *“Pohon spolehlivý jako pára“, “Státní podpora a sleva dani na dřevoplyn“, „Pohon zdarma“, atd. atd. Není divu, že malý živnostník (mlýn, pila, truhlárna, zámečnická dílna aj.) zvažuje nevýhody dosavadního pohonu (benzinu, vody, páry elektřiny, nafty) a rozmýšlí se, nemá-li si pořídit moderní dřevoplyn. Jakmile se rozhlásí, že ten či onen živnostník chce nebo musí si pořídit nový pohon, nastanou pravé dostihy zástupců, jednatelů i továrníků, kteří vesměs chválí své a haní cizí výrobky. Uvádí se vždy naprosto spolehlivý chod, úspora paliva, čistota, nízká cena zařízení a možnost rychlých oprav, a vše dokazuje velkým počtem doporučení spokojených majitelů. Poslední důvod, který pro mnohé odběratele je tím nejdůležitějším, je slib možnosti placení ve splátkách, někdy i ujištění, že „motor zaplatí se sám úsporami“. Větší podnikatel, finančně lépe situovaný je v určité výhodě: Může platit hotově a trvat na splnění všech podmínek záruky. Také ten, kdo není tak rychle nucen stavět pohon předsezónní prací, může navštívit různé majitele (samozřejmě u různých továren) a lépe se informovat. Ovšem začátečník, který nezná jaké obtíže se mohou vyskytnout, vyptává se jinak než ten, kdo již byl poškozen. Zajímavé i pochopitelné je to, že mlynář, který teprve krátký čas s novým pohonem pracuje, je továrně ještě mnoho dlužen, dostal vzhledem k závazku dávat výhodnější informace určitou slevu na ceně atd., vysvětluje jen výhody a pomlčí o vadách. Tak se může stát, že i živnostenský inspektor nebo státní znalec – inženýr (vlastně neodborník) je jednostranně informován a pak nevědomky jinde chválí zařízení, které mezitím vypovědělo službu nebo se zničilo.“<sup>10</sup> Nutno podotknout, že ačkoliv tento úryvek až nápadně vystihuje současnost, byl sepsán v roce 1935. Z firem které se v meziválečném období zabývaly výrobou a prodejem zplynovacích zařízení pro stabilní ale i mobilní zástavby bylo poměrně velké množství např.: fa.WIKOW, EKONOM, MULLER, STROJÍRNY VÍTKOVICE, GASMOTIVE, ABOGEN, D.W.K., SCHULTZ, IMBERT a další<sup>10</sup>. Stabilní motory poháněné dřevoplynem byly v Československu provozovány až do konce padesátých let. S rozvojem elektrifikace se od generátorového pohonu pro pohon strojů upouštělo pro pracnost obsluhy. Značný rozmach generátorového provozu v našich zemích zejména pro pohon vozidel a mobilních pracovních strojů nastal v období druhé světové války z důvodu omezeného zásobování ropnými palivy pro civilní sféru, jejíž téměř veškerá osobní a nákladní doprava byla realizována generátorovým provozem nebo animální silou výjimku tvořily pouze vozidla lékařů, policie apod. V průběhu druhé světové války vzniklo množství firem, které se zabývaly výrobou, prodejem a montáží generátorových zařízení a to jak v zahraničí, tak v protektorátu. Zahraniční produkci jednoznačně ovládala firma IMBERT – GENERATOREN GmbH sídlící v Koln – Braunsfeldu s generátorem na dřevo. Úryvek z knihy Adolfa Tůmy (1944):*“Tento generátor je nejrozšířenějším generátorem na dříví na světě. Továrny Imbert jej vyrábějí v několika zemích, do jiných je dovážen. S Imbertem se setkáme v říši i v protektorátě, ve Francii, ve Švýcarsku, v Itálii apod.. V různých zemích se vyrábějí generátory podle imbertovy licence“*<sup>6</sup>. Dalšími významnými výrobci generátorů na dřevo, uhlí, koks či polokoks byli: GUSTLOFF, HANSA, HENSCHEL-*

FINKBEINER, KLÖCKNER-DEUTZ, MERCEDES-BENZ, SÜDGAS, WISCO, ZEUCH, ENZIEGEN GENERATOR a další<sup>6</sup>. Rozmach generátorového pohonu během 2. Světové války byl velmi intenzivní což se negativně promítlo do spotřeby dřeva v celé Evropě. V roce 1944 byla výroba a montáž nových generátorových zařízení zpracovávajících dřevo výrazně omezena výnosem říšské organizace „zentralstelle fur generatoren“<sup>6</sup>. Důvod byl prostý – zemím jako je Francie reálně hrozilo úplné odlesnění a naprostý nedostatek dřeva. Zentralstelle fur generatoren spadající do kompetence tehdejšího říšského ministra Alberta Speera tehdy omezila výrobu generátorů na dřevo a podpořila výrobu a montáž generátorů na uhlí, koks, antracit ale zejména na polokoks. Výhodou těchto paliv byla možnost těžby v Evropě bez nutnosti dovozu. V průběhu 2. Světové války byla vyvinuta technologie výroby benzenu, který bylo možné využít jako alternativu k benzínu bez nutnosti výrazných úprav na motoru a vozidle. Tímto způsobem bylo možné nahradit benzín pro vojenská vozidla, která nemohla být osazena generátory. Vedlejším produktem výroby benzenu byl již zmiňovaný polokoks, jehož nadbytek se snažila vláda využít v dopravě. Polokoks byl v tehdejší době poměrně levným palivem, ale jeho vlastnosti nebyly pro použití v generátorech zcela příznivé, zejména pro velké množství popela a nestálosti jeho charakteru. Generátory na polokoks měly poměrně nízkou provozní spolehlivost a vyžadovaly častou obsluhu, zejména pak vybírání popela a doplňování paliva. Množství popela vyžadovalo téměř neustálý provoz roštovacího zařízení, jehož pohon byl odvozen od pedálu spojky nebo od zvláštní páky umístěné v kabině řidiče<sup>6</sup>.

Krátce po skončení válečného konfliktu byla objevena obrovská naleziště ropy v severní Africe a blízkém východě. Ropa tedy začala opět proudit do Evropy a potřeba náhradního pohonu vozidel postupně utuchala.

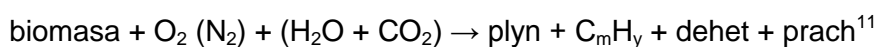


## 2. Teoretická část

### 2.1 Princip zplynování

Podstatou zplynování je výroba generátorového plynu. Proces zplynování se realizuje ve zplynovacím generátoru<sup>7</sup>. V literatuře se lze setkat s různými výrazy pro zplynovací reaktor, v závislosti na stáří literatury a jejím charakteru je možno se setkat s výrazy jako reaktor, vyvíječ plynu, zplynovač či zplynovací jednotka. Všechny tyto výrazy lze označit za synonyma pro zařízení produkující plyn z biomasy za vysokých teplot zplynováním. V této práci bude pro přehlednost využíván pouze výraz generátor. Zplyňování je termochemická přeměna uhlíkatého materiálu na hořlavé plyny působením vysokých teplot a zplyňovacích médií. Jako zplyňovací médium se používá volný nebo vázaný kyslík (oxid uhličitý, vodní pára) a vodík. Hlavním produktem je hořlavý plyn obsahující plynné složky CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, nasycené a nenasycené uhlovodíky a výševroucí pyrolýzní produkty (dehet), tuhý zbytek často obsahující jisté množství uhlíku, prach a další sloučeniny. Z kilogramu suchého dřeva se vyrobí asi 2,5 m<sup>3</sup> dřevoplynu.

Celý proces lze popsat zdánlivě jednoduchou rovnicí<sup>11</sup>



Z chemického hlediska je proces zplyňování dřeva poměrně složitý. Zahrnuje mnoho kroků jako jsou:

- Odpařování přebytečné vody ze dřeva (sušení).
- Tepelný rozklad na plyn, kondenzující páry a dřevěné uhlí (pyrolýza).
- Následné tepelné štěpení par na plyn a dřevěné uhlí.
- Zplyňování dřevěného uhlí parou nebo oxidem uhličitým.
- Částečná oxidace hořlavých plynů, složek a dřevěného uhlí.

### 2.2 Typy generátorů

Generátory pro výrobu dřevoplynu nebo jiných plynů vznikajících procesem zplynování (syntézní plyny, svítiplyn, vodní plyn apod.) lze rozdělit podle několika kritérií. Konstrukce generátorů se liší podle zplynovacího média, mimo okolního vzduchu to může být čistý kyslík, přehřátá pára či kombinace. Zplynování může probíhat za atmosférického tlaku či za zvýšeného, tak jako je tomu při zplynování uhlí. Teplo potřebné pro nezbytné chemické pochody může být dodáno oxidací části paliva nebo z vnějšího zdroje a umístění reagující vrstvy paliva může být zajištěno roštem (pevné lože) nebo zajištěno zcela odlišným způsobem (fluidní technologie). V této práci bude věnována pozornost převážně generátorům použitelných k výrobě plynu pro pohon mobilních zařízení, tedy generátorům pracujícím v oblasti

atmosférického tlaku, které jako zplynovací médium využívají vzduch a jako zdroj tepla pro vlastní chemické pochody energii části paliva. Jako palivo pro generátory je v této práci uvažováno pouze dřevo.

### **2.2.1 Protiproudý generátor „updraft“**

Nejjednodušším typem zplyňovacích zařízení je protiproudý generátor s pevným roštem. Biomasa je přiváděna ústím, které je na vrcholu zařízení a směřuje dolů, proti směru proudícího vzduchu, odtud také protiproudý. Vzduch je přiváděn ve spodní části, produkovaný plyn je odváděn na vrcholu. Biomasa se pohybuje proti proudu plynu a postupně prochází zónami sušení, pyrolýzy, redukce a oxidace. V sušící zóně je biomasa vysušena. V destilační zóně nebo v zóně pyrolýzy je biomasa rozložena na těkavé plyny a pevné částice. Teplo pro pyrolýzu a sušení je přiváděno převážně z nahoru proudících plynů a částečně ze záření z ohniště<sup>16</sup>. Díky pomalému proudění a nízké turbulenci v kombinaci s filtrací ve vrstvě materiálu obsahuje plyn zpravidla nízké množství prachových částic. Díky vysoké účinnosti transformace energie má plyn ve srovnání s ostatními typy generátorů nejvyšší výhřevnost (až 7 MJ/m<sup>3</sup>), ale bohužel obsahuje velké množství dehtu. Svým složením se dehet blíží dehtu primárnímu, obsahuje značné množství kyslíkatých sloučenin, je částečně rozpustný ve vodě (kyseliny, fenoly) a snadno tvoří emulze<sup>11</sup>. Vysoký obsah dehtu ve výstupním plynu významně redukuje jeho použití pro pístové spalovací motory. I přesto byly souproudé generátory v období II. Světové války hojně využívány pro náhradní pohon vozidel, ovšem jen jako generátory na uhlí, koks, antracit či dřevěné uhlí. Tato paliva vytvářejí v protiproudém generátoru buď minimální, nebo nulové množství dehtu.

### **2.2.2 Souproudý generátor „downdraft“**

Souproudé generátory byly velmi úspěšně užívány pro spalovací motory z důvodu nízkého obsahu dehtu<sup>17</sup>. Většina údajů vykázaných v této práci byla soustředěna na souproudé systémy, které budou hlavním projednávaným generátorem v této práci. Souproudý generátor je nejrozšířenějším typem generátoru na světě zejména pro malý obsah dehtu v produkovaném plynu, jednoduchou konstrukci a autoregulační schopnost generátoru, která zaručuje poměrně velkou pružnost generátoru v závislosti na zatížení (množství odebíraného plynu). Autoregulační schopnost zajišťuje vždy dostatečnou vrstvu dřevěného uhlí nad i pod vzduchovými tryskami, kde probíhá převážná část reakcí formujících výsledný plyn. V následujících bodech jsou stručně rozepsány základní procesy a reakce, které probíhají v jednotlivých částech reaktoru.

#### **Zóna dosoušení a pyrolýzy paliva**

Vodní pára vzniklá vysoušením dřeva proudí dolů, kde se připojuje k vodní páře vzniklé oxidací. (V redukční zóně se pak z části páry uvolní reakcí se žhnuoucím dřevěným uhlím vodík; zbytek páry v dřevoplynu zůstane a vytváří jeho vlhkost,

kterou je potřeba před vstupem do motoru zkondenzovat)<sup>17</sup>. Zóna pyrolýzy pod dosoušecí vrstvou kde probíhá tepelný rozklad paliva začíná při teplotách nad cca 250 °C. Velké molekuly celulózy (té je 50 %), hemicelulózy (25 %) a ligninu (25 %) se rozpadají na molekuly menší a současně vzniká dřevěné uhlí. Jak pyrolyzované složky klesají v generátoru dolů do oblasti vyšších teplot, rozklad pokračuje a vznikají látky s ještě menšími molekulami (vodík, metan, oxid uhelnatý, etan, etylén atd.) Jejich část pak v oxidační zóně shoří spolu se vzniklým dřevěným uhlím, část se stane součástí výstupního dřevoplynu<sup>17</sup>. Při tomto procesu je z paliva odstraňována prchavá hořlavina, která ve formě pyrolýzního plynu pokračuje v generátoru do oxidační zóny. Pokud však v dolní části pyrolyzované vrstvy není teplota dostatečně vysoká, nebo je-li čas pro rozpad na zplodiny s malými molekulami příliš krátký, dostanou se páry sloučenin se středně velkými molekulami do výstupního dřevoplynu a tvoří pak na chladnějších částech systému dehtovité a olejovité usazeniny, které jsou tvořeny zejména primárními a sekundárními dehty. Škála sloučenin, kterou je dehet tvořen je velmi široká<sup>17</sup>. Primární dehet obsahuje bezprostřední produkty pyrolýzy základních složek biomasy. Fragmenty holocelulózy a ligninu, kyseliny, aldehydy, alkoholy, furany, furfuraly a další. Celkový počet složek přesahuje několik stovek a dehet v plynu je přítomen ve značném množství. Nestabilní primární dehet se poměrně snadno transformuje na sekundární dehet, který charakterizují stabilnější fenoly a olefiny. Jejich obsah v plynu je nižší a při působení vyšších teplot i tyto látky podléhají další transformaci a štěpení za vzniku terciárního dehtu reprezentovaného benzenem, alkylaromáty (ethylbenzen, xylen, toluen, styren) a polyaromatickými uhlovodíky (indan, naftalen, methylnaftaleny, acenaftalen, fenantren, fluoranten, pyren). Benzen a alkylaromáty jsou někdy označovány jako lehce štěpitelný terciární dehet, polyaromatické uhlovodíky jsou pak označovány za těžce štěpitelný terciární dehet. Množství látek přítomných v terciárním dehtu je omezeno na několik desítek, mezi hlavní patří 15-20 složek. Tento typ dehtu je zpravidla produkován souprůdnými generátory. S rostoucí molekulovou hmotností obsah jednotlivých složek v terciárním dehtu klesá. Teplota také ovlivňuje množství dehtu a s rostoucí teplotou obsah dehtu v plynu značně klesá, což je často využíváno u termického štěpení dehtu, avšak jeho termická stabilita prudce roste, což způsobuje značné potíže při jeho úplném odstraňování<sup>11</sup>.

### **Zóna oxidace**

Ta začíná v místě, kde je do generátoru přiváděn spalovací vzduch a pokračuje směrem dolů. Teplota tam vzrůstá na 1200 – 1500°C<sup>17</sup>. Zde by se měly rozštěpit pokud možno všechny kondenzovatelné produkty pyrolýzy. Je kvůli tomu potřeba optimalizovat tvar oxidační zóny i rychlost a teplotu spalovacího vzduchu. Průnik spalovacího vzduchu palivem nesmí být totiž příliš dlouhý (nezbývalo by dost kyslíku k hoření vzdálenějšího paliva). K tomu vedlo zmenšení průřezu generátoru v oblasti přívodu vzduchu (vytvoření „hrdla“) a rozmístění vzduchových trysek po celém

obvodu<sup>17</sup>. Distribuce vzduchu v oxidační vrstvě a její zásobování kvalitním palivem, tedy dokonalým dřevěným uhlím, má zcela zásadní vliv na kvalitu výstupního plynu. Pokud odplynění dřeva neproběhne v pyrolýzní vrstvě dokonale a v oxidační zóně začne růst podíl nedostatečně zpracovaného dřevěného uhlí, hrozí riziko poklesu teploty a tím pádem zvýšení podílu nedostatečně rozštěpených produktů pyrolýzy které mají neblahý vliv na zanášení motoru dehtem. Nekvalitní dřevěné uhlí vzniká v pyrolýzní vrstvě obvykle krátkou dobou zdržení paliva, které nemá dostatek času na zuhelnatění. Stejně negativně mohou působit kanály a zkratové proudy v generátoru zaviněné nepravidelným propadáváním (sestupem) paliva v generátoru. Tento jev nastává obvykle u rozměrově nestejnorožého paliva, ve kterém jsou obsaženy nepřipustně velké kusy nebo naopak příliš drobná frakce či dlouhá vlákna a drobné koncové části větví. Takové palivo pak snadno tvoří klenbu, která má za následek tvorbu „dutých“ míst s možností zkratového proudu nerozštěpených produktů pyrolýzy.

V oxidační vrstvě generátoru převažuje dokonalý typ hoření:<sup>17</sup>

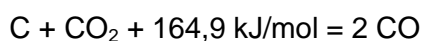


Vyskytuje se však i nedokonalé hoření:



### **Zóna redukce (vrstva na roštu)**

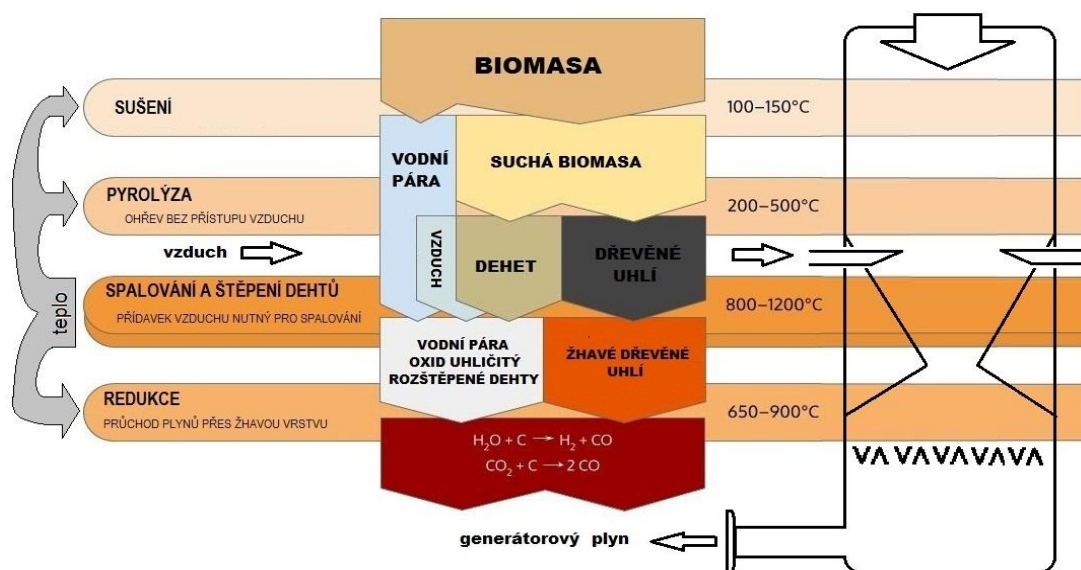
V redukční zóně se spaliny za poklesu teploty obohacují o hořlavé plyny oxid uhelnatý a vodík na úkor oxidu uhličitého a vodní páry. Žhnoucí dřevěné uhlí v ní reaguje s vodní parou a oxidem uhličitým na oxid uhelnatý a vodík. Oxid uhličitý reaguje následně se vzniklým vodíkem na oxid uhelnatý a vodní páru. Teplota v této zóně klesá (na cca 950°C), neboť převažují reakce endotermické, viz následující rovnice:<sup>17</sup>



Vyskytuje se tam však i reakce exotermická:  $CO + 3 H_2 = CH_4 + H_2O + 205,9 \text{ kJ/mol}$

a tepelně neutrální reakce  $C + 2H_2 = CH_4$

Grafické znázornění pochodu v generátoru znázorňuje obrázek 2.1.

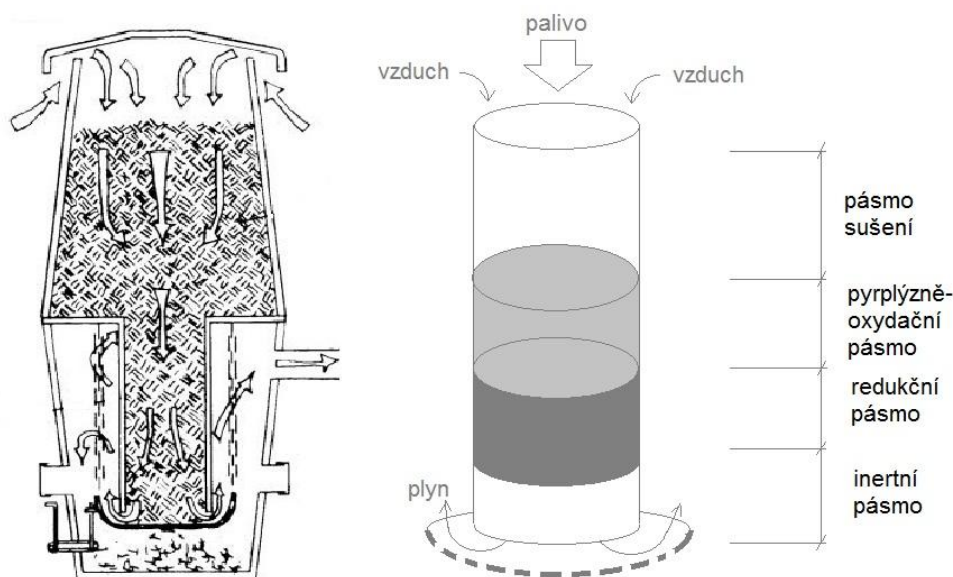


Obrázek 2.1 Termochemické pochody v generátoru (autor).

### 2.2.3 Vrstevnatý generátor „stratified“ nebo též „open top“<sup>19</sup>

Modifikací a značným zjednodušením konstrukce souproutého generátoru vznikl v 80. letech minulého století generátor česky označovaný jako vrstevnatý. Hlavním důvodem toho pojmenování je fakt, že jednotlivé fáze zplynování nejsou nijak konstrukčně odděleny, ale vyskytují se v generátoru ve vrstvách. Základní myšlenkou této modifikace je nahrazení poměrně komplikované konstrukce vzduchových trysek a značně tepelně namáhaného zúžení prostým tubusem<sup>15</sup>. Tento svislý konstrukční prvek je shora zcela otevřen bez jakýchkoliv uzavíratelných prvků. Spodní část je uzavřena pohyblivým roštem. Otevřená vrchní část slouží pro doplňování paliva a pro vstup zplynovacího vzduchu. Vzduch pro zplynování je přiváděn z vrchu a prostupuje sušícím pásmem, kde strhává vodní páry uvolněné při vysoušení dřeva a vstupuje spolu s nimi do pyrolyzně-oxidační vrstvy, kde se účastní spalování dřeva. Energie uvolněná z tohoto procesu slouží k vysoušení dřeva, k jeho pyrolýze a k redukčním reakcím pod oxidační vrstvou. Teplota v tomto typu reaktoru dosahuje až 1200°C v závislosti na kvalitě paliva. Průchod pyrolyzních plynů touto vrstvou zaručuje dobré štěpení dehtů. Jejich obsah ve výsledném plynu se pohybuje okolo 0,5 g/m<sup>3</sup>. Teplota pod oxidační vrstvou v důsledku endotermní redukce plynu rychle klesá a postupně zpomaluje rychlost těchto redukcí. Ve spodní části těsně nad roštem se hromadí nedopal a popel, částečně tvoří jakýsi filtrační koláč<sup>15</sup>, který snižuje obsah tuhých znečišťujících látek v plynu, což je spolu s jednoduchostí vrstevnatého generátoru nespornou výhodou. Jako určitou nevýhodu lze vnímat poměrně vysoký obsah nedopalu (40 – 60%) ale zejména vysokou citlivost generátoru na změny ovlivňující průběh reakcí jako například kvalita paliva, množství odebíraného plynu a vlhkost paliva. Náhlé změny těchto parametrů vedou ke změně rozvrstvení jednotlivých pásem a negativně se projeví

na kvalitě plynu. I přesto se ale lze setkat s vrstevnatými generátory i ve vozidlových aplikacích a to hlavně pro svou velmi jednoduchou konstrukci a výrobní nenáročnost. Schéma konstrukce vrstevnatého generátoru ukazuje obrázek 2.2.



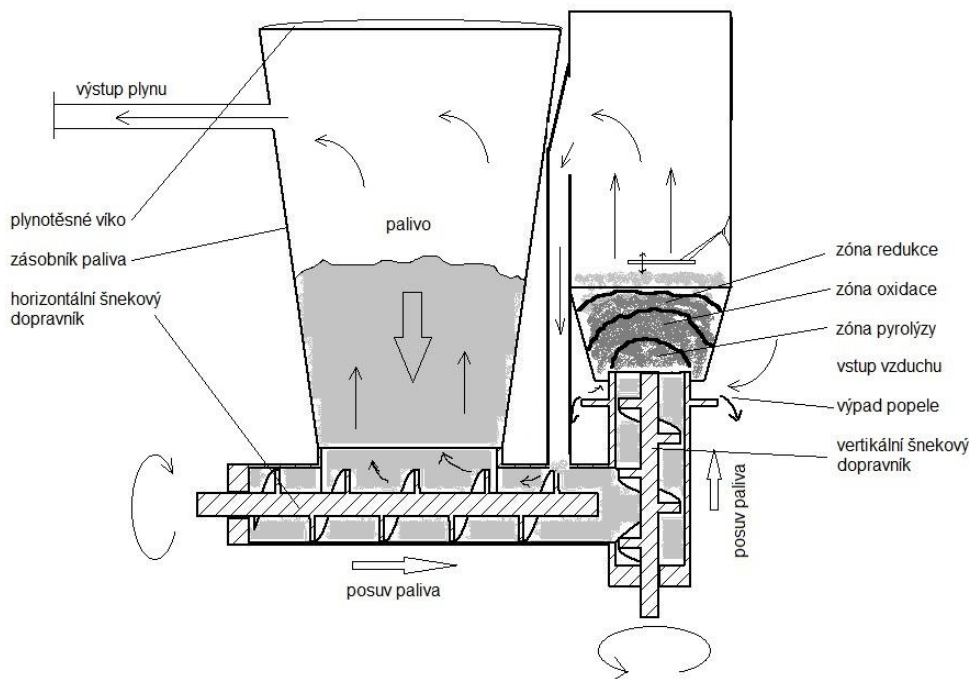
Obrázek 2.2 Vrstevnatý generátor<sup>19</sup>

### 2.2.4 Spodový souproudý generátor

Systém spodového souproudého generátoru je založen na myšlence reverzace výše uvedeného souproudého generátoru. Přívod paliva není realizován gravitací, ale je zajištěn šnekovým dopravníkem, který posouvá palivo vzhůru do zplyňovací komory. Do speciálně upravené zplyňovací komory je vzduch přisáván na spodní hraně. Výška zplyňované vrstvy je řízena pomocí mechanického snímání výšky paliva. Poloha ukazatele je snímána magnetickým čidlem, které spíná elektromotor vertikálního a horizontálního šnekového dopravníku<sup>22</sup>. Zjednodušené schéma spodového generátoru ukazuje obrázek 2.3.

Nad zplyňovanou vrstvou je reakční prostor, kde dochází k uhlíkovým reakcím a vývinu jednotlivých složek dřevoplynu. V horní části generátoru dřevoplyn přechází do samostatné komory, kde dochází k odloučení popele a nedopalu. Z horní části komory je horký dřevoplyn přiváděn do spodní části zásobníku paliva. Při průchodu palivem – štěpkou je tato vysušována tak, že do zplyňovací komory je horizontálním šnekovým dopravníkem dopravováno suché palivo. Zároveň jsou ve štěpce zachytávány těžké dehty, které se spolu s ní přivádějí zpět do zplyňovací komory, kde se rozloží. Po průchodu zásobníkem prochází zchlazený plyn na cca 75°C do chladicí a čistící jednotky. Nad sušícím zásobníkem paliva je větší zásobník plněný seshora přes plynotěsný poklop. Po vyhoření paliva z obou zásobníků je nutné motor zastavit, otevřít poklop a doplnit palivo<sup>22</sup>. Generátor je schopen zpracovat i

méně kvalitní palivo s vysokým podílem vlhkosti (až 50 %)²². Vzhledem k realizaci posunu paliva šnekovými dopravníky je nutné používat drobnější štěrku o velikosti částic zhruba do 30 mm. Konstruktérem a **výlučným** vlastníkem této technologie je Ing. Antonín Marčák, který byl schopen vyvinout tento generátor neobvyklé konstrukce za velmi ztížených podmínek a posunul tak úroveň zplynovacích generátorů v ČR (příloha č. 1.).

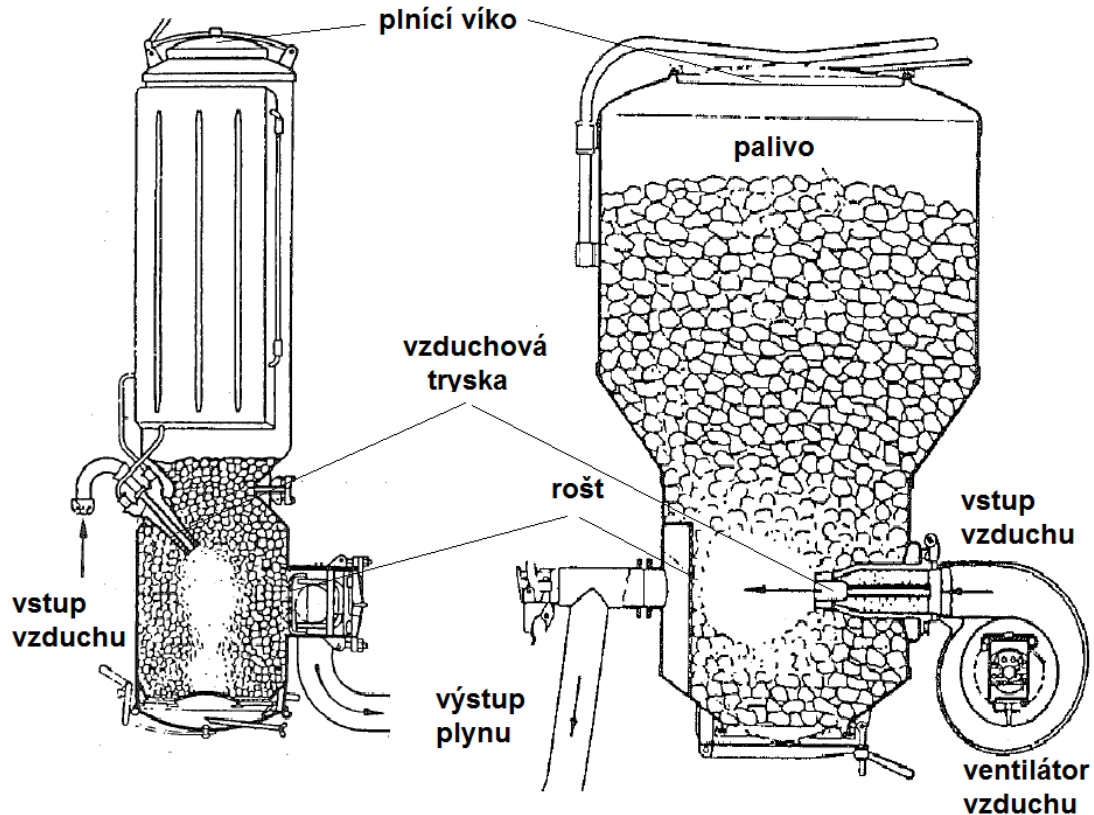


Obrázek 2.3 Spodový generátor²²

### 2.2.5 Generátory s křížovým ložem „cross draft“

Původní využití bylo pro zplyňování uhlí. V oblasti oxidace se vyznačuje vyšší teplotou (až 1500 °C), což klade vyšší nároky na kvalitu materiálu použitého na výrobu součástí v blízkosti žhavého jádra (rošt, vzduchová tryska, plášť generátoru). Nevýhodou je nízký rozklad dehtu a vysoké nároky na kvalitu paliva. Výhoda tohoto systému spočívá v jednoduchém čištění plynu a nízké ekonomické náročnosti. Čistící trasa, tvořená pouze cyklonem a horkým tkaninovým filtrem, může být připojena přímo k spalovacímu motoru. Použití je omezeno malým rozsahem výkonů¹⁶. Během II. Světové války byl tento typ rozšířen zejména v zemích s dostatkem dřeva, kde se jako paliva pro křížové generátory užívalo dřevěné uhlí vyráběné v karbonizačních pecích či později v reortách nebo se jako paliva využíval antracit či polokoks⁶. Generátory s křížovým ložem vyráběly firmy jako Mercedes-Benz či francouzské Gazomatic, Gohin-Poulenc, Scintex a Dux. Za zmínku stojí i

Československý generátor s křížovým ložem Kogen<sup>20</sup>. Různé konstrukce křížových generátorů ukazuje obrázek 2.4.

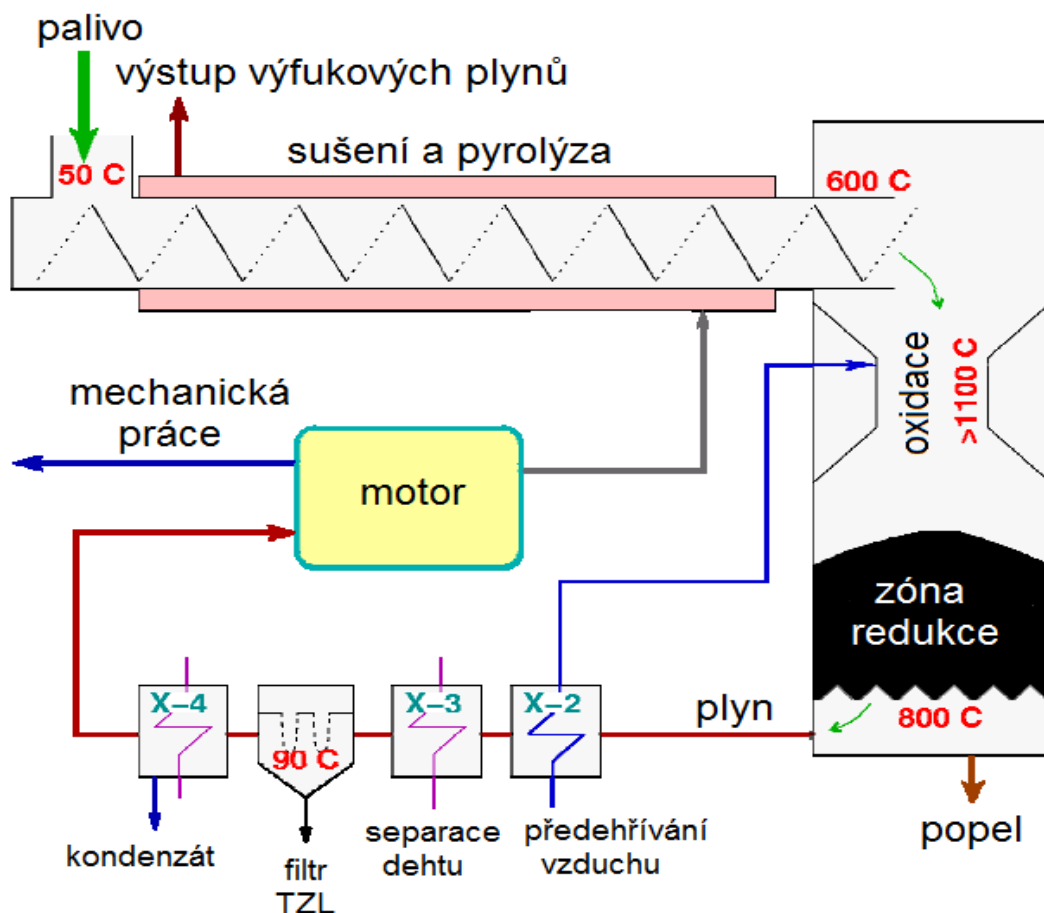


Obrázek 2.4 Různé konstrukce křížového generátoru<sup>17</sup>

### 2.2.6 Dvoustupňový generátor „two stage gasifier“

Z hlediska historického vývoje se jedná o nejmladší typ generátoru, jehož základním principem je oddělení sušící a pyrolýzní zóny od zóny oxidace a redukce. Schéma dvoustupňového generátoru je na obrázku 2.5. Z předsušeného paliva je v pyrolýzní komoře oddělena prchavá hořlavina pomocí tepla výfukových plynů nebo tepla plynu vystupujícího z generátoru. Uhlíkatý zbytek a prchavá hořlavina jsou přiváděny do oxidačního pásma, kde jsou spalovány. Produkty spalování jsou dále vedeny redukční zónou, podobně jako u souproutého generátoru. Dvoustupňové generátory se vyznačují nízkým obsahem dehtu ve výstupním plynu  $< 20 \text{ mg/m}^3$ <sup>31</sup> a poměrně vysokou výhřevností která se pohybuje okolo  $6,2 \text{ MJ/ m}^3$ <sup>31</sup>.





Obrázek 2.5 Dvoustupňový generátor<sup>30</sup>

### 2.2.7 Generátory s fluidní vrstvou

Tato technologie byla původně používána pro zplyňování uhlí. Pro zplyňování biomasy se začala používat z důvodů předcházení provozním problémům, které se objevovaly u generátorů s pevným roštem. Rošt nebo podobná zařízení různých konstrukcí, která slouží k ustálení redukčního pásma v určitém místě generátoru se v literatuře souhrnně označují jako pevné lože. Do kategorie generátorů s pevným ložem se řadí hlavně souprůdý, protiprůdý a vrstevnatý generátor či jejich variace. Mezi problémy generátorů s pevným ložem patří tvorba výrazně chladnějších a teplejších oblastí, tvorba klenby v reaktoru, omezení velikosti a nevhodnost použití drceného paliva. Fluidní generátor je naplněn pevným materiálem, který je vlivem vhnání zplyňovacího média o dostatečné rychlosti udržován v turbulentním pohybu. Tento stav se nazývá fluidizace<sup>2</sup>. Pevné částice se vlivem plynu chovají jako kapalina. Jako pevný materiál v loži se používá převážně křemenný písek nebo jiný katalyticky aktivní materiál. Probíhající procesy nelze rozdělit do čtyř oblastí jako u předchozích. Procesy probíhají najednou v celém objemu reaktoru a rychle dojde k jejich promísení. Lože je rovnoměrně vyhříváno a po dosažení optimálně vysoké teploty jsou částice paliva zavedeny dolní částí do reaktoru<sub>2</sub>. Podle granulometrie paliva se určuje pracovní režim reaktoru. Zplyňování probíhá velmi rychle. Ve

výsledném plynu je vždy určité množství dehtu a prachových částí, které je možné čistit v cyklonu a horkém keramickém filtru. Přibližně čtvrtina paliva, zajišťující průběh reakcí shoří a zbytek se zplyní. Výhodou fluidního lože je snadnější změna poměru zplynovacího média a paliva. Regulace teploty lože je tedy lehčí. Teplota ve fluidní vrstvě bývá téměř konstantní. Se vzrůstající teplotou zplyňování se zvyšuje kvalita plynu, roste obsah  $H_2$ , snižuje se množství dehtů,  $CO_2$ , obsah  $CH_4$  se nemění nebo klesá. Množství  $CO$  záleží na reakčních podmínkách. Obvyklé pracovní teploty jsou v rozmezí 800 až 900 °C. Velice důležitou vlastností tohoto generátoru je také možnost zpracovat různé druhy paliv, jelikož je v praxi velmi obtížně (až nemožné) zajistit přísun paliva s konstantními vlastnostmi<sup>8</sup>. Generátory pracující s fluidní vrstvou paliva se v praxi používají pro velmi rozmanitá paliva často i nerostlinného původu či různé směsi paliv. Využití těchto generátorů spočívá hlavně ve výrobě syntézního plynu pro chemický průmysl a pro výrobu plynu, který je určen pro výrobu elektrické energie po spálení ve spalovacím motoru nebo turbíně. Aplikace ve vozidlech je zatím mimo technické a ekonomické možnosti.

### 2.3 Filtrace a chlazení generátorového plynu

V případě že je plyn používán pro aplikaci v hořáku, lze bez problémů využít protiproudý generátor a není zpravidla zapotřebí žádného čištění plynu. Vysoký obsah dehtu v tomto případě nevádí. V případě, že se generátorový plyn přivádí do spalovacího motoru, musí být použit generátor s nižším obsahem dehtu ve výstupním plynu, následně musí být plyn vyčištěn a tepelně stabilizován před tím, než se přivede do motoru. Plyn vznikající ze souproudeho generátoru má vysokou teplotu (až 900°C)<sup>11</sup> a obsahuje popel a dřevouhelný prach. Tyto tuhé znečišťující látky (TZL) spolu s dehtem mohou tvořit až 1 % váhy plynu. Pokud tyto materiály nejsou řádně odstraněny, mohou způsobit zanášení motoru, snížení jeho životnosti a snížení jeho provozní spolehlivosti<sup>15</sup>. V praxi existují dva základní přístupy ke snižování obsahu dehtu a TZL – primární a sekundární opatření. Primární opatření jsou metody týkající se samotného procesu zplyňování, které se uplatňují přímo v generátoru a jsou to např.: vhodné teploty zplyňování, vlhkost paliva, konstrukční úpravy generátoru atd. Sekundárním opatřením je rozuměno použití návazných technologií, které snižují obsah dehtu a TZL v již vyrobeném plynu, například cyklóny, filtry, mokré vypírky (skrubry) a jiné<sup>1</sup>. Tepelnou stabilizaci (chlazení) plynu se rozumí snížení teploty plynu a její udržení v určitém rozsahu bez ohledu na množství odebíraného plynu z generátoru. Teplota plynu vcházejícího do spalovacího motoru má významný vliv na jeho funkci. Za optimální teplotu plynu vstupujícího do dřevoplynového motoru se považuje 20-30 °C<sup>24</sup>. Někteří provozovatelé dřevoplynových jednotek pro výrobu elektrické energie používali a používají od 80 – 100 °C. Například již odstavená instalace firmy Tůma v Pořešíně.

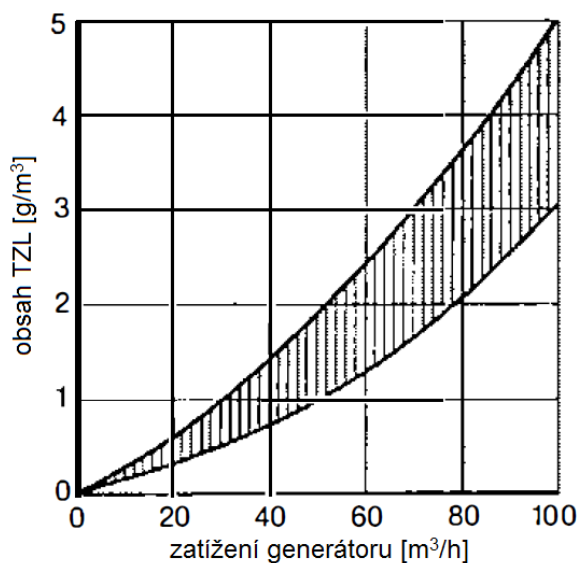
V této práci budou uvedeny pouze filtrační a chladicí technologie vhodné pro použití u malých zplynovacích jednotek.

### 2.3.1 Nežádoucí látky v plynu

Jedním z největších problémů souvisejících s výrobou a spalováním dřevoplynu je bezesporu obsah nežádoucích látek, který zatím brání širšímu rozšíření této technologie a má zásadní vliv na spolehlivost na funkci spalovacích motorů.

#### Tuhé znečišťující látky (TZL)

Obsah tuhých látek v produkovaném plynu tvoří hlavně nereagovaná biomasa ve formě zuhelnatělého materiálu, tzv. nedopal. Nedopal je obvykle ve formě dřevouhelného prachu nebo malých úlomků dřevěného uhlí, který je unášen proudem produkovaného plynu. Plynem je rovněž unášena druhá složka – popel. Maximální přípustné množství TZL obsažené v plynu se pohybuje okolo  $100 \text{ mg/m}^3$ , avšak pro bezporuchový provoz motorů se doporučuje hodnota  $50 \text{ mg/m}^3$  a méně. Závislost obsahu TZL ve výstupním plynu na množství produkovaného plynu ukazuje obrázek 2.6.



Obrázek 2.6 Závislost obsahu TZL ve výstupním plynu<sup>15</sup>

#### Dehty

Problematika dehtu je jednou z nejzávažnějších a nejvíce sledovaných oblastí zplyňování biomasy, a to z několika důvodů. Dehet je jednoznačně nežádoucí složkou plynu ztěžující jeho další použití<sup>11</sup>. Dehet představuje pestrou směs organických látek se složením závislým na typu zařízení a podmínkách jeho provozu<sup>11</sup>. Všeobecně pod pojmem dehet rozumíme směs organických látek kondenzujících při ochlazení plynu na okolní teplotu, existují však různé definice. Např. to jsou "organické látky kondenzující při pokojové teplotě na kovovém

povrchu", nebo je to "suma látek s bodem varu za normálního tlaku vyšším než 150°C", nebo jsou to "všechny organické látky s bodem varu vyšším než benzen" (80,1°C)<sup>11</sup>. Vzhledem k tomu, že dehet obsahuje velice rozmanitou směs látek, pro snadnou charakteristiku jeho vlastností používáme několik rozdělení. Nejjednodušší rozdělení je podle stupně transformace, kdy jednotlivé kategorie dehtu mají podobné fyzikálně chemické vlastnosti<sup>27</sup>.

- Primární dehet – obsahuje přímé produkty pyrolýzy, vzniká nejvíce při 500 °C, při teplotách okolo 800 °C je jeho vznik minimální. Hlavním zdrojem je prchavá hořlavina, jedná se o termicky nestálý dehet, který při vyšší teplotě přechází na dehet sekundární<sup>27</sup>. Primární dehet obsahuje bezprostřední produkty pyrolýzy základních složek biomasy: fragmenty holocelulosity a ligninu, kyseliny, aldehydy, alkoholy, furany, furfuraly. Celkový počet složek přesahuje několik stovek<sup>11</sup>. Typickým producentem primárního dehtu je protiproudý generátor, v jehož výstupním plynu je primární dehet obsažen ve značném množství.
- Sekundární dehet – vzniká v rozmezí teplot 500–1000 °C, maximum jeho koncentrace je při 750 °C, kdy se začíná přetvářet v dehet terciární<sup>27</sup>. Sekundární dehet je charakterizován stabilnějšími fenoly a olefiny<sup>11</sup>. Jejich obsah v plynu je nižší a při působení vyšších teplot i tyto látky podléhají další transformaci a štěpení za vzniku terciárního dehtu<sup>11</sup>.
- Terciární dehet – vzniká při teplotách nad 650 °C (max. 900 °C), s rostoucí molekulovou hmotností obsah jednotlivých složek dehtu klesá, avšak jejich stabilita je daleko vyšší<sup>27</sup>. Terciární dehet je reprezentován benzenem, alkylaromáty a polyaromatickými uhlovodíky. Benzen a alkylaromáty jsou někdy označovány jako lehce štěpitelný terciární dehet, polyaromatické uhlovodíky jsou pak označovány za těžce štěpitelný terciární dehet. Tento typ dehtu je zpravidla produkován souproudými generátory<sup>11</sup>. S rostoucí molekulovou hmotností obsah jednotlivých složek v terciárním dehtu klesá<sup>11</sup>. Teplota také ovlivňuje množství dehtu a s rostoucí teplotou obsah dehtu v plynu značně klesá, což je často využíváno u termického štěpení dehtu, avšak jeho termická stabilita prudce roste, což způsobuje značné potíže při jeho úplném odstraňování<sup>11</sup>.

### **Voda**

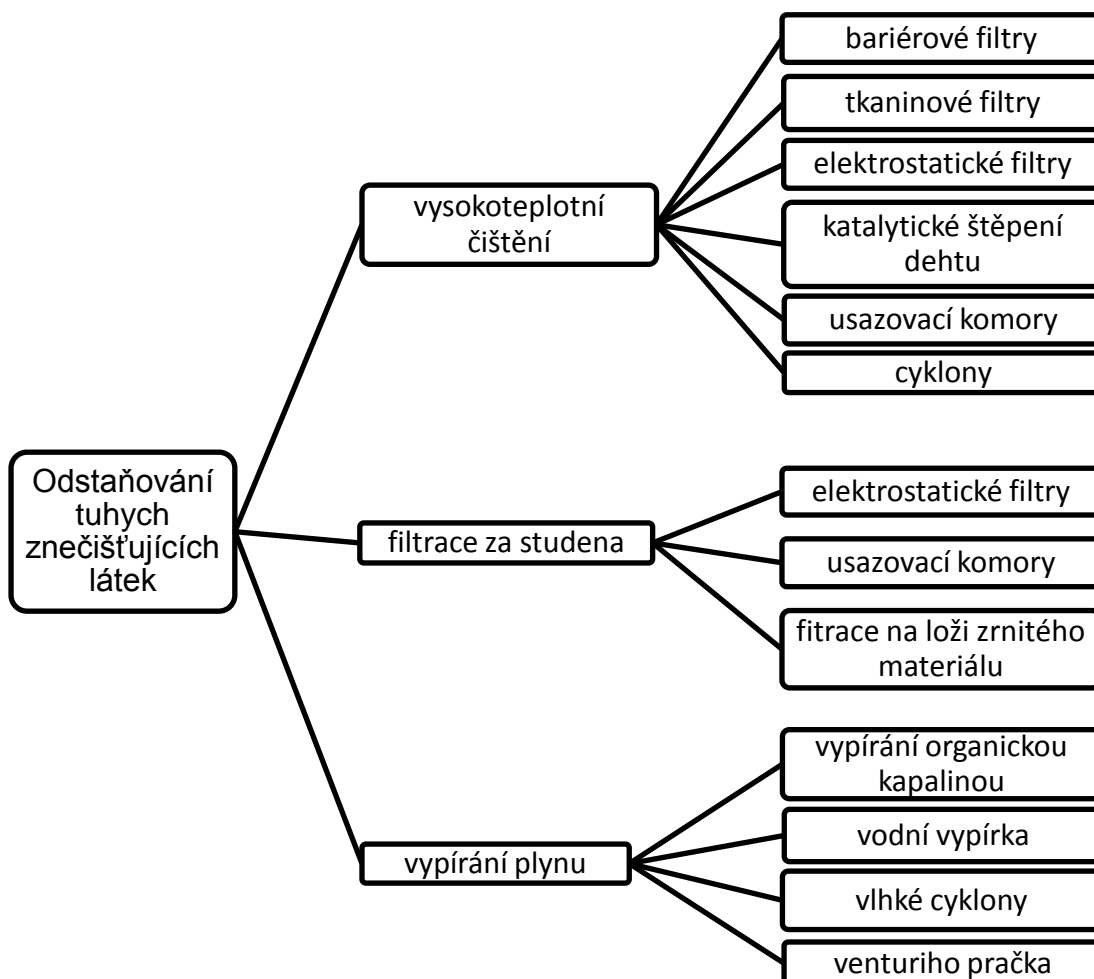
Vlhkost obsažená v palivu přechází v podobě páry i do výstupního plynu. Při zchlazování plynu se v nejnižších místech soustavy kumuluje vodní kondenzát, který je nutno odstraňovat a likvidovat. Vodní kondenzát obsahuje i určité množství zkondenzovaného dehtu, z tohoto důvodu je likvidace kondenzátu problematická.

## Sírné sloučeniny

Sírné sloučeniny obvykle nezpůsobují problémy při výrobě a spalování dřevoplynu. Jejich obsah je při zplynování biomasy velmi nízký, ale může se zvýšit při použití paliva s velkým podílem kůry. Sírné sloučeniny působí korozivně na zplynovací zařízení.

### 2.3.2 Možnosti odstraňování dehtu a TZL

Pro snižování obsahu dehtu a TZL v plynu se využívá množství různých metod, které se v praxi často doplňují a prolínají v závislosti na požadovaných vlastnostech plynu, technologických možnostech a ekonomické náročnosti zařízení. Stručný přehled metod je uveden v obrázku 2.7. Jednotlivé metody jsou v textu podrobněji popsány.



Obrázek 2.7 Zjednodušené schéma používaných metod pro odstraňování dehtu a TZL (autor).

### 2.3.3 Vysokoteplotní čištění plynu

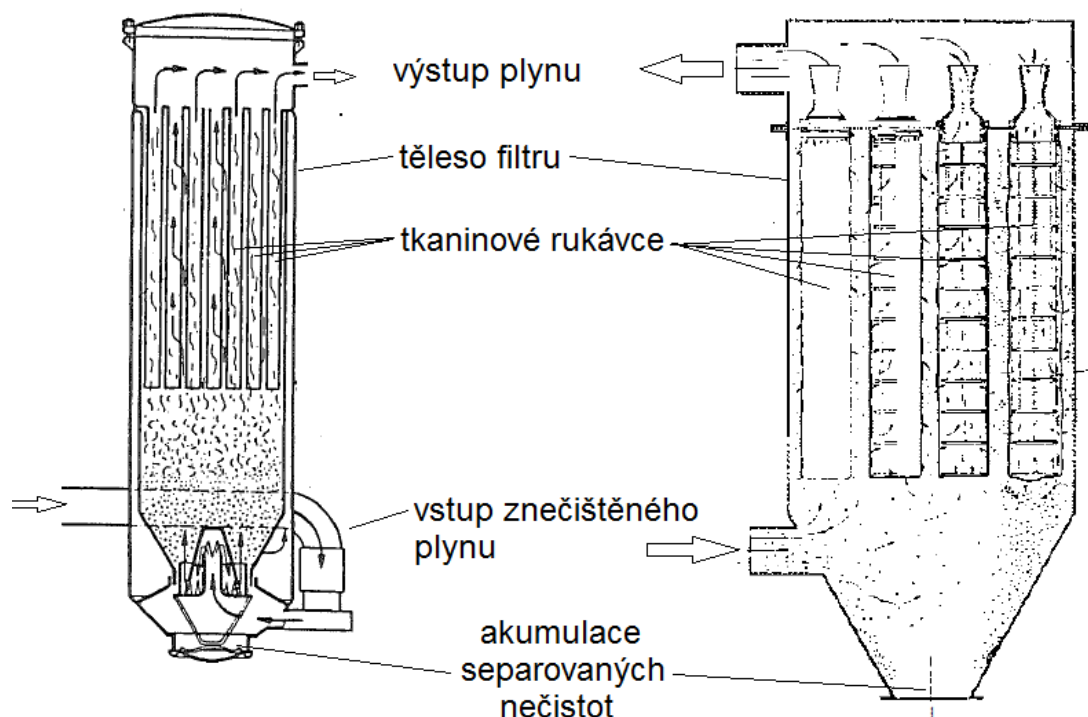
Základním principem vysokoteplotní úpravy je zamezení kondenzace dehtu a vodní páry, která může způsobit zalepování filtrů a slepování prachu. Provozní teplota se u těchto způsobů čištění pohybuje od 200 do 1000 °C<sup>5</sup>. Tato metoda následně umožňuje využití tepla z plynu při procesu chlazení plynu například pro pyrolýzní procesy u dvoustupňového generátoru.

#### Bariérové filtry

Podstatou funkce bariérového filtru je separace prachových částic z plynu na porézní podložce prostupné pro plyn. Velikost zachycených částic a účinnost filtrace závisí u bariérových filtrů na velikosti pórů, která se obvykle pohybuje v rozmezí 0,5 až 100 μm<sup>11</sup>. Na filtru jsou zachycovány všechny částice o průměru větším než je velikost pórů filtru, s klesající velikostí pórů však narůstá tlaková ztráta úměrná rychlosti proudění plynu. Praktická realizace může být provedena několika způsoby, k nejčastějším patří pevné keramické filtry nebo sintrované metalické filtry. U keramických filtrů je však nutno dávat pozor na přítomnost alkálií v plynu, jejich reakce s materiálem filtru za vzniku tavenin může vést až k jejich úplné destrukci. Jelikož biomasa obsahuje značné množství alkálií (dle druhu až 0,3 % hm.) přecházejících při zplyňování do plynné fáze, není použití těchto filtrů za teplot vyšších než cca 650 °C bezpečné. K jejich dalším nedostatkům patří nízká odolnost vůči teplotním výkyvům, křehkost, vysoká cena a problémy se zanášením kanálek. Sintrované metalické filtry jsou odolnější vůči vysoké teplotě a přítomnosti alkalických kovů, ale dosud nedosáhly většího rozšíření při čištění plynů ze zplyňování biomasy<sup>11</sup>. Tyto filtry se pro účely úpravy plynu pro pohon pracovních strojů příliš nehodí pro jejich vysokou cenu a křehkost, která vylučuje otřesy filtru.

#### Tkaninové filtry

Filtry založené na principu filtrace TZL na vrstvě tkaniny nabízejí poměrně levnou alternativu k bariérovým filtrům z keramických materiálů. Pracují na stejném principu s rozdílem pouze v použitém filtračním materiálu, který tvoří filtrační textilie vhodná pro provoz za zvýšených teplot. Typická konstrukce tkaninového filtru je znázorněna na obrázku 2.8. Plyn vstupuje do tělesa filtru ve spodní části, stoupá vzhůru, a prochází skrz soustavu tkaninových rukávců, které mají tvar svíček. Základ každého rukávce tvoří drátěná nebo pružinová kostra, na kterou je natažen rukávec. Pevné částice jsou při průchodu zachyceny na povrchu rukávce. Přefiltrovaný plyn opouští těleso filtru v jeho horní části. Filtry s tkaninovými rukávci mají při použití v mobilních zařízeních nesporné výhody oproti keramickým filtrům. Odpadá totiž odstraňování nánosů filtračního koláče z povrchu rukávců, jejichž kostra je z pružného materiálu a umožňuje přenášet a zesilovat vibrace (vibrace motoru, nerovnost terénu apod.), čímž dochází k samovolnému střísnání nashromážděného popela a prachu z povrchu rukávců.



Obrázek 2.8 Konstrukce tkaninového filtru<sup>15,17</sup>

Z této vlastnosti vyplývá i odolnost vůči vibracím a otřesům. Další výhodou je i podstatně nižší cena, možnost oprav, praní a podobně. Účinnost a životnost rukávcevého filtru závisí na několika faktorech. Prvním je provozní teplota filtru, která by měla zabraňovat kondenzaci vody a dehtu na povrchu rukávce a zároveň nepřekračuje oblast termické stability zvoleného filtračního materiálu. Dalším faktorem je výběr filtračního materiálu a jeho filtrační vlastnosti. Nejčastější filtrační materiály ukazuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Vlastnosti některých materiálů použitelných pro tkaninové filtry<sup>15</sup>

materiál	max. provozní teplota[°C]		složení	Odolnost proti			cena
	krátkodobě	dlouhodobě		opotřebení	Organické kyseliny	alkálie	
bavlna	82	107	celulóza	dobrá	dobrá	dobrá	nízká
vlna	93	120	bílkoviny	dobrá	střední	slabá	nízká
Nylon	93	120	polyamid	výborná	střední	dobrá	vyšší
Orlon	115	135	polyakrylonitril	dobrá	dobrá	střední	vyšší
Dakron	135	162	polyester	výborná	dobrá	dobrá	vyšší
Polypropylen	93	120	polypropylen	výborná	výborná	výborná	nízká
Nomex	218	260	polyamid	výborná	výborná	dobrá	vyšší
Skelné vlákno	280	315	sklo	slabá	výborná	slabá	nízká
Teflon	220	260	materiál	Střední	výborná	výborná	vyšší

## **Elektrostatické filtry**

Principem činnosti elektrostatických filtrů je využití přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi prachu a opačně nabitou sběrací elektrodou<sup>32</sup>. Nabití částic se dosahuje v elektrostatickém poli elektrostatického filtru, kde jako přenašeč náboje fungují ionty ionizovaného plynu<sup>32</sup>. Podstatou každého elektrostatického filtru je sběrací elektroda o relativně velké ploše a nabíjecí (sršící) elektroda o malé ploše, na níž je vloženo stejnosměrné napětí opačné polarity. Čím vyšší je napětí na elektrodách (55-75 kV), tím vyšší je účinnost odlučovače. Nabíjecí elektrody jsou tenké dráty různého průřezu<sup>32</sup>. Sběrací elektrody mohou mít různý tvar (profil) podle konstrukce a použití odlučovače, nejčastěji jsou to různě tvarované desky nebo trubky. Odstraňování odloučeného prachu se děje nejčastěji oklepáváním elektrod pomocí kladiv, umístěných v odlučovači. Výhodou elektrostatických filtrů je malá tlaková ztráta, která bývá 20 - 100 Pa, a vysoká účinnost<sup>32</sup>. Pro čištění plynu určeného pro pohon pracovních strojů se zatím nepoužívají.

### **2.3.4 Filtrace za studena a mokré vypírání plynu**

#### **Usazovací komory**

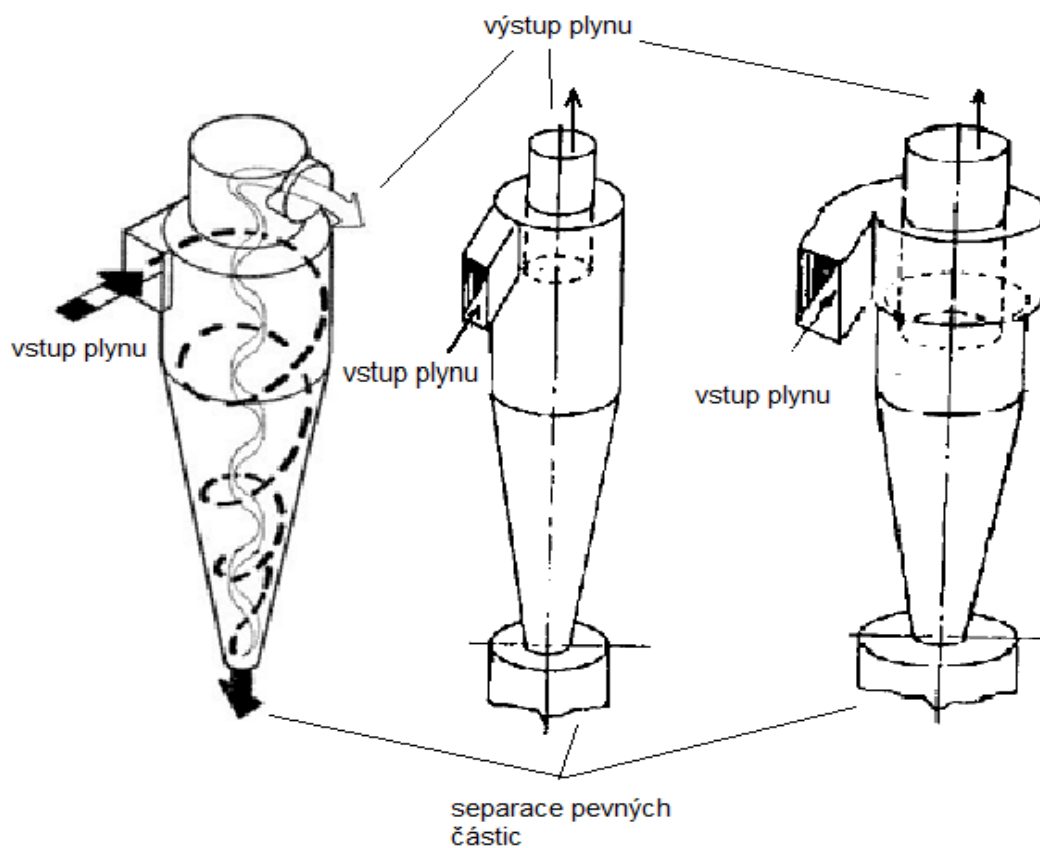
Usazovací komory jsou nejjednodušším typem mechanického odlučovače částic vůbec a v současné době se používají jen zřídka, zejména pro velké rozměry jejich komor. Princip funkce spočívá v rozšíření profilu potrubí a tím snížení rychlosti plynu, které umožní usazení částic na dně komory. Pro mobilní aplikace se nepoužívá.

#### **Cyklony**

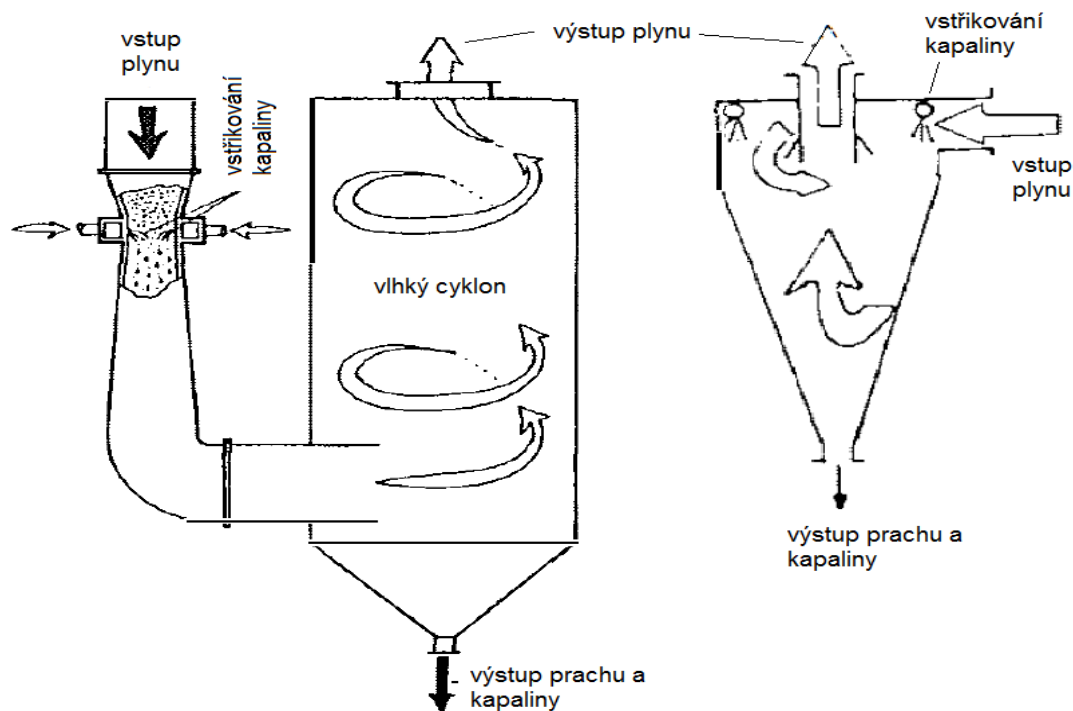
Cyklony patří k nejčastěji používaným odlučovačům odstraňujícím prach. U fluidních generátorů jsou primárním zařízením používaným k odstraňování prachových částic a v případě generátorů s cirkulující fluidní vrstvou jsou jejich nedílnou součástí. Hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce, nízká tlaková ztráta a použitelnost i při vysokých teplotách. Účinnost odstraňování částic prachu je úměrná rychlosti vstupujícího plynu a nepřímo úměrná průměru cyklonu, pro vyšší účinnost odstranění prachu se v praxi používá spojení více cyklonů menšího průměru. Účinnost odlučování prachu v daném cyklonu je závislá na velikosti částic a jejich vlastnostech jako jsou hustota a tvar. Stoprocentní odlučivost může být dosaženo u částic větších než 40  $\mu\text{m}$ , u částic o velikosti pod 0,5  $\mu\text{m}$  klesá odlučivost na nulovou hodnotu. U dokonalejších cyklonů lze u i částic o velikosti 10-20  $\mu\text{m}$  dosáhnout stoprocentní odlučivosti<sup>11</sup>. Účinnost multicyklonů může dosáhnout hodnoty 100 % u prachových částic o velikosti 5  $\mu\text{m}$ , avšak pro odstranění submikronových částic je nutno použít efektivnější zařízení. Konstrukci cyklonu ukazuje obrázek 2.9 (příloha č. 3). Jednou z možností zvýšení účinnosti cyklonového odprašovače je využití smáčecí kapaliny, obvykle vody. Kapalina může



být vstříkována do proudu plynu vstupujícího do cyklonu, vlivem odstředivé síly pak vytvoří kompaktní rotující vrstvu kapaliny na vnitřní stěně pláště. Suché znečišťující částice obsažené v plynu jsou, stejně jako kapalina odstředivou silou vrženy na vnitřní stěnu cyklonu kde kontaktem s kapalinou podstatně zvýší svou hmotnost a jsou unášeny s kapalinou do spodní části cyklonu. Konstrukce mokrého cyklonu je zřejmá z obrázku 2.10.



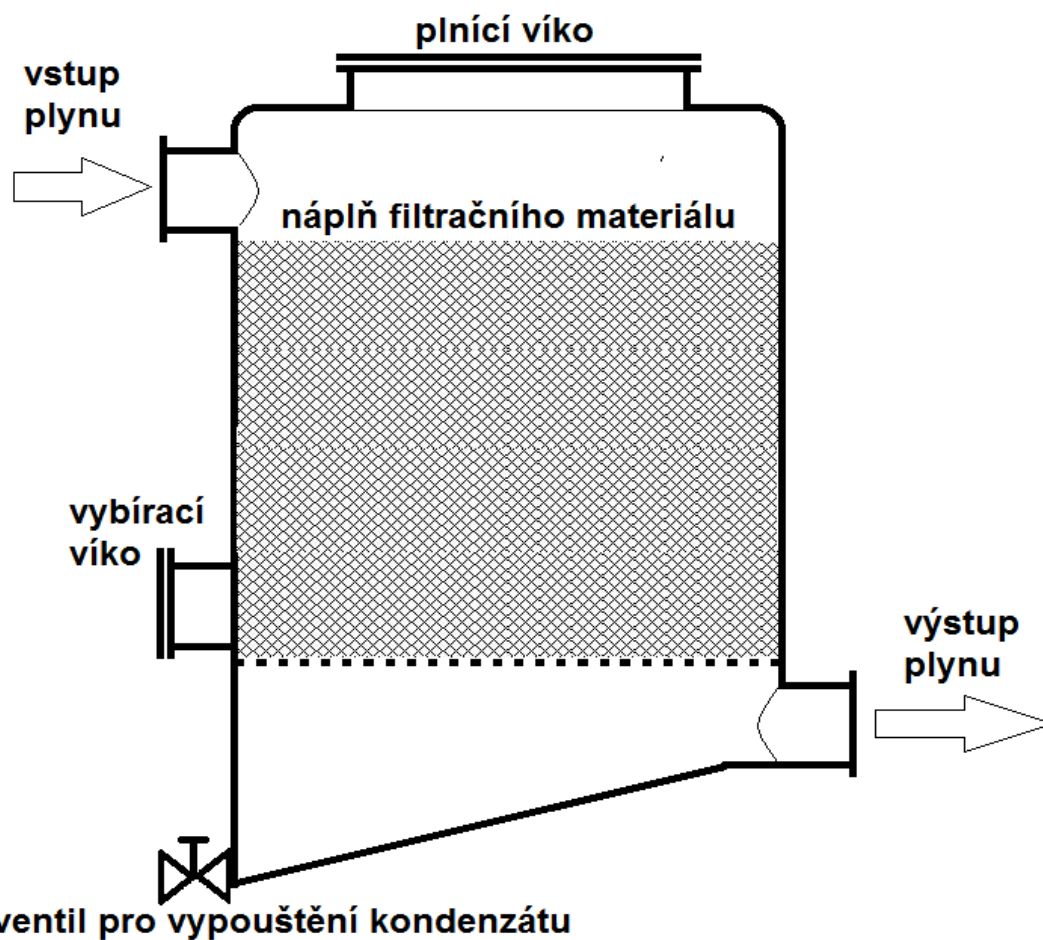
Obrázek 2.9 Konstrukce cyklonu<sup>15</sup>



Obrázek 2.10 Konstrukce mokrého cyklonu<sup>15</sup>

### Filtrace na loži zrnitého materiálu

Filtry, u kterých zachycování prachových částic probíhá na loži zrnitého materiálu, nemají nedostatky zmíněné u filtrů s pevnou porézní membránou a maximální pracovní teplota je limitována pouze vlastnostmi zrnitého materiálu<sup>11</sup>. Pro průmyslové využití se používá nejčastěji písek o různé zrnitosti, který lze snadno regenerovat. U zařízení produkující plyn pro pracovní stroje a vozidla byl tento způsob filtrace velice rozšířen hlavně pro dobrou účinnost odstraňování dehtu i prachu, snadnou výměnu filtračního materiálu a nízkou cenu filtračního materiálu. U mobilních aplikací se používá filtrační materiál na rostlinné bázi na rozdíl od průmyslových filtrů. V praxi lze použít celou škálu filtračních rostlinných materiálů od dřevěného uhlí, přes hobliny až po seno, slámu či šišky jehličnatých stromů (příloha č. 2.). Výhodou rostlinných filtračních materiálů a zejména pak dřevěného uhlí je schopnost do určité míry absorbovat dehet a poměrně silně ho na sebe vázat, což znemožňuje jejich regeneraci. Likvidace použitého filtračního materiálu se provádí téměř výhradně spalováním za vysokých teplot a předpokladu dostatečného snížení jeho vlhkosti. Kromě dehtu na sebe rostlinný materiál váže i vodu, která se v plynu vyskytuje ve formě vodní páry. Konstrukce filtrů určených pro použití v mobilních aplikacích je velmi jednoduchá. Většinou se jedná o utěsněný prostor, ve kterém je soustředěna filtrační hmota tak aby plyn byl nucen procházet filtrační vrstvou rovnoměrně. Jednoduchý filtr znázorňuje obrázek 2.11.



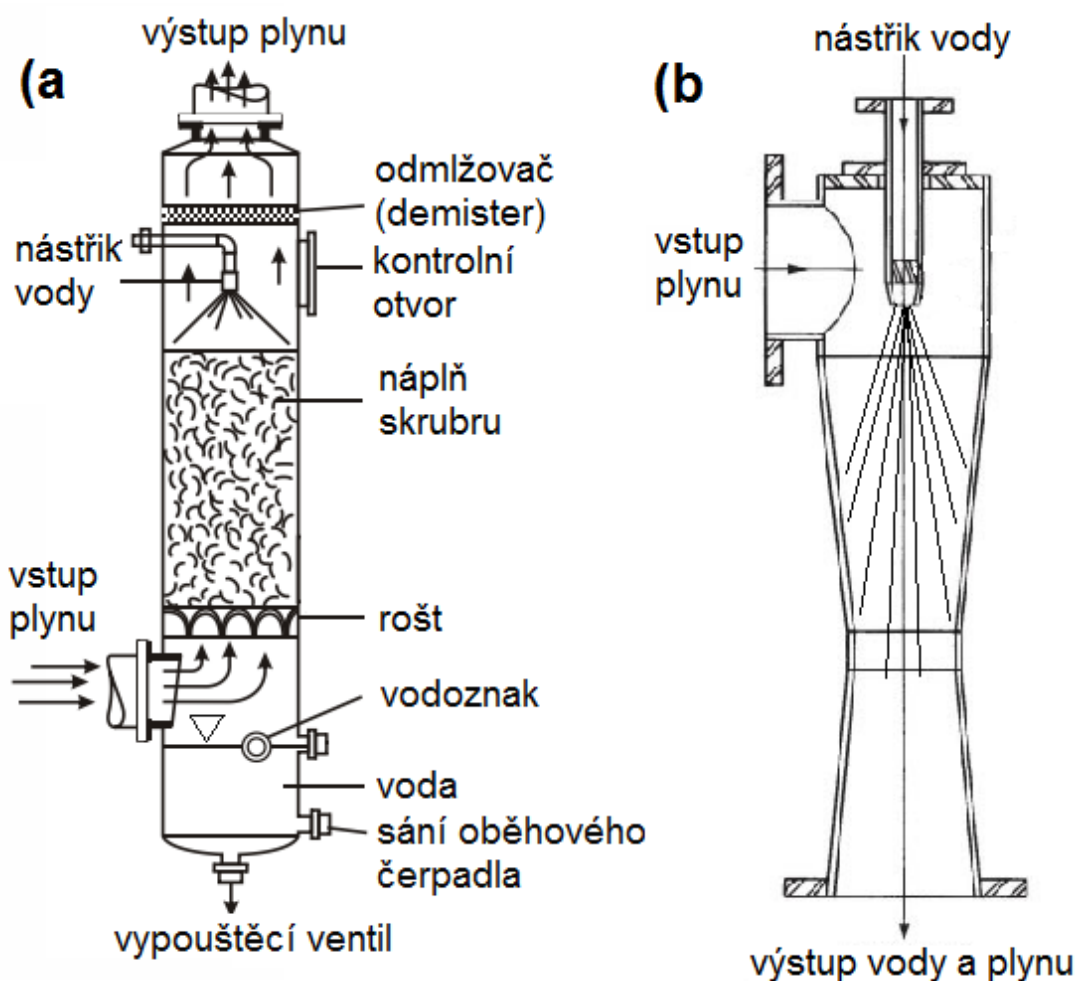
Obrázek 2.11 Jednoduchý filtr s vrstvou filtračního materiálu (autor).

Filtrace plynu na loži rostlinného materiálu je nejužívanější způsob filtrace u malých zařízení určených pro pohon pracovních strojů.

### Vodní vypírka

Možností jak snížit obsah dehtu a TZL v plynu je použití vodní vypírky. Principem odstraňování TZL je smáčení pevných částic. Částice jsou následně unášeny vodou do jímacího prostoru. Odstraňování dehtu je realizováno převážně kondenzací dehtu a následným strháváním kapiček dehtu vodou. Běžně používané komerčně dostupné systémy využívají přímý nástřik vody do plynu. Ve sprchovací koloně se plyn nejen ochlazuje na teplotu potřebnou pro kondenzaci dehtu, ale hlavně se vzniklé kapičky dehtu a zbytky prachových částic zachycují na kapičkách vody, čímž se zvyšuje jejich hmotnost a nastává jejich odlučování<sup>11</sup>. Rozpustnost většiny složek dehtu ve vodě je nízká. Rozměry kapiček aerosolu se pohybují typicky v rozsahu 0,1 až 2  $\mu\text{m}^{33}$ . Je zřejmé, že pomocí daného procesu lze z plynu odloučit jenom tu ve vodě nerozpustnou část dehtu, která má rosný bod vyšší, než je teplota procesu a zbytkový obsah dehtu bude v ideálním případě při odstranění všech aerosolů závislý pouze na procesní teplotě. Jelikož je celková účinnost ovlivněna účinností odstraňování aerosolu, bude i účinnost celého procesu úzce souviset s vlastnostmi dehtu. Nevýhodou procesů založených na kondenzaci je bezesporu produkce vody

znečištěné toxickými organickými látkami. U velkých zařízení jsou voda a nebezpečné odpady dále zpracovávány, avšak u malých zařízení může být použití vodní vypírky problematickou záležitostí, a to jak z hlediska nižší účinnosti odlučování, tak zejména kvůli finanční náročnosti a ekologickým problémům spojeným s likvidací nebezpečných kapalných a pevných odpadů<sup>11</sup>. Výhodou vodní vypírky je relativně nízká cena prací kapaliny<sup>33</sup> (příloha č. 4). V praxi existuje mnoho různých typů vodních vypírek a jejich vzájemných kombinací. (Obrázek 2.12 (a) zobrazuje skrubr, (b) venturiho pračku). Principem skrubru je smáčení porézní filtrační náplně kterou protéká voda čímž se podstatně zvětšuje plocha na které probíhá kondenzace. Venturiho pračka využívá pro zvětšení kondenzační plochy velmi malých kapiček, které jsou utvářeny vhodnou rozprašovací tryskou. Po nástřiku vody a zkondenzování dehtu je nutné z plynu odstranit jemnou vodní mlhu, kterou plyn unáší. V praxi se využívá zachycení kapiček a jejich následná kumulace na vrstvě kovového materiálu. Pro průmyslové aplikace k tomuto účelu slouží speciální drobné kovové odlitky. Pro využití u pracovních strojů se výborně osvědčily plynulé kovové třísky obvykle z nerezových materiálů, které svým charakterem mohou připomínat „drátěnku“



Obrázek 2.12 (a – Skrubr, (b – Venturiho pračka<sup>32</sup>).

## Vypírka organickou kapalinou

Většina složek dehtu je v organické prací kapalině plně rozpustná (pokud je tato vhodně zvolena). Schopnost organických kapalin jímat dehet je proto vysoká<sup>33</sup>. Odstraňování dehtu pomocí organické kapaliny je založeno především na difuzi, a proto je nutno použít účinný výměník (skrubr). Stejně jako u vodní vypírky musí být plyn ochlazen. Jeho výstupní teplota by ovšem neměla poklesnout pod 75 až 80°C, aby prací kapalina nebyla znehodnocena kondenzující vodou a aby nebyly kondenzací vody narušeny tepelné a hmotnostní toky ve skrubru. Výhodou organické vypírky je vysoká účinnost a schopnost snížit rosný bod dehtu hluboko pod teplotu vypírky. Dalšími pozitivními skutečnostmi jsou prakticky bezodpadové hospodářství v případě regenerace organické kapaliny a možnost využít teplo plynu při chlazení prací kapaliny. Nevýhodou vypírání plynu organickou kapalinou je především vysoká cena prací kapaliny, kterou je nutno kvůli odpařování neustále doplňovat<sup>33</sup>. Nejčastěji používanou organickou kapalinou pro účely vypírání plynu je v současnosti metylester řepkového oleje (MEŘO).

## 2.4 Tvorba směsi pro spalovací motory

Jednou z důležitých součástí transformace chemické energie dřeva na mechanickou práci je efektivní spálení vyrobeného plynu ve spalovacím motoru. Dřevoplyn je velmi specifické palivo, které má proti ostatním běžně používaným palivům své odlišnosti, hlavně z pohledu výhřevnosti a směšovacího poměru. Viz tabulka 2.2.

Tabulka 2.2 Vybrané vlastnosti plynných paliv<sup>24</sup>

	dřevoplyn	zemní plyn (metan)	propan
výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	3,5 ÷ 6,5	35,8	92,7
obj. směš. poměr se vzduchem [1]	1:1 ÷ 1:2	1: 9,53	1: 23,8
metanové číslo [1]*	52 ÷ 65	100	30
hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1,0 ÷ 1,2	0,71	1,94

\* Metanové číslo je ukazatelem antidetonační schopnosti paliva a je ekvivalentem oktanového čísla u kapalných paliv. Vysokou odolnost proti klepání má metan, kterému podle úmluvy bylo určeno metanové číslo  $MN_{CH_4} = 100$  a jako plynné palivo s nulovou odolností proti klepání byl určen vodík s  $MN_{H_2} = 0$ . Metanová čísla ostatních plynných paliv se stanovují standardní metodikou, založenou na srovnávání intenzity klepání vyšetřovaného paliva se směsným palivem ( $CH_4 + H_2$ ) na zkušebním jednoválcovém motoru<sup>25</sup>. Tabulka 2.3 znázorňuje porovnání odolnosti vůči klepání metanu a běžných paliv. Odolnost vůči klepání je vyjádřena oktanovým číslem.

Tabulka 2.3 Antidetonační schopnost některých paliv<sup>26</sup>

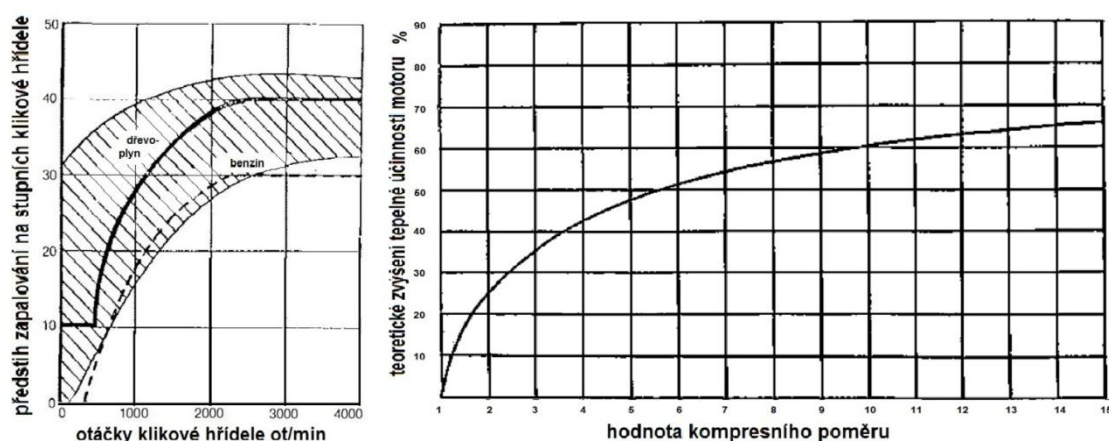
Palivo	Oktanové číslo
Benzín BA 95	95
LPG (propan-butan)	přibližně 100
Dřevoplyn	110-120
CNG (zemní plyn)	130
Etanol	120

Metanové číslo plynného paliva je určeno součtem metanových čísel jednotlivých hořlavých složek v plynu redukovaných podle objemových podílů jednotlivých hořlavých složek na celkovém obsahu hořlavín v plynu a jeho hodnota se zvyšuje přítomností inertních plynů CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> v palivu<sup>25</sup>. Vyšší koncentrace inertních plynů v dřevoplynu ale představuje riziko pro kvalitní průběh spalování (zvyšuje se možnost neúplného vyhoření náplně válce i nedokonalého hoření s důsledky na emisní vlastnosti plynového motoru)<sup>25</sup>. Relativně vysoké metanové číslo u dřevoplynu je sice výhodou z hlediska odolnosti proti klepání ve válci motoru, velký podíl inertních plynů, které zvyšují metanové číslo ale poněkud znehodnocuje toto palivo z hlediska kvalitního průběhu spalování. Prodlužuje se celková doba hoření, snižuje se chemická účinnost<sup>25</sup> a vysoký podíl N<sub>2</sub> podstatně snižuje výhřevnost plynu. Tabulka 2.4 znázorňuje hodnoty výhřevností běžně používaných paliv. Poměrně vysoká antidetonační schopnost dřevoplynu dovoluje využít kompresních poměrů 10:1 až 12:1<sup>27</sup>, ale v provozu může nastat silné kolísání kvality plynu způsobené tvorbou kanálů a zkratových proudů v generátoru nebo nestejnorodým palivem. Spolu s poklesem kvality výstupního plynu klesá i jeho antidetonační schopnost, v některých případech tedy může docházet ke klepání i u motoru, který je pro dřevoplyn naladěn<sup>27</sup>.

Tabulka 2.4 Výhřevnost některých paliv. Zdroj: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>

Palivo	[MJ/kg]
Měrné palivo	29,31
Lehký topný olej	42,30
Dřevo palivové 15 % vlhkost	14,62
Dřevěné brikety	16,21
dřevoplyn	5,8
Hnědé uhlí tříděné - Most	17,18
Hnědé uhlí tříděné - Sokolov	14,17
Černé uhlí energetické - Ostrava	29,21
Komunální odpad	9,12
Papír	14,11
Motorová nafta	42,61
Autobenzín	43,59

V souvislosti s delší dobou hoření dřevoplynové směsi se vzduchem je nutné zvýšit hodnotu předstihu motoru. Zvýšení oproti benzinovému palivu se pohybuje okolo 20 %, nelze však tuto hodnotu paušalizovat, obvykle je nutné pro každý motor nastavit předstih zapalování individuálně podle chodu motoru. Skutečné zvýšení se pohybuje okolo 5-15° na klikové hřídeli oproti pohonu na benzin<sup>15</sup>. Obrázek 2.13 (a znázorňuje přibližný průběh hodnot předstihu u benzinového paliva a dřevoplynu. Obrázek 2.13 (b znázorňuje vztah účinnosti motoru a jeho kompresního poměru.

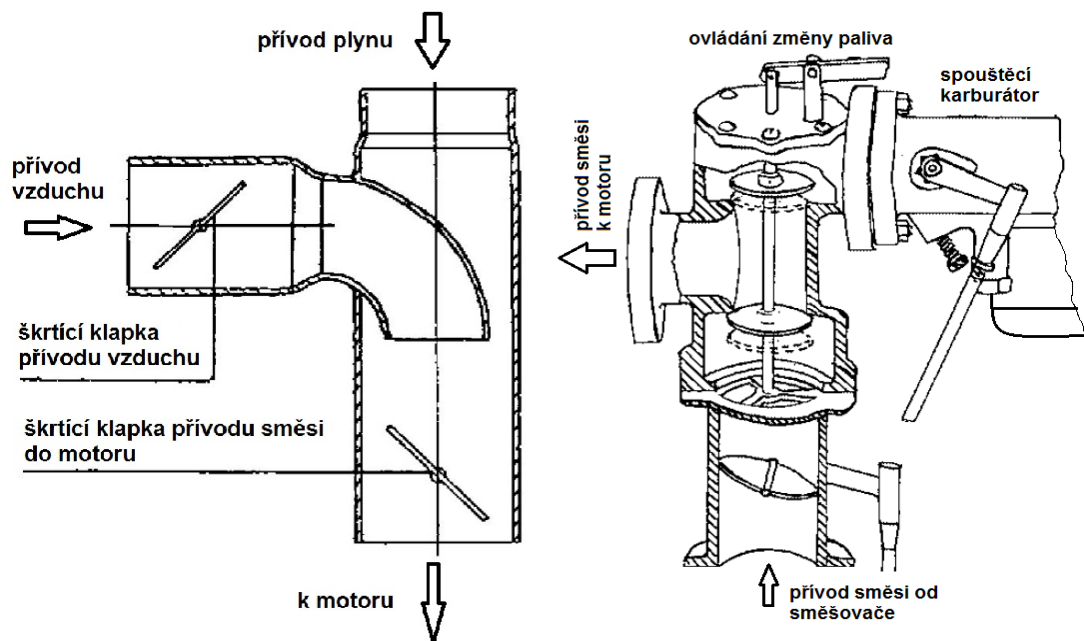


Obrázek 2.13 (a - Hodnoty předstihu pro benzin a dřevoplyn, (b – vztah účinnosti a kompresního poměru<sup>15</sup>.



## 2.4.1 Směšovač

Stechiometrický poměr u běžného dřevoplynu se pohybuje okolo 1:1 až 1:1.2<sup>24</sup>, jedná se tedy o plyn chudý. V porovnání se zemním plynem nebo propan-butanem je nutno do motoru přivést podstatně větší objemové množství dřevoplynu, který je po celou dobu od výroby až do spálení nestlačený. Proto se konstrukce generátorového zařízení, hlavně z hlediska průtočných průřezů, značně liší od zařízení na zemní plyn či propan. Stejně tak se liší i směšovač dřevoplynu se vzduchem, který má větší průtočné průměry a jednodušší konstrukci, která je znázorněna na obrázku 2.14 (příloha č. 5 a 6.).

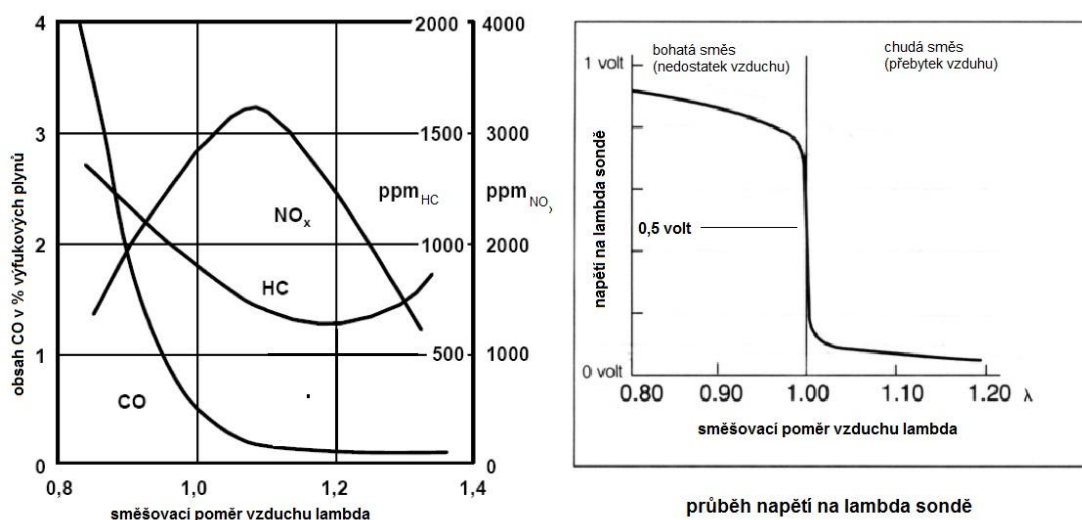


Obrázek 2.14 Konstrukce jednoduchých směšovačů<sup>15,23</sup>

Většina konstrukcí dřevoplynových směšovačů reguluje bohatost směsi škrcením přívodu vzduchu. Motory určené pro dvě paliva mohou být opatřeny rozvodným ventilem pro přepínání kapalného a plynného paliva. Způsoby zapojení a konstrukce mohou být velmi rozličné v závislosti na konkrétní aplikaci a na konkrétních požadavcích. Jednoduché směšovače slouží pro pohon výhradně dřevoplynem, při použití více paliv např. benzin, LPG, zemní plyn, musejí směšovače zohledňovat větší rozsah funkcí. Při pohonu motoru dřevoplynem je velmi důležité udržovat stále stejný směšovací poměr vzduchu a dřevoplynu ve všech provozních režimech motoru. Regulaci bohatosti směsi provádíme obvykle automaticky na základě výstupního napětí z lambda sondy umístěné ve výfukovém potrubí. Lambda sonda je měřicí čidlo, umístěné na výfukovém potrubí v těsné blízkosti motoru<sup>5</sup>. Podle obsahu zbytkového množství kyslíku ve výfukových plynech předává lambda sonda odpovídající napěťový signál řídicí jednotce pro ovládání škrťací klapky přívodu vzduchu. Závislost napětí lambda sondy a směšovacího poměru znázorňuje



obrázek 2.15. Řídící jednotka porovná skutečnou hodnotu napětí s předepsanou či nastavenou hodnotou  $\lambda=1$  (zhruba 500 mV)<sup>5</sup>. Pokud je obsah zbytkového (chemicky nevázaného) kyslíku ve výfukových plynech nízký (bohatá směs), je napětí sondy 800-900 mV. Řídící jednotka rozezná bohatou směs ( $\lambda < 1$ ) a pootevře škrtící klapku vzduchu, čímž se sníží bohatost směsi. Pokud je obsah volného kyslíku ve výfukových plynech příliš velký, směs je chudá ( $\lambda > 1$ ) tak je napětí podstatně nižší, 30 – 100 mV. Řídící jednotka proto začne přivírat škrtící klapku vzduchu do té doby kdy napětí na lambda sondě odpovídá nastavené hodnotě v řídicí jednotce<sup>5</sup>. Tyto regulační cykly se v krátkých intervalech opakují a umožňují dosáhnout klidného chodu motoru a příznivých hodnot obsahu škodlivin ve výfukových plynech. Hodnota napětí ( $\lambda = 1$ ) nemusí být u všech motorů stejná a je nutno jí nastavit podle daných podmínek provozu. Obsah hlavních složek ve výfukových plynech ukazuje obrázek 2.15.



Obrázek 2.15 Obsah hlavních složek výfukových plynů a napětí na lambda sondě v závislosti na směšovací poměru<sup>5</sup>.

## 2.5 Požadavky na palivo pro generátory

Generátory pro výrobu dřevoplynu jsou velmi specifická zařízení a mají zvýšené nároky na charakter a kvalitu použitého paliva oproti běžnému spalování např. v kotlích pro výrobu tepla. Jako palivo pro výrobu dřevoplynu slouží dřevní hmota, která musí splňovat parametry pro vybraný typ zplynovacího zařízení zejména velikost částic, obsah příměsí a vlhkost (tabulka 2.5). Pro pohon pracovních strojů lze zatím uvažovat jen sesuvný souprůdý generátor pro svou jednoduchost a provozní spolehlivost bez nutnosti náročné obsluhy a řízení zplynovacího procesu díky jeho autoregulační schopnosti.

Tabulka 2.5 Požadavky na kvalitu paliva pro jednotlivé typy generátorů<sup>1</sup>

Parametr	Typ generátoru		
	sesuvný protiproudý	sesuvný souproudý	fluidní
Velikost částic, [mm]	5–100	20–100	1–100
Vlhkost, [hm. %]	< 50	15–20	< 40
Popel, [hm. %]	< 15	< 5	< 20
Sypná hmotnost, [kg/m <sup>3</sup> ]	> 400	> 500	> 100
Teplota tavitelnosti popela, [°C]	> 1000	> 1250	> 1000

Mezi hlavní nevýhody použití souproudých generátorů patří především vysoké nároky na velikost, rozměry paliva a nízkou vlhkost paliva. Jako palivo prvních generátorů sloužilo dřevo v podobě uniformních kusů. U současných generátorů typu downdraft (Imbert) je doporučováno palivo větších a jednotných rozměrů. Není-li tato podmínka splněna, hrozí především vznik klenby, eventuálně vznik kanálů, což jsou hlavní provozní problémy, které mohou způsobit snížení kvality vzniklého plynu, nebo také poškození samotného generátoru. Vlhkost paliva by u tohoto typu generátoru neměla překročit 20 % hm. Při vyšších hodnotách vlhkosti v palivu je potřeba více tepla pro její odpaření, čímž se snižuje teplota v oxidační a redukční zóně. Následkem je zvýšení koncentrace dehtu ve výstupním plynu<sup>2</sup>.

Nároky souproudého generátoru na kvalitu štěpky se značně liší od požadavků na kvalitu štěpky pro „pouhé“ spálení např. ve výtopnách, teplárnách, kotelnách a lokálních topidlech, kde jsou požadavky na obsah nečistot, vlhkost a velikost částic podstatně nižší. Moderní spalovací zařízení ve větších výtopnách a kotelnách dokáže zpracovat i velmi nekvalitní štěpku s vysokým obsahem vlhkosti a příměsí, často i nahnilou a silně napadenou plísněmi. Souproudý generátor dokáže vyrobit kvalitní plyn s nízkým podílem dehtů jen z kvalitního a suchého paliva. V těchto generátorech nelze zpracovávat nekvalitní štěpku bez následku na kvalitě výstupního plynu a účinnosti celého procesu. Pro zplynování méně kvalitního dřeva byly vyvinuty odlišné technologie přesahující rámec této práce.

Charakter materiálu pro výrobu dřevní štěpky může být velice rozmanitý a závisí převážně na možnostech uživatele pracovního stroje. Zdrojem materiálu pro výrobu paliva pro generátory mohou být:

- prořezané větve z okrajů obhospodařovaných pozemků a souvisejících cest,

- odpad z lesní těžby a z činností související s údržbou krajiny a lesních pozemků,
- odpad vzniklý při zpracování dřeva (odkory, odřezky, odštěpky),
- odpad související s údržbou zahrad (prořezané větve, poražené stromy),
- dřevní odpad vzniklý při údržbě obce a obecního majetku,
- odpadní dřevo z demoličních prací,
- použitý a jinak neupotřebitelný nábytek (mimo dřevotřískového apod.),
- odpad z tesařských a souvisejících prací,

V závislosti na zdroji se kvalita štěpky (potažmo vhodnost pro souproudé generátory) může lišit.

## 2.6 Stroje pro výrobu generátorového paliva

Z hlediska požadavků na velikost převažující frakce dřevní štěpky je nutno volit vyhovující technologii výroby štěpky s ohledem na potřebné množství a následující technologii sušení a skladování. V praxi se využívá několik způsobů výroby dřevní štěpky pro různé využití a v různém množství. Pro účely občasného pohonu jednoho či dvou pracovních strojů můžeme uvažovat množství štěpky v objemu do 100 m<sup>3</sup> za rok. Tomuto množství bude odpovídat i výběr technologie za předpokladu že štěpka bude využívána pouze pro účely zplynování v souproudých generátorech pracovních strojů. Za obecné nároky na dřevní štěpku používanou pro výrobu kvalitního plynu v souproudých generátorech lze považovat vlhkost do 20 %, převažující frakce štěpky s velikostí částic od 20 do 50 mm, nízký obsah příměsí (zemina, jehličí, listí, kaménky) a nízký obsah nedostatečně oddělených slabých výhonků a vláken delších než 100 mm, které mohou v generátoru vytvářet nežádoucí klenby. Na základě těchto požadavků je vhodné používat jen stroje dobře seřízené a naostřené, které zaručují dostřih i velmi slabých výhonků a vláken. Méně vhodné jsou diskové stroje pro příliš drobný charakter výstupní štěpky. Další nevýhodou může představovat mechanizované vkládání materiálu do stroje hydraulickým ramenem opatřeným svěrným drapákem (Příloha č. 7.). Při tomto způsobu vkládání může snadno dojít k nežádoucímu znečištění štěpky hlínou, kamením či odpadky, obsluha hydraulického ramene může při vkládání velmi snadno přehlédnout nežádoucí příměsí. Naopak při ručním vkládání může obsluha stroje snadno eliminovat nežádoucí příměsí tříděním vstupního materiálu. Největší riziko nežádoucích příměsí hrozí při zpracování hromad klestu po lesní těžbě nahromaděných vyvážecími soupravami.

### 2.6.1 Diskový (kolový) štěpkovač

Jsou co do počtu nejrozšířenějšími zařízeními na výrobu štěpky. Mobilní diskové štěpkovače byly vyvinuty ze stacionárních řezaček, na kterých byly provedeny úpravy<sup>3</sup>. Štěpkovacím ústrojím je disk o průměru 1 až 2 m s 2 až 16 noži. Na rotující disk se pod úhlem přisunuje dřevní materiál, který je noži štěpkován, přičemž si disk přitahuje materiál sám. Biomasa může být přiváděna kolmo k rovině disku, je však

třeba štěpkovač opatřit podávacím zařízením, které nedovolí vertikální ani horizontální pohyb. Diskové štěpkovače se vyznačují jemností vyráběné štěpky, schopností štěpkovat kmeny až do průměru 0,5 m při přijatelných rozměrech stroje, možností použít pro pohon stroje spalovací motor díky velkému setrvačnému momentu disku, a schopností pracovat bez zvláštního ventilátoru (metače)<sup>4</sup>. Využití těchto strojů pro výrobu dřevní štěpky určené pro zplynování je spíše okrajové pro nevhodnost rozměrů výstupní štěpky, která zpravidla nepřesahuje 20 mm a při další manipulaci se dále rozmělnjuje. Tato nevýhoda je způsobena konstrukcí disku a zejména pak způsobem upevnění nožů (příloha č. 8).

### 2.6.2 Bubnové štěpkovače

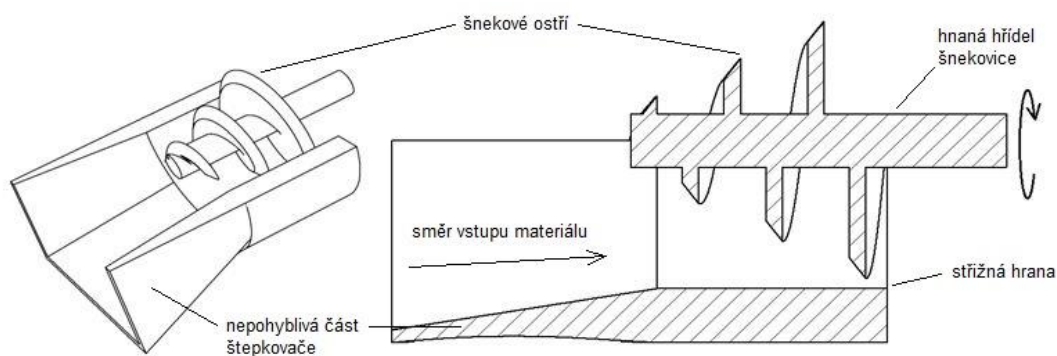
Na rozdíl od diskových jsou sekací nože bubnových štěpkovačů uloženy na obvodu rotujícího bubnu. Obvykle jsou vybaveny podávacím pásem a vkládacími válci pro transport hmoty k bubnu s břity (noži). Vkládací pás je tvořen řetězovým nebo jiným dopravníkovým systémem. Vkládací válce jsou opatřeny hroty, obvykle speciálně tvarovanými, aby umožňovaly dokonalé posouvání i nesourodého materiálu. Horní podávací válec je pohyblivě uchycen, což umožňuje přizpůsobení velikosti otvoru různým velikostem štěpkovaného materiálu při zachování schopnosti materiál posouvat dále k rotoru. Některé moderní stroje mohou být vybaveny nastavitelným spodním podávacím stolem, jenž lze vertikálně posouvat v závislosti na vstupním materiálu (nehomogenní klest nebo homogenní kmenové dříví). Po obvodu bubnu (rotoru) jsou pevně připevněny břity (obrázek 2.16), jež jsou často horizontálně děleny na více jednotlivých břitů. Bubnovým sekacím zařízením jsou vybaveny štěpkovače o vyšších výkonnostech s teoretickou výkonností pohybující se na hranici 200 m<sup>3</sup>/hod. Jsou umísťovány na robustní samostatné podvozky, na podvozky nákladních automobilů nebo vyvážecích souprav. Umožňují štěpkování do průměru až 900 mm měkkého dřeva a zhruba 700 mm tvrdého dřeva<sup>3</sup>. Pro účely zplynování se jeví jako vhodné řešení co do rozměrů štěpky pokud je délka řezání nastavena na nejvyšší hodnotu.



Obrázek 2.16 Pracovní buben štěpkovače a bubnový štěpkovač (foto autor)

### 2.6.3 Šnekové štěpkovače

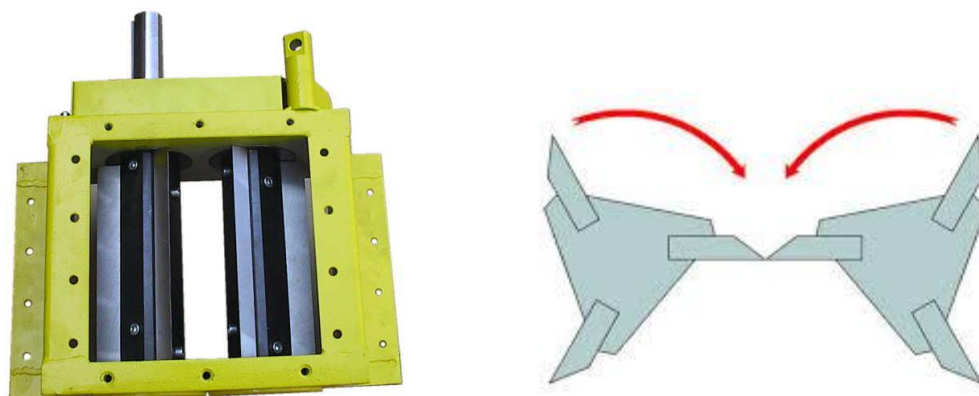
Štěpkovače využívající rotační spirálovité ostří ve tvaru kužele se používají pro práci s menším objemem zpracovávaného materiálu, cca do 10 m<sup>3</sup>/hod (příloha č. 9). U tohoto typu štěpkovače je dřevní hmota vtahována a krájena rotačním spirálovým ostřím (obrázek 2.17 a příloha č. 10). Jejich značnou výhodou z pohledu výroby štěpky pro zplynování je jednoduchá konstrukce a charakter výstupní štěpky, která svou hrubostí odpovídá požadavkům souproutých zplynovačů. Obvyklá délka štěpky se pohybuje okolo 4 až 6 cm v závislosti na stoupání šroubovice, délku štěpky z tohoto důvodu je možno měnit pouze výměnou šnekovice s jiným stoupáním. Částečné zmenšení rozměrů štěpky je možné zajistit použitím šnekovice s proměnlivým stoupáním, které se zvětšuje společně s průměrem šnekovice. Postupným zvětšováním rozestupu jednotlivých závitů ostří dochází v komoře k dělení materiálu i ve směru vláken. U takto zpracovaného materiálu dochází k rychlejšímu vysychání. Jednoduchá konstrukce stroje vyplývá z absence vkládacího zařízení, které plně nahrazuje vtahovací efekt šnekového ostří. Vkládání materiálu do stroje se provádí zpravidla ručně.



Obrázek 2.17 Schéma šnekového štěpkovače (autor).

### 2.6.4 Štěpkovače s protiběžným ostřím („ROJEK“)

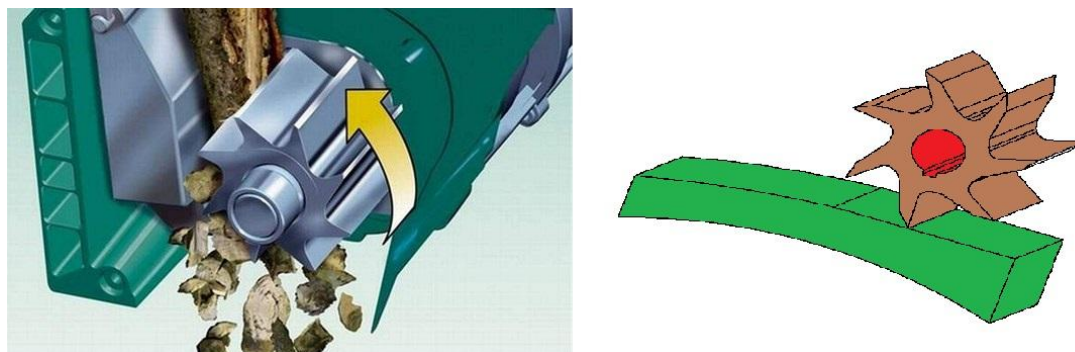
Dalším systémem používaným při zpracování biomasy na dřevní štěpku jsou dvě protiběžné hřídele opatřené trojicemi nebo čtveřicemi protiběžných ostří (obrázek 2.18). Pohon obou hřídelů je spřažen ozubenými koly o stejném počtu zubů. Materiál procházející strojem, je vtahován a zároveň dělen dvojicí nožů, není tedy třeba dodatečného vkládacího ústrojí. Délku štěpky není možno měnit a je zcela závislá na počtu nožů a rozteči hřídelů. Délka se obvykle pohybuje okolo 3 až 8 centimetrů. Z hlediska výkonnosti se tyto stroje hodí zejména pro menší objemy zpracovávaného materiálu, větší stroje jsou schopny zpracovat kulatinu až do průměru 10 centimetrů s výkonností zhruba 10 m<sup>3</sup>/hod. Vkládání materiálu do stroje se provádí zpravidla ručně.



Obrázek 2.18 Fotografie a schéma systému „ROJEK“ (propagační materiály firmy ROJEK)

### 21.6.5 Jednohřídelový drtič

Tato konstrukce využívá obdobného principu jako systém „ROJEK“ pouze s tím rozdílem že je jeden z dvojice hřídelů nahrazen pasivní deskou z protioděrové oceli. Hřídel je osazena třemi nebo více noži podle požadavku na hrubost štěrky (Obrázek 2.19). Nastavením desky lze seřizovat vůli mezi hřídelem a deskou. Směr podávání materiálu je obvykle volen shora dolů nebo šikmo dolů protože vtahovací efekt nemusí být u různorodého materiálu vždy dostatečný. Konstrukce podobného charakteru se používají téměř výlučně pro štěpkování menšího množství materiálu zhruba do 4 m<sup>3</sup>/h a do průměru cca 45 mm. Vkládání materiálu je vždy ruční. Tato konstrukce je často užívána pro jednoduché zahradní drtiče větví.



Obrázek 2.19 Jednohřídelový drtič větví (propagační materiály firmy Bauhaus, autor)

### 2.6.7 Další možnosti výroby paliva pro generátory

Štěpkovače a podobná zařízení jsou poměrně složitá a přesné mechanismy vyžadující často náročnou údržbu a zdroj mechanické energie, tedy energetické zařízení které je poháněno. Mohou být poháněny vývodovým hřídelem traktoru, elektromotorem nebo jsou vybaveny vlastním spalovacím motorem. Tyto skutečnosti ve spojení s vysokými pořizovacími náklady nemusí vždy uspokojit



potřeby uživatele z hlediska výroby menšího množství štěpky (do 100 m<sup>3</sup>/rok). Další možností výroby štěpky jsou různé postupy ručního zpracování dřevní hmoty nebo za pomoci běžných dřevozpracujících strojů (okružní pila, jednomužná motorová pila) případně kombinace těchto postupů. V praxi se jedná převážně o nakrácení a rozštípání větších kusů. Dřevo je možné nakrátit na cca 5-8cm výřezy pilou a případné výřezy s průměrem větším než 5 cm rozštípat ručně sekerou na menší kusy (příloha č. 11). Pro krácení slabších větví je možné využít pouze sekeru. Tento způsob je znám z válečného a poválečného období a prosadil se zejména kvůli nedostatku vhodné mechanizace. I dnes je možné se setkat s tvrzeními ze dřevem poháněné stroje „jezdí výhradně na bukové špalíky“ (příloha č. 12). Ruční výroby paliva pro generátory (špalíků) se dnes využívá jen okrajově nebo v případě výpadku zásobování štěpkou z jakéhokoliv důvodu. Tímto způsobem je možné nouzově vyrobit vhodné palivo i v terénu („na cestě“) ze suchých větví, které se v okolí nalézají což je velká výhoda oproti konvenčním palivům, které „na cestě“ vyrobit nelze.

Další možností zpracování vhodného paliva jsou různé střížné děliče pracující na různých principech, např. rotační kráječe odkorů, různé nůžkové děliče a jiné.

## 2.7 Sušení dřevní štěpky

O generátorech pro výrobu dřevoplynu lze obecně říci, že jsou to velice citlivá zařízení na charakter vstupního materiálu. Různé konstrukce sice dovolují určitou „pružnost“ z hlediska parametrů vstupního materiálu ale zatím neexistuje zařízení, které by bylo schopno zplynovat jakýkoliv materiál. Vedle požadavku generátorů na hrubost dřevní štěpky se všemi aspekty je dalším klíčovým parametrem paliva jeho vlhkost. Pro většinu zplynovacích zařízení je limitní hranice vlhkosti štěpky 20 %. Palivo s vyšším obsahem nelze zpracovat v generátorech z důvodu zvýšení obsahu dehtu v plynu, což znamená problémy při následném zpracování plynu. Vlhkou dřevní hmotu je tedy nutno před samotným zplynováním sušit.

Metody sušení lze rozdělit do dvou skupin:

- Pasivní
- aktivní.

### 2.7.1 Pasivní způsob sušení





Jedná se určitě o nejstarší způsob odstraňování vlhkosti z dřevní hmoty. Přirozeně lze sušit materiál pod přístřeškem nebo lze použít voděodolnou či polopropustnou pokrývku. Nejjednodušší je palivo umístit na volném vzduchu nebo přímo na slunci. Voda se na povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu. Zdá se, že tento způsob sušení je ideální co se týká nákladů, ale při podrobnějším zkoumání zjistíme jisté hospodářské nevýhody. Hlavní nevýhodou přirozeného sušení je malá rychlost, což má za následek potřebu velkých skladovacích ploch a prostorů, které mohou být mnohdy finančně nákladné. Nárok na potřebu energie je téměř nulový,

zato rostou náklady na dopravu a manipulaci<sup>7</sup>. Dřevní štěpku možné sušit pasivně pouze pokud je dokonale chráněna před deštěm a za dostatečného přístupu vzduchu. Přístup vzduchu je nutný pro odvětrávání nasycených par z prostoru mezi jednotlivými kusy dřeva. Nechráněná nebo nedostatečně odvětraná štěpka velmi obtížně prosychá a objevují se v ní plísň již po velmi krátké době. Tvorba plísní s sebou nese závažné zdravotní riziko při následné manipulaci, kdy může dojít k vdechování spor plísní. Způsobů jak vhodně skladovat a současně snižovat procento vlhkosti přírodní cestou je několik.

### Sušení volně ložené štěpky

K tomuto způsobu sušení jsou obvykle použity zastřešené haly, přístřešky, nevyužité seníky nebo půdní prostory. Materiál je volně rozložen na podlaze do výšky zhruba 300 – 400 mm v závislosti na hrubosti štěpky a je obvykle nutno jej po čase přeházet ručně nebo nakladačem. Výška vrstvy štěpků musí být taková, aby nemohlo dojít k samovznícení tedy k nahromadění přílišného množství skupenského tepla. Způsob sušení volně ložené štěpky je velmi náročný na skladovací plochu a navíc často kvůli střešní či jiné konstrukci spojené se sušícími prostory, nelze využít energii slunečního svitu k urychlení sušení. Připojená tabulka 2.6 ukazuje, jakou rychlostí je možné pasivně sušit dřevo za různých podmínek skladování.

Tabulka 2.6 Změna absolutní vlhkosti štěpky v závislosti na délce a způsobu uskladnění<sup>5</sup>.

Měsíc	Typ skladování			
	otevřená	otevřená s podlahou	zakrytá	zakrytá s podlahou
				
absolutní vlhkost (%)				
0 (XII)	85	82	70	78
1 (I)	95	81	58	55
2 (II)	101	83	54	45
3 (III)	108	79	52	35
4 (IV)	101	66	46	28
5 (V)	84	37	39	20
6 (VI)	84	35	33	17
7 (VII)	68	29	30	17
8 (VIII)	62	39	20	17
9 (IX)	-	-	27	17



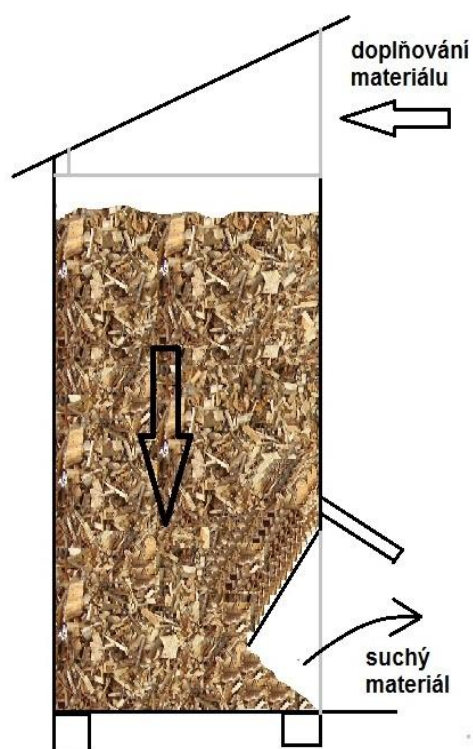
- Otevřené skladování - rozumí se uložení štěpky volně na zem bez jakéhokoliv zakrytí.
- Otevřené uložení s podlahou znamená skladování štěpky na vyvýšené betonové, dřevěné či jiné podlaze, která výrazně omezuje vzlínání půdní vlhkosti do uloženého materiálu, materiál není chráněn proti dešti.
- Zakrytý způsob znamená uložení dřeva přímo na zem se zakrytím proti dešti (střecha, plachta apod.).
- Zakrytí s podlahou je realizováno uložení dřeva na podlahu, která výrazně omezuje vzlínání půdní vlhkosti a zakrytím proti dešti (haly, sklady apod.)

### **Sušení v pytlích**

Tento způsob sušení je vhodný zejména pro menší množství štěpky, samozřejmě v závislosti na skladovacích prostorech. Oproti výše uvedenému způsobu lze podstatně lépe využít skladovací plochu s možností podstatného zvýšení vrstvy sušeného materiálu. Pytle lze vhodně skládat na sebe nebo jednotlivé vrstvy prokládat například paletami pro lepší přístup vzduchu. Značnou nevýhodou je pracnost při manipulaci s pytlí a pořizovací náklady pytlů. Další nevýhodou skladování – sušení v klasických bílých polypropylenových nebo polypropylenových rašlových pytlích je poměrně krátká životnost materiálu pytlů způsobená malou odolností polypropylenu vůči UV složkám slunečního záření. Modifikací tohoto způsobu sušení je skladování ve velkoobjemových polypropylenových vácích, které se běžně používají pro manipulaci např. s osivem, škrobem, hnojivy a materiály sypkého charakteru obecně. Velkoobjemové vaky je možno bez problémů manipulovat strojně. Pytle a vaky musí umožňovat alespoň částečné odvětrávání nasycených par ze sušeného materiálu. Toho lze dosáhnout výběrem vhodného materiálu pytlů nebo jejich úpravou pomocí rozžhaveného kovového bodce. Do pytlů je možné ukládat čerstvou štěpku s 50% vlhkostí a při vhodných skladovacích podmínkách je možné snížit její vlhkost na potřebnou úroveň již za 3-4 měsíce (v letním období).

### **Sušení ve speciálních konstrukcích**

Princip sušení v konstrukcích umožňuje poměrně rychle prosušit větší množství štěpky s možností kontinuálního provozu. Konstrukce jsou umístěny na přímém slunečním svitu, jsou shora plněny a ze spodu vybírány (obrázek 2.20 a příloha č. 13). Postupné propadávání materiálu konstrukcí zaručuje pohyb a provětrávání materiálu. Rychlost sušení můžeme zvýšit vhodnou konstrukcí a umístěním v daném terénu tak, aby byla co nejvíce vystavena slunečnímu záření či vystavena proudění větru. Pro stavbu konstrukce lze využít různé materiály.



Obrázek 2.20 Speciální konstrukce pro sušení štěpky (autor).

## 2.7.2 Aktivní sušení

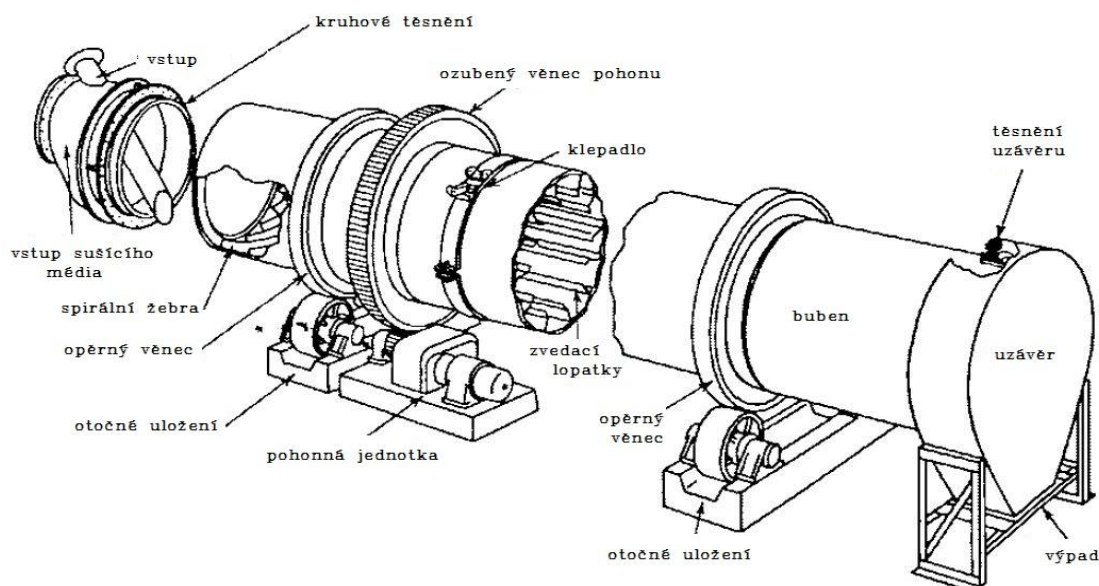
### Nucená ventilace

Nuceným větráním se rozumí vhánění nepředehřátého vzduchu z okolního prostředí do sušeného materiálu s cílem odstranit nasycené páry z prostoru mezi jednotlivými kusy dřeva a tímto urychlit proces sušení a omezit rozvoj plísní uvnitř štěpky. Vzduch se vhání do materiálu obvykle ze spodu prostřednictvím kanálů v podlaze skladu krytých roštem. Radiální ventilátor vhání vzduch do společného potrubí a následně do jednotlivých kanálů nebo je pro každý kanál přiřazen jeden ventilátor tak aby bylo možné vhánět vzduch jen na plochu skladu, která je zaplněna štěpkou. Nucené větrání pomocí ventilátorů je velice rozšířený způsob sušení štěpky a může mít mnoho variantních řešení konstrukce.

### Bubnová sušárna

Materiál prochází otáčejícím se bubnem, do kterého je spolu se sušeným materiálem vháněn horký vzduch nebo horké spaliny (obrázek 2.21). Buben sušárny je skloněn pod malým úhlem, z důvodu snazšího postupu sušeného materiálu, je umístěn mezi kladkami, což umožňuje jeho otáčení kolem osy. Otáčení způsobuje

přesýpání štěpky uvnitř bubny a zlepšuje tak prostup spalin sušeným materiálem, což zvyšuje účinnost sušícího procesu<sup>7</sup>. Bubnové sušárny se používají pro větší množství sušeného materiálu s důrazem na krátký čas sušení. Pro sušení materiálu určeného pro zplynování se často sdružuje do jednoho celku s bubnovou třídičkou, která separuje příliš drobné části, prach, piliny, zeminu a podobné. Jako zdroj tepla pro bubnovou sušárnu se používá zvláštní kotel nebo spaliny ze spalovacího motoru.



Obrázek 2.21 Bubnová sušárna<sup>15</sup>

Aktivních způsobů sušení dřevní hmoty je celá řada, ale obvykle jsou určeny pro větší objemy zpracovávaného materiálu nebo pro svou složitost a provozní náklady se nehodí pro účely sušení štěpky pro pohon strojů. V ČR se lze setkat s pásovými a fluidními sušárnami pro účely zplynování a následné výroby elektrické energie.

### 3. Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce bylo studium vhodnosti použití dřevoplynu pro pohon pracovních strojů, dřevoplynový pohon dřevozpracujících strojů v prvovýrobě a výroba mechanické energie prostřednictvím běžného spalovacího motoru ve spojení s jednoduchou zplynovací soupravou. V souladu s tímto cílem byly stanoveny následující klíčové kroky:

- Stanovit cenu mechanické energie získané zplynováním dřeva v porovnání s cenou mechanické energie získané spalováním konvenčního motorového paliva a s cenou mechanické energie získané v elektromotorech.
- Provéřit možnosti využití dřevoplynového pohonu v oblasti malovýroby palivového dřeva, dopravy na krátké vzdálenosti, manipulace s břemeny různého charakteru a pohon strojů zejména v oblasti těžby dřeva, údržby krajiny a činností souvisejících s drobnou hospodářskou činností na vesnicích a samotách.
- Provéřit možnosti přestaveb stávajících strojů a vozidel na dřevoplyn.
- Návrh jednoduchého zplynovacího zařízení
- Zhodnocení získaných výsledků

## 4. Praktická část

### 4.1 Výroba mechanické energie dřevoplynem

Hlavním parametrem spalovacích motorů z hlediska ekonomiky a ekologie provozu je míra účinnosti přeměny chemické energie obsažené v palivu na mechanickou práci. Nejvýznamnějším ukazatelem této účinnosti je měrná spotřeba paliva. Aby bylo možné ji stanovit, je nutné, aby byly dostatečně přesně měřeny výkonové parametry a spotřeba paliva motoru. K měření výkonových parametrů spalovacích motorů, výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách, se využívá celá řada metod. Z hlediska zatížení, lze rozdělit tyto metody na stacionární (statické) a dynamické. Obvykle se statickým zatížením spalovacího motoru rozumí takové zatížení, které umožní nastavení předvolených otáček, které jsou v průběhu snímání jednotlivých vstupů a výstupů z motoru konstantní. K udržování příslušného zatížení slouží celá řada motorových brzd. Dynamické metody jsou měřeny při dynamických režimech motoru, jako je urychlování a zpomalování jeho setrvačných hmot<sup>14</sup>. Jednou z možností jak uchopit a změřit výrobu mechanické energie pomocí dřevoplynu je statická zkouška, která pro měření mechanické energie využívá elektrickou energii. Spalovací motor je připojen na elektrický generátor a energie vyrobená v generátoru je následně mařena ve vhodném zařízení. Výstupem tohoto měření je napětí na svorkách generátoru, proud jimi protékající a čas měření za předpokladu stejnoměrného zatížení motoru v průběhu měření. Z těchto veličin je následně možné určit množství energie, která byla v daném čase vyrobena.

#### 4.1.1 Metodika měření

Cílem měření bylo zjistit základní parametry související s výrobou mechanické energie jako je spotřeba motorového paliva na jednotku energie, pořizovací náklady na motorové palivo a další. Pro porovnání bylo za stejných podmínek změřeno několik různých motorů. Vzhledem k omezeným možnostem stran měřícího měřeného zařízení byly vybrány motory zastavěné v traktorech. Točivý moment byl odebírán v rámci vývodových hřídelů jednotlivých traktorů a kloubovým hřídelem byl přenášen do elektrického generátoru. Elektrická energie byla mařena teplem do okolí v odporovém topení.

Jako palivo traktorů Zetor 7711 a Claas Arion 520 byla použita běžná motorová nafta z obchodní sítě. Jako palivo pro traktor poháněný dřevoplynem byla použita dřevní štěpka o průměrné vlhkosti 16 %, která byla vyrobena bubnovým štěpkovačem v lednu roku 2014 (příloha č. 14). Průměrná délka štěpky činila 4,5 cm a převážnou část tvořily slabší větve buku, vrby, lísky a smrku s nevýrazným podílem listů a jehličí. Sušení štěpky probíhalo přirozeně ve speciálních konstrukcích k tomuto účelu zhotovených.

## 4.1.2 Experimentální zařízení

### Traktor poháněný dřevoplynem

Pro účely měření byl použit pracovní stroj vlastní konstrukce i výroby vybavený dřevoplynovým pohonem (příloha č. 15). Jedná se o stroj primárně určený pro dopravu nákladů na kratší vzdálenosti a pohon přípojných zařízení. Stroj je využíván hlavně sezónně pro přibližování a vyvážení dřevní hmoty pro dopravu sypkých materiálů a jiných pevných břemen na vlastní sklopné ložné ploše. Dále umožňuje pohon dřevozpracujících strojů jako okružní kotoučová pila (příloha č. 16), kuželová štípačka (příloha č. 17) a hydraulická štípačka na přední hydraulický závěs je možno připevnit radlici pro shrnování klestu či lehké zemní práce. Vozidlo není způsobilé pro provoz na pozemních komunikacích.

### Technický popis

Rozměry stroje: šířka 1950mm, délka 4900 mm, výška 2400 mm

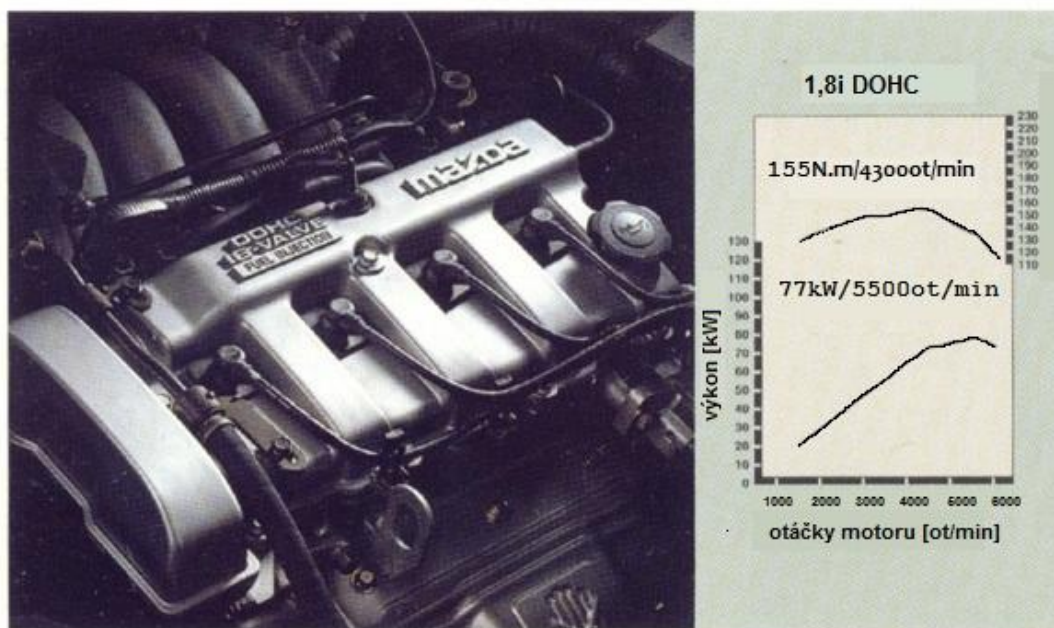
Stroj má dvě nápravy, z kterých je hnaná pouze zadní neodpružená náprava (použita z PV3S). Přední nehnaná náprava je rovněž neodpružena umístěná na výkyvném čepu (použita z krmného vozu KT-4) Rám je obdélníkový uzavřený, v přední části zúžen. Pomocná, hydraulicky ovládaná kotoučová brzda umístěná na odděleném vývodu redukční převodovky, působí přes kloubový hřídel na zadní nápravu. Snadné ovládání zajišťuje hydrostatické plně strojní řízení. Vozidlo je vybaveno hydraulickým pětiokruhovým systémem který zajišťuje sklápění ložné plochy a ovládání předního a zadního hydraulického závěsu, tři okruhy jsou pro agregaci přípojných zařízení. Stroj je vybaven zadním vývodovým hřídelem s pohonem závislým na zařazeném rychlostním stupni. Pro pohon méně náročných zařízení je určena boční řemenice na klínové řemeny, její pohon je nezávislý na zařazeném rychlostním stupni. Uprostřed stroje je umístěn mechanicky poháněný naviják o síle 35 kN pro lesní a vyprošťovací práce. V současnosti je stroj nejvíce využíván jako valník.

### Motor

K pohonu stroje slouží zážehový nepřepíňovaný čtyřválec o objemu 1840 cm<sup>3</sup>, použitý z vozidla Mazda 626, rok výroby 1992 (příloha č. 18 a 19). Jedná se o motor běžně užívaný v osobních automobilech. Motor je vybaven systémem rozvodu DOHC a používá čtyři ventily na válec. Původně byl vybaven vícebodovým vstřikováním benzínu se snímačem množství vzduchu, lambda regulací a s recirkulací výfukových plynů. Zapalování obstarával rozdělovač s halovým snímačem. Na motor navazuje pětistupňová převodovka z téhož vozu, u které bylo nutno vyřadit z provozu diferenciál (zavařením). Podrobnější údaje viz tabulka 4.1 a obrázek 4.1.

Tabulka 4.1 Technická data motoru Mazda<sup>29</sup>

Mazda 626	1.8 16V
Počet válců	4 v řadě
Objem	1840 cm <sup>3</sup>
Vrtání	83 mm
Zdvih	92 mm
Rozvod	DOHC
Stupeň komprese	1:9
Příprava palivové směsi	Vícebodové sekvenční vstřikování
Maximální výkon $M_{max}$	77 kW (105 k)
Při	5500 ot/min
Maximální točivý moment $M_k$	155 Nm
Při	4300 ot/min



Obrázek 4.1 Motor Mazda 626 a jeho výkonová charakteristika<sup>29</sup>.

### Generátorové zařízení

Dřevoplyn pro pohon motoru vytváří souproudý celokovový generátor vlastní výroby a konstrukce (příloha č. 20). Generátor je konstruován pro tvrdé dřevo listnatých stromů popřípadě směs tvrdého a měkkého dřeva s obsahem vlhkosti do 20 % a bez cizích příměsí. Velikost kousků dřeva, na které je schopen generátor pracovat, se pohybuje od jednoho do osmi centimetrů. Generátor je tvořen násypkou s bezpečnostním vrchním plnicím víkem, rozvodem zplynovacího vzduchu, zplynovacím hrdlem, roštem a prostorem pro popel a nedopal. Násypka je schopna pojmout 50 až 60 kg paliva. Plnicí víko je konstruováno tak aby při vzplanutí směsi vzduchu s dřevoplynem uvnitř vyvíječe nemohlo dojít k explozi a poškození vyvíječe. Tato situace může nastat po otevření horního plnicího víka z důvodu plnění nebo proražení případné klenby, do prostoru násypky vnikne vzduch, který s plynem může vytvořit výbušnou směs, ta je zapálená od žhavého paliva uvnitř generátoru. Tyto výbuchy jsou sice v provozu nepříjemné ale při použití bezpečnostního víka nikterak nebezpečné. Riziko výbuchů, které by mohly způsobit

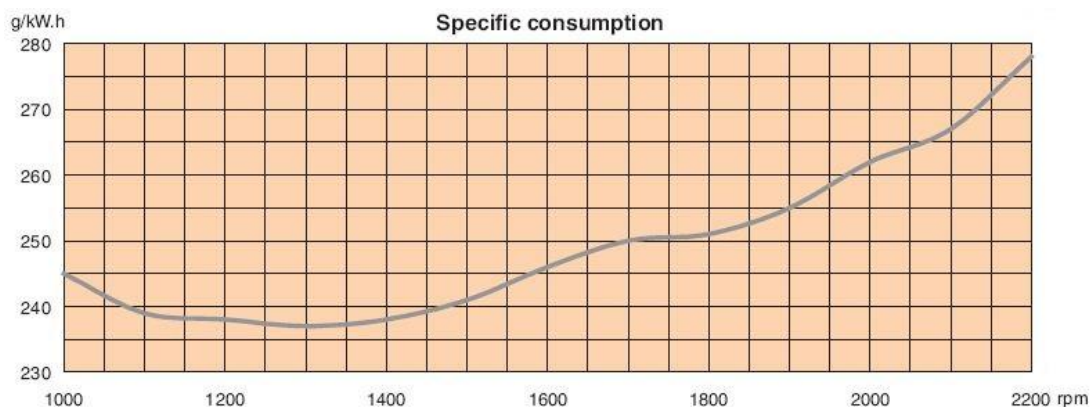


výraznější problém či poškození soustavy roste nejvíce při netěsnosti v žárové části generátoru. Vzduch, který je netěsností přisáván do již vytvořeného dřevoplynu tvoří s tímto výbušnou směs, která je po dosažení meze zápalnosti zažehnuta rozpáleným dřevěným uhlím. Rychlé prohoření může způsobit poškození plynového vedení.

Z generátoru plyn vstupuje do cyklonového odlučovače, kde se zachycuje část prachu z plynu. Dále se plyn filtruje v kombinovaném sacím filtru s mokrou olejovou vložkou, filtr je použit ze sklízecí mlátičky E – 512. Poté je plyn nepřímo chlazen v trubkovém chladiči systém plyn-vzduch. Z chladiče plyn vstupuje do nádrže kondenzátu, která je umístěna pod úrovní chladiče. Kondenzát vzniklý v chladiči do ní může volně odtékat. Z nádrže je nutno kondenzát ručně vypouštět kohoutem. Plyn dále vstupuje do vodní vypírky, kde prochází vrstvou koksů, která je skrápěná prací vodou. Cirkulaci vody zajišťuje oběhové čerpadlo, které nasává vodu z nejnižšího místa vodní vypírky a čerpá ji přes vodní filtr do sprchovacích trysek v horní části vypírky. Další vedení plynu směřuje do motoru nebo k roztápěcímu ventilátoru. Roztápěcí ventilátor je radiální konstrukce o příkonu cca 100 W.

### Konvenční traktor claas Arion

Pro porovnání výroby mechanické energie zplynováním dřeva byl zvolen moderní kolový traktor Class Arion 520 zapůjčený podnikem ZD Neřebice (příloha č. 21). Class Arion 520 je osazen vznětovým řadovým čtyřválcem o obsahu 4520 cm<sup>3</sup>. Motor je vybaven systémem vstřikování paliva comon-rail se systémovým tlakem ve sběrnici 30 – 120 MPa a zpětným vedením výfukových plynů vedených přes EGR ventil. Palivo je vstřikováno do spalovacího prostoru ve dně pístu pomocí piezo-elektrických vstřikovačů s otvorovou tryskou<sup>21</sup>. Točivý moment je na vývodový hřídel přenášen ozubenými převody s možností volby rozsahu otáček 540 ot/min a 1000 ot/min. Spínání vývodového hřídele a motoru zajišťuje mokrá lamelová spojka ovládaná tlakem převodového oleje<sup>21</sup>. Specifickou spotřebu paliva traktoru Class Arion 520 ukazuje tabulka 4.2. Při měření a při frekvenci 50 Hz na výstupním napětí z elektrického generátoru dosahovaly otáčky motoru hodnoty 1470 ot/min.



Tabulka 4.2 Specifická spotřeba Claas arion 520<sup>21</sup> (přejato bez úprav).



### **Konvenční traktor zetor 7011**

Jedná se o ještě poměrně hojně rozšířený traktor vyráběný v ČSSR, který spolu s ostatními podobnými typy traktorů tvořil mechanizační základnu tehdejšího zemědělství v ČSSR a dosud se stále používá v zemědělství a souvisejících odvětvích pro svou konstrukční jednoduchost, provozní spolehlivost a výbornou pohyblivost v terénu. Pro účely měření pro tuto diplomovou práci byl zapůjčen stroj z podniku ZD Netřebice vyrobený v roce 1983, který je stále v podniku využíván k běžné zemědělské činnosti. Stroj je osazen atmosférickým vznětovým motorem o obsahu 3595 cm<sup>3</sup> a výkonu 48 kW (65 koní) při 2200 ot/min. Jedná se řadový čtyřválec s dvěma ventily na válec, které jsou ovládané systémem OHV. Motor je osazen řadovým vstřikovacím čerpadlem s výkonnostní regulací vstřikovaného množství paliva. Vstřikování paliva je přímé skrze otvorové trysky, které vstřikují palivo do spalovacího prostoru, který je utvořen ve dně pístu. Motor není vybaven žádnou elektronickou regulací množství škodlivin, předvstřiku a množství paliva. Motor není vybaven přeplňováním<sup>12</sup>. Specifická spotřeba motoru je 266 g/kWh ±5%<sup>13</sup>. Pohon vývodového hřídele zajišťují převody jednoduchými ozubenými koly. Pro účely měření spotřeby paliva byl tento stroj opatřen zvláštní palivovou nádrží (příloha č. 22).

### **Elektrický generátor**

Pro transformaci mechanické energie na elektrickou byl využit záložní generátor původně určený pro výrobu elektrické energie pro podniky zemědělské prvovýroby v případech výpadku zásobování elektrickou energií. Generátor je konstruován tak aby jej v případě potřeby bylo možné pohotově připojit na širokou škálu strojů, které jsou vybaveny třibodovým závěsem a vývodovým hřídelem (příloha č. 23). Točivý moment se přenáší kloubovým hřídelem do generátoru. Generátor je vybaven předřazenou převodovkou, která zajišťuje potřebné otáčky samotného generátoru pro udržení síťové frekvence 50 Hz. Vinutí statoru generátoru je dvoupólové a pro dosažení správné frekvence nutno dosáhnout otáček rotoru 3000 ot/min. Předřazená převodovka má převodový poměr 1:6,97, což odpovídá 430 ot/min vývodového hřídele. Samotný generátor je vybaven rozvodnou skříní s regulátorem napětí, voltmetrem, ampérmetrem a ukazatelem frekvence. Rotor generátoru je konstruován tak aby na pólech generátoru byl vždy zbytkový magnetismus, který zaručí nabuzení generátoru i bez cizího zdroje, generátor je tedy zcela autonomní. Základní parametry charakterizuje tabulka 4.2, která byla sestavena na základě informací ze štítku generátoru.

Tabulka 4.2 Základní technická data elektrického generátoru (autor).

Typové označení	ZGE-28/31,5DM
Výrobce	Mechatronische Antriebstechnik GmbH
Max. výkon generátoru	32 kW
Otáčky	3000 ot/min
Napětí	220/380 V
frekvence	50 Hz
hmotnost	215 kg
Rok výroby	2007

### Elektrické topení

Jako zátěž generátoru byl zvolen odporový spotřebič, který neposouvá  $\cos \varphi$  a nezpůsobuje jalové ztráty elektrické energie, které by za daných podmínek měření nebylo možné určit. Jako zatížení generátoru bylo zvoleno elektrické topidlo MASTER B9IT (příloha č. 24) jehož základní parametry jsou uvedeny v tabulce 4.3, která byla sestavena na základě štítku spotřebiče.

Tabulka 4.3 Základní data elektrického topidla (autor).

Označení spotřebiče	MASTER B9IT
Výkon	4,5-9,0 kW
Vzduchový výkon	800 m <sup>3</sup> /hod
Řízení termostatem	standard
Proud	3x13 A
Napětí	400 V
Hmotnost	13 kg

### 4.1.3 Průběh měření

Měření pobíhalo ve dnech 12 – 14.12 2014 v areálu ZD Netřebice a v Dalekých Popelicích (příloha č. 25). Na každý ze strojů byl postupně připojen elektrický generátor a odporové topidlo následně měřeno dvě hodiny se zatížením generátoru na hladině celkového příkonu topidla  $P_t$  [W]

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3$$

Kde:

$P_1$ - $P_3$  příkon jednotlivých fází [W]

$U_1$ - $U_3$  napětí na jednotlivých fázích [W]

$I_1$ - $I_3$  proud na jednotlivých fázích [W]

Mezní hodnoty příkonu topidla všech měření  $P_{tmin}= 8780 \text{ W}$ ,  $P_{tmax}= 9020 \text{ W}$ , průměr  $P_t=8950 \text{ W}$ . Pro další výpočty u všech měření byla uvažována průměrná hodnota příkonu. Hodnota  $\cos \varphi$  byla uvažována 1. Celkový mechanický příkon z vývodového hřídele je stanoven z odhadů účinností jednotlivých funkčních celků.

$$P_{mech} = \frac{P_t}{\eta_p \cdot \eta_g}$$

Kde:

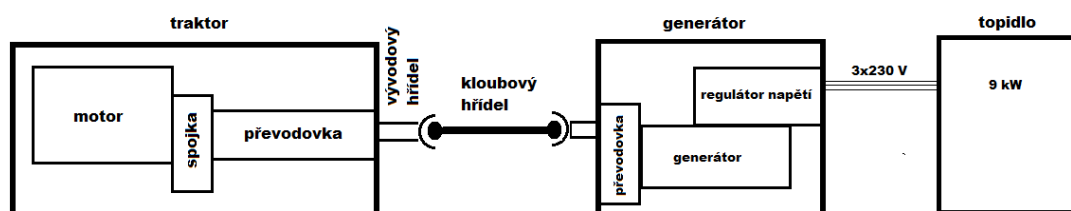
$P_{mech}$  celkový mechanický příkon z vývodového hřídele

$P_t$  příkon topidla (průměrný) [W]

$\eta_p$  účinnost převodovky (odhadem 0,95)

$\eta_g$  účinnost generátoru (odhadem 0,96)

Hodnoty napětí a proudu byly odečteny z ukazatelů na generátoru a pro kontrolu ověřeny multimetrem a ampérkleštěmi. Celkový mechanický výkon na vývodovém hřídeli byl stanoven na hodnotu  $P_{celk}= 9800 \text{ W}$ . Měření trvalo vždy 2 hodiny z čehož vyplývá že celková hodnota odevzdané práce je pak  $E_c=2 \times 9800 = 19600 \text{ Wh} = 19,6 \text{ kWh}$ . Zapojení elektrického generátoru (obrázek 4.3) bylo u všech měřených strojů stejné.



Obrázek 4.3 Schéma zapojení funkčních celků měření (autor).

## 4.1.4 Výsledky měření

### Traktor Arion 520

Spotřeba traktoru Arion 520 činila za dvě hodiny měření  $S_c = 9,9$  l. Pro zjištění spotřeby byla nádrž těsně před měřením doplněna až po okraj. Hodnota spotřeby byla odečtena z odměrného válce, ze kterého se po měření nádrž doplnila znovu po okraj. Při přepočtu na 1 kWh činila spotřeba  $(9,9 \text{ l} : 19,6)$  0,505 l /kWh nebo po přepočtu 424 g/kWh (za předpokladu hustoty nafty  $\rho_n = 0,840$  g/l) Tato hodnota se značně negativně odlišuje od údajů výrobce kde lze z grafu vyčíst hodnotu, která se pohybuje okolo 243 g/kWh. Výraznou odchylku si vysvětlují hlavně tím, že výrobce udává specifickou spotřebu při plném zatížení motoru a k měření využívá motor demontovaný z vozidla, který je oproštěn od pohonu souvisejících agregátů jakými jsou například ventilátor chlazení motoru, alternátor, kompresor pro vzduchové brzdy, kompresor klimatizace, hydraulického čerpadla servořízení, hydraulická čerpadla spojená s chodem a ovládáním převodovky apod.. Dalším negativně působícím faktorem jsou ztráty přenosem točivého momentu v převodovce.

### Traktor ZETROR 7011

Spotřeba traktoru ZETROR 7011 činila za dvě hodiny měření 10,2 l. Pro zjištění spotřeby byla vlastní nádrž traktoru nahrazena pomocnou nádrží, která sloužila pouze pro potřeby měření. Hlavním důvodem byla netěsnost vlastní nádrže traktoru v její vrchní části způsobená opotřebením a nešetrným zacházením. Spotřeba nafty přepočtená na jednotku energie činila 0,520 l/kWh nebo po přepočtu 436 g/kWh (za předpokladu hustoty nafty  $\rho_n = 0,840$  g/l) Specifická spotřeba udávaná výrobcem činí 266 g/kWh  $\pm 5\%$ <sup>13</sup>

### Traktor s dřevoplynovým pohonem

Před vlastním měřením byl zásobní prostor generátoru zcela zaplněn palivem. V průběhu měření bylo palivo průběžně doplňováno a váženo. Po ukončení měření byl generátor novu zcela zaplněn palivem. Celková spotřeba štěpky činila 34 kg. Po přepočtení činila spotřeba 1,73 kg/kWh což objemově představuje zhruba 0,009 m<sup>3</sup>. Odpad mimo výfukových plynů tvořila směs nedopalu a popele v celkovém úhrnu 2020 g z toho 1210 gramů tvořila frakce s velikostí částic větších než 6 mm. Na jednu vyrobenou mechanickou kilowatthodinu tedy připadá 103 g odpadu v podobě směsi dřevěného uhlí a popele. Z tohoto množství činí 61 g frakce s částicemi většími než 6 mm. Dalším druhem odpadu vnikajícím při výrobě mechanické energie byl kondenzát vypuštěný z kondenzační jímky stroje. Celkové množství kondenzátu dosáhlo 1,7 litru. V přepočtu na jednu vyrobenou mechanickou kilowatthodinu byl úhrn kondenzátu 86 ml.

### 4.1.5 Vyhodnocení měření

Prvním kritériem pro vyhodnocení výsledků je specifická spotřeba paliva. Při porovnání konvenčních traktorů poháněných běžnou motorovou naftou z obchodní sítě je určení výsledné ceny energie poměrně snadné za předpokladu, že v nákladech uvažujeme pouze cenu paliva. Cena motorové nafty je v daný moment pro všechny její spotřebitele přibližně stejná v rámci celého státu. Její cena je ovlivněna cenou surové ropy, cenou zpracování, daňovým zatížením a v menší míře maržemi prodejců a překupníků. Při porovnání konvenčních traktorů se strojem poháněným dřevoplynem je srovnání obtížnější z důvodu nejednotné ceny vstupní suroviny. Cena vstupního materiálu je prakticky neurčitelnou veličinou vzhledem k tomu že se jedná o velmi rozmanité palivo, které může mít více forem a rozličnou kvalitu. Roli v jejím určení hraje mnoho okolností jako například místní dostupnost, možnost samovýroby, kvalita, míra příměsí, dopravní vzdálenost, vlhkost a jiné. S takovou rozmanitostí se u motorové nafty v našich podmínkách setkat nelze. Dřevo jako vstupní materiál, se určitých případech může jevit jako cenná surovina, v jiných jako nehodnotný odpad. Její cenu je tedy nutno určovat podle konkrétních podmínek jejího nabytí. V našem případě je jako palivo uvažována pouze dřevní štěpka o 15% vlhkosti s minimem příměsí vyrobená ze směsi listnatého a jehličnatého dřeva. Celková cenová bilance je uvedena v tabulce 4.4.

Tabulka 4.4. Celková bilance spotřeby jednotlivých strojů (autor).

Stroj	Cena paliva	Spotřeba paliva na 1 kWh [g/kWh]	Náklady na 1 kWh [Kč/kWh]
<b>Claas Arion 520</b>	Nafta 35,31 Kč/l (10.11 2015)	424	<b>17,83</b>
<b>Zetor 7011</b>	Nafta 35,31 Kč/l (10.11 2015)	436	<b>18,36</b>
<b>Dřevoplyn traktor</b>	Dřevní štěpka (18% vlhkost) 2,74 Kč/kg vč. DPH*	1730	<b>4,74</b>
<b>Dřevoplyn traktor</b>	Dřevní štěpka (18% vlhkost) 1,7 Kč/kg**	1730	<b>2,91</b>

\* cena štěpky z obchodní sítě (prodejce Ing. Petr Stříbrný – Zámecký dvůr Habartice, cena k 2.2 2015, vyrobená z rychlerostoucího topolu pěstovaného jako energetická plodina, <http://biomasa.habartice.cz/>)

\*\* Průměrná cena na inzertních portálech ke dni 2.2 2014

V tabulce se vyskytují dvě cenové hladiny dřevní štěpky pro porovnání. V nákladech na palivo nejsou zahrnuty náklady spojené s dopravou, manipulací, skladováním a doplňováním paliva. Do nákladů na palivo rovněž nejsou zahrnuty náklady související se zvýšenou náročností obsluhy dřevoplynového zařízení. Tabulka 4.5 znázorňuje cenovou úsporu u dřevoplynového pohonu v porovnání s běžnými způsoby získávání mechanické energie. Jako výchozí zdroj energie pro porovnání je

traktor Claas Arion 520 poháněný motorovou naftou. Ceny paliv jsou přežaty z předchozí tabulky 4.4.

Tabulka 4.5 Úspora nákladů v porovnání s traktorem Claas Arion 520 (autor).

Stroj	palivo	Cena paliva	Náklady na 1 kWh [Kč/ kWh]	úspora
<b>Claas Arion 520</b>	Motorová nafta	Nafta 35,31 Kč/l	17,83	<b>0</b>
<b>Zetor 7011</b>	Motorová nafta	Nafta 35,31 Kč/l	18,36	<b>- 2 %</b>
<b>Dřevoplyn traktor</b>	Dřevní štěpka	2,74 Kč/kg	4,74	<b>73 %</b>
<b>Dřevoplyn traktor</b>	Dřevní štěpka	1,7 Kč/kg	2,91	<b>83 %</b>
<b>elektromotor</b>	elektřina	4,9 Kč/kWh*	5 **	<b>71 %</b>

\*průměrná cena elektřiny pro únor 2015

\*\* za předpokladu 98% účinnosti elektromotoru

Z uvedených tabulek a grafů se jeví použití dřevoplynu jako ekonomicky výhodné. Skutečnost je ale poněkud jiná. Do celkových nákladů na provoz uvedených strojů nevstupují jen náklady na palivo, ale množství dalších souvisejících nákladů na údržbu, pořizovací náklady na koupi stroje nebo v případě dřevoplynového pohonu náklady spojené s přestavbou a vývojem stroje.

Náklady na jednotku vyrobené energie = přímé náklady (palivo, mzda) + nepřímé náklady (amortizace stroje, údržba, opravy)

Dále do nákladů vstupuje náročnost obsluhy, která je v případě dřevoplynového pohonu značná ve srovnání s elektromotorem. Nutno přihlédnout i k nižší spolehlivosti dřevoplynového pohonu která je obvykle způsobena kolísající kvalitou paliva a nevhodnou obsluhou. V neprospěch dřevoplynu jako způsobu získávání mechanické energie hovoří i následující tabulka 4.6, která znázorňuje celkovou účinnost transformace chemické energie paliva na skutečnou mechanickou práci.

Tabulka 4.6 Celková účinnost transformace paliva (autor).

Stroj	palivo	Výhřevnost paliva [MJ/kg]	Specifická spotřeba [g/kWh]	vložená energie v palivu [MJ/kWh]	Celková účinnost [%]
<b>Claas Arion 520</b>	nafta	42,61	424	4,88	<b>20,4</b>
<b>Zetor 7011</b>	nafta	42,61	436	5,15	<b>19,4</b>
<b>Dřevoplyn traktor</b>	dřevo	14,62	1730	7,02	<b>14,2</b>

Dosažená účinnost dřevoplynového pohonu 14,2 % je velmi nízká. Příčinu tak malé účinnosti vidím hlavně v nízké mechanické účinnosti přenosu točivého momentu z motoru na vývodovou hřídel, který je oproti konvenčním strojům poměrně složitý. Dalším neopomenutelným faktorem je odlišnost motorů měřených strojů. Všechny motory strojů se při měření pohybovaly v oblasti částečného zatížení, kde je rozdíl v účinnosti zážehového a vznětového motoru poměrně značný. Snížení účinnosti zážehového motoru způsobuje kvantitativní regulace škrtkící klapkou, která je nedílnou součástí zážehových motorů. Kvantitativní regulace výkonu motoru v oblasti částečného zatížení způsobuje snižování skutečného kompresního poměru a tím i snížení celkové účinnosti motoru. Viz tabulka 2.13 (b).

## 4.2 Možnosti využití dřevoplynu

Rostoucí popularita a popularizace obnovitelných zdrojů ať pozitivní či negativní sebou nese zvyšující se zájem o technologie, které jsou schopny potenciál obnovitelných zdrojů efektivně a smysluplně využít. Nejedná se jen o využití obnovitelných zdrojů jako takových ale také využití jakýchkoliv zdrojů s maximální účinností a v ideálním případě s co nejmenším množstvím dále nikterak nevyužitelného odpadu. V souladu s touto tendencí můžeme v posledních letech sledovat zvýšený zájem o technologie využívající sluneční záření, technologie spojené se zvyšováním účinností a minimalizací ztrát, nové způsoby vytápění, netradiční paliva a podobně. Tento fenomén nesouvisí pouze s technicko-ekonomickou stránkou věci ale také s proměnou společnosti a jejího vnímání životního prostředí jako konkrétního pojmu. Poměrně častými výrazy skloňovanými v této souvislosti jsou „soběstačnost“ a „uhlíková rovnováha“ a jejich způsoby dosahování na jakékoliv úrovni. Jednou z možností, nikoliv jedinou, jak se k soběstačnosti alespoň částečně přiblížit je využití dřevoplynového pohonu, který dokáže s různou mírou účinnosti transformovat obnovitelný zdroj ve formě dřeva na čistší formu energie, mechanickou, elektrickou či tepelnou. Dřevo je poměrně dostupné a nejdéle využívané palivo na světě a pro mnoho lidí nejlevnější,

nejdostupnější zdroj energie, z tohoto důvodu je využití dřeva jako paliva pro spalovací motory potažmo pro vozidla a stroje velmi lákavé. Velmi lákavé je i z důvodu daňového zatížení konvenčních paliv a jejich cen, u kterých se do budoucna rozhodně neočekává výrazné snížení.

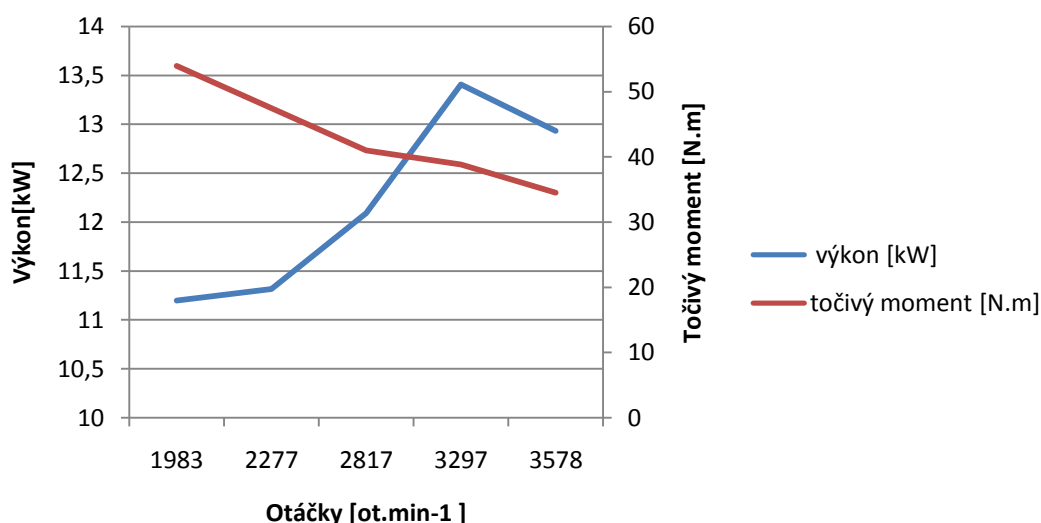
#### 4.2.1 Důvody okrajového využití dřevoplynu

Historie současného okrajového využití dřevoplynu sahá až do poválečného období. Tehdejší využití zplynovacích technologií pro účely civilní dopravy je obecně známým faktem. Využití těchto technologií v dopravě bylo tak rozsáhlé, že zemím jako je Francie hrozilo na konci války reálné odlesnění a více než 90 % veškeré evropské civilní dopravy bylo realizováno právě zplynovacími technologiemi. Demonstruje to i známý francouzský příběh muže „který sázel stromy“. Krátce po skončení druhé světové války byla objevena obrovská naleziště v severní Africe a na blízkém východě. Do Evropy začalo proudit velké množství velmi levné ropy a ropných produktů, v našich podmínkách byla dovážena ropa zejména z nových nalezišť v Rusku. Příliv levné ropy způsobil úpadek tohoto pohonu pro jeho pracnou obsluhu a nízký výkon. Tento úpadek byl navíc umocněn, vnímáním dřevoplynového pohonu jako symbolu okupace a bývalého režimu. Dřevoplyn v našich podmínkách byl poměrně rychle odstraněn ze silnic a polí. O poznání jiná byla situace v sousedním Rakousku a Německu kde se dřevoplynový způsob pohonu udržel ještě dlouhá léta po válce a dodnes je v těchto zemích středem pozornosti mnoha veteránistů a nadšenců, což dokládá množství „spanilých“ jízd, výstav a setkání těchto vozidel. Další pozastavení nad možností této alternativy nastalo až v období 70. let kdy došlo k první vážné ropné krizi. Na tento popud vzniklo v ČSSR několik projektů, které se pokusily o oprášení této technologie (JZD Jílové u Prahy, Atmos, a jiné). Tyto projekty skončily u několika prototypů. Od této doby se situace v oblasti pohonu strojů prakticky nezměnila. Svě uplatnění našla tato technologie v oblasti výroby elektrické energie, v letech podpory obnovitelných zdrojů. Z důvodu šetřivé podpory státu u nás vzniklo několik menších „elektráren“ osazených zplynovacími technologiemi. (Odry, Planá nad Lužnicí, Kněžves, Štoky a jiné). V oblasti pohonu strojů je rozšíření v ČR prakticky nulové zejména z důvodu dostupnosti konvenčních paliv, nízkého povědomí o této technologii, objemného a těžkého generátorového zařízení, pracnosti obsluhy, návyku uživatelů na pohodlnější palivo a stále přetrvávající problémy se sníženou životností motorů a obsahem dehtu v plynu. V neprospěch hraje i obsah hlavní hořlavé složky plynu, tedy jedovatého oxidu uhelnatého. Další nevýhodou je nízká výhřevnost plynu a s tímto spojený pokles výkonu motoru oproti klasickým palivům.

Výhřevnost generátorového plynu je zhruba  $5,2 \text{ MJ/m}^3$ , výhřevnost zápalné směsi generátorového plynu se vzduchem v poměru 1:1,1 je zhruba  $2,4 \text{ MJ/m}^3$ , výhřevnost automobilového benzínu se pohybuje okolo  $32 \text{ MJ/l}$  výhřevnost směsi benzínu se vzduchem je přibližně  $3,2 \text{ MJ/m}^3$ . Pro stejný výkon je tedy nutné spálit  $3,2/2,4=1,33$  krát více směsi generátorového plynu oproti směsi vzducho-benzínové<sup>29</sup>. Pro stejný



výkon jako má benzinový motor o zdvihovém objemu 2000 ccm potřebujeme při dřevoplynovém pohonu motor o objemu 2660 ccm za předpokladu že oba motory mají stejnou účinnost a koeficient plnění válce. Zážehový motor má tedy  $1/1,33=0,75$  tj. 75% výkon oproti pohonu na benzín opět za předpokladu že koeficient plnění motoru zůstane nezměněn, což je u atmosféricky plněných motorů ve spojení s plyno-sací generátorovou soustavou problém<sup>29</sup>. Značnou výkonovou ztrátu dokazuje i měření, které bylo provedeno v rámci mé bakalářské práce v červnu roku 2012 na stejném stroji, který byl předmětem měření i v této práci. Z měření vyplynula velká výkonová ztráta, nejvyšší naměřený výkon byl po odečtení ztrát v převodech 15,6 kW. Obrázek 4.4 zobrazuje graf výkonu a točivého momentu odečtený přímo z motorové brzdy. Ve srovnání s hodnotou výrobce (77 kW) se jedná o ztrátu na výkonu 79 %. Důvody takto vysoké ztráty na výkonu plynou hlavně z nízkého koeficientu plnění motoru, který je způsoben velkou tlakovou ztrátou celého dřevoplynového zařízení.



Obrázek 4.4 Graf výkonu a točivého momentu<sup>29</sup>.

Jednou z možností výrazného snížení výkonové ztráty je použití nízkotlakého přeplňování motoru pomocí elektrického ventilátoru, které významně zvýší koeficient plnění motoru a tím i výkon motoru.

### 4.2.3 Možnosti přestaveb stávajících strojů

Dřevoplyn se jako palivo pro běžnou automobilovou dopravu zcela nehodí z výše uvedených důvodů a také pro legislativní komplikace související s provozem vozidel na pozemních komunikacích. Tato práce se soustřeďuje hlavně na pohon strojů určených k provozu na pozemních komunikacích včetně stacionárních. Možné, byť pouze okrajové využití lze nalézt v oblasti malovýroby související s údržbou krajiny a těžbou a zpracováním dřeva, dále pak jako zdroj elektrické energie pro elektrifikaci odlehklých míst nebo jako doplňkový zdroj elektrické energie pro ostrovní systémy. V oblasti malovýroby a těžby dřeva lze dřevoplyn využít pro pohon

menších traktorů, menších vyvážecích souprav, nakladačů nebo podobných zařízení kde z činnosti stroje vyplývá možnost zásobování stroje palivem. Vhodnost daného stroje pro přestavbu je určena mnoha faktory: celková dispozice konstrukce stroje spojená s možností montáže generátorového zařízení, výkonová rezerva motoru, míra složitosti přestavby konkrétního motoru a další. Pro příklad uvedu možnost přestavby menšího traktoru, který je schopen svým vývodovým hřídelem pohánět menší štepkoč a umožňuje připojení přívěsu či návěsu pro dopravu štepky na místo uložení. Takový stroj by mohl s minimálními náklady na palivo obstarat celou řadu činností souvisejících s prací v lese a péčí o krajinu. Ve spojení s třibodovým závěsem a běžnými prvky pro agregaci přípojních zařízení může takový stroj vykonávat celou škálu činností od přibližování dřeva, přes dopravu až po štěpkování bez nutnosti zásobování drahým konvenčním palivem, případě pohonu stroje na místně dostupný zdroj paliva. V úvahu připadá využití stroje v rozsahu do 1000 motohodin ročně.

Další možností je pohon štepkočů umístěných na zvláštním návěsovém podvozku, na nákladních automobilech nebo pro stacionární použití. U stacionárního štepkoče poháněného dřevoplymem lze využít teplo a výfukové plyny z motoru k předsoušení vyráběné štepky například v bubnové sušárně.

Dřevoplyn se jeví jako výhodné řešení pro výrobu elektrické energie pro zásobování ostrovních systémů, které se stále více zdokonalují a v současnosti již umožňují téměř plnohodnotný komfort ve srovnání s konvenční elektrifikací. V úvahu připadá zařízení o el. výkonu 2-10 kW, které by bylo schopno překlenout zimní období, kdy mají fotovoltaické panely, běžně používané jako primární zdroj energie pro ostrovní systémy, podstatně nižší výkon způsobený jednak nižší intenzitou slunečního záření ale také případnou sněhovou pokrývkou panelů. U většiny současných ostrovních systémů se využívají pro překlenutí zimních období převážně motorgenerátory, elektrocentrály, kogenerační jednotky či jiná zařízení na konvenční paliva.

Možnost využití dřevoplynu skýtá i pohon dřevozpracujících strojů, například mobilních katrů nebo peletizační linky kde je možné využít teplo a výfukové plyny z motoru k sušení zpracovávaného materiálu.

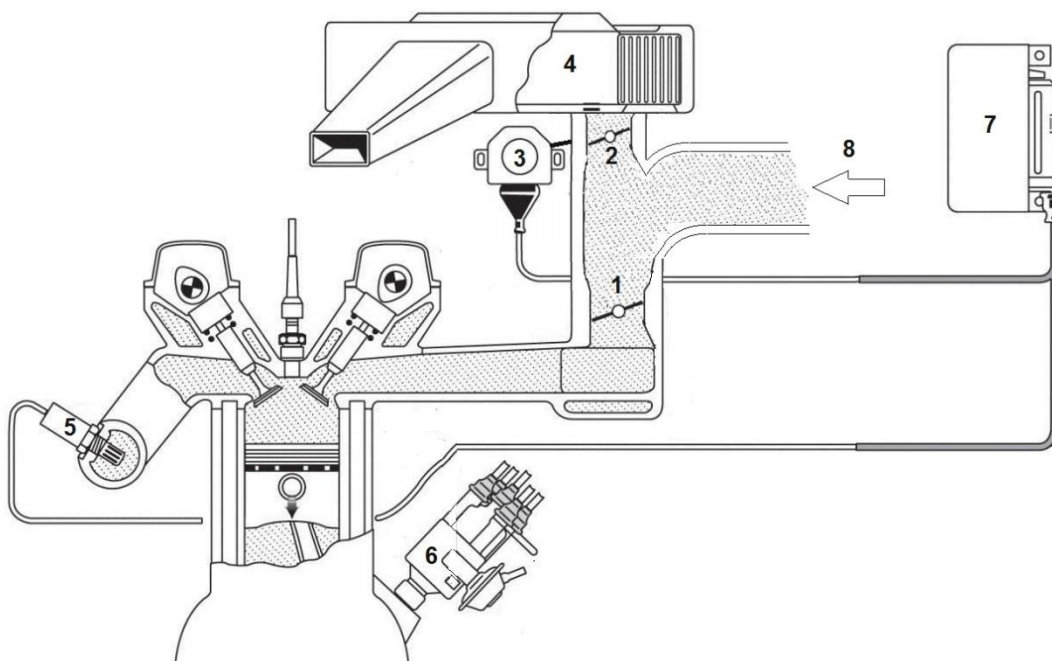
#### **4.2.4 Přestavby motorů**

Přestavby stávajících strojů potažmo motorů lze pojmut množstvím variantních řešení závisajících na široké škále požadavků. Mezi tyto požadavky můžeme zahrnout požadovanou náročnost obsluhy, možnost provozu na další paliva, technická úroveň regulace bohatosti směsi, náročnost přestavby, možnost zpětné přestavby na původní palivo, požadovaný výkon motoru – respektive úroveň opatření snižujících výkonovou ztrátu motoru, možnost krátkodobého obohacení směsi jiným palivem a podobně. Z charakteru dřevoplynu jako paliva vyplývá několik hlavních zásad, z kterých by veškeré úpravy na motorech měly vycházet:

- U plyných paliv odpadá riziko kondenzace paliva na chladných stěnách válce – pro studený start motoru není potřeba žádné dodatečné obohacení palivové směsi tak jako je tomu u zážehových motorů na kapalná paliva.
- Směs dřevoplynu a vzduchu není nutno dodatečně ohřívat – u zážehových motorů na kapalná paliva je nutno k dokonalému odpaření kapek paliva rozprášených v sacím potrubí neustále dodávat teplo. Množství tohoto tepla závisí na skupenském teplu použitého paliva. Tuto skutečnost dokládá nutnost zvýšení intenzity ohřevu sacího potrubí při přestavbách motorů na lihová paliva. Pro odpaření lihového paliva je potřeba větší množství energie. U plynových motorů vyhřívání sacího potrubí odpadá a je účelné vyhřívání směsi u motorů určených pro pohon dřevoplynem vyřadit z provozu. Ohřívání směsi dřevoplynu a vzduchu snižuje koeficient naplnění válce. Směs vstupující do válce by měla být co nejchladnější, ideálně  $< 30^{\circ}\text{C}$ .
- Vlivem inertních složek v dřevoplynu ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) je rychlost hoření směsi vzduchu a dřevoplynu snížena. Z tohoto důvodu je nutné zvýšení hodnoty předstihu zapalování oproti kapalným palivům. Obvyklá hodnota zvýšení předstihu zapalování se pohybuje od  $15$  do  $20^{\circ}$  na klikové hřídeli motoru.
- Pro zapalování směsi vzduchu a dřevoplynu je vhodné použít zapalovací svíčky určené pro chudá plyná paliva.
- Dřevoplyn je velmi korozivní plyn hlavně vůči slitinám hliníku a zinku, které se často používají pro odlitky karburátorů, vstřikovacích jednotek a podobně. Na povrchu těchto slitin se po krátkém čase začnou tvořit bílé povlaky („květy“) oxidů hliníku a zinku (příloha č. 26). Tyto oxidy mohou způsobovat zadírání hřídelek škrťácích klapky, které může značně zkomplikovat ovládání motoru. V praxi se pro konstrukci směšovačů a souvisejících zařízení používají nerezové nebo plastové materiály.
- Ideální hodnota kompresního poměru motoru učeného pro pohon dřevoplynem je zhruba  $12:1$ . Nižší hodnoty způsobují snížení výkonu motoru, vyšší naopak riziko detonačního spalování zvláště pak při kolísající kvalitě plynu.
- Pravidelnou výměnu motorového oleje a olejového filtru je nutno provádět častěji. Doporučuje se zkrátit interval výměny motorového oleje na polovinu. Hlavně z důvodu zanášení oleje dehtem a případně popílkem.
- Při přestavbách motorů z konvenčního paliva na dřevoplyn je nutné téměř vždy počítat se ztrátou výkonu motoru, která se pohybuje od  $20$  do  $70\%$  v závislosti na způsobu úpravy.
- Životnost motoru bude téměř vždy snížena a významně souvisí s kvalitou plynu produkovaného generátorem a úrovní odstraňování TZL a dehtu.

## Čtyřtaktní zážehový motor starší konstrukce vybavený karburátorem

Typickým zástupcem takového motoru je podmínkách ČR například motor TAZ 1203 – 1500 (příloha č. 5). Typický zážehový čtyřválec vybavený bateriovým kontaktním zapalováním s mechanickým rozdělováním vysokého napětí, osazený jednostupňovým spádovým karburátorem. Předpokladem pro úspěšnou přestavbu je použití motoru v dobrém technickém stavu. Přestavbu elektronicky neřízeného motoru lze pojmout několika způsoby s ohledem na účel použití motoru. Nejjednodušší variantou je přestavba umožňující provoz pouze na dřevoplyn, při které odpadá montáž zařízení umožňující volbu paliva a využití stávajícího kompresního poměru bez úprav. Předmětem přestavby je pak pouze změna nastavení předstihu zapalování, montáž směšovače namísto karburátoru a odpojení vyhřívání sacího potrubí, které pro pohon plynem není potřeba, dále montáž lambda sondy a regulačního prvku pro ovládání přívodu směšovacího vzduchu. Nevýhodou takto jednoduché přestavby je obvykle značná výkonová ztráta, která může dosáhnout až 70 % oproti pohonu na benzín. Zjednodušené schéma jednoduché přestavby a zapojení hlavních prvků ukazuje obrázek 4.5.



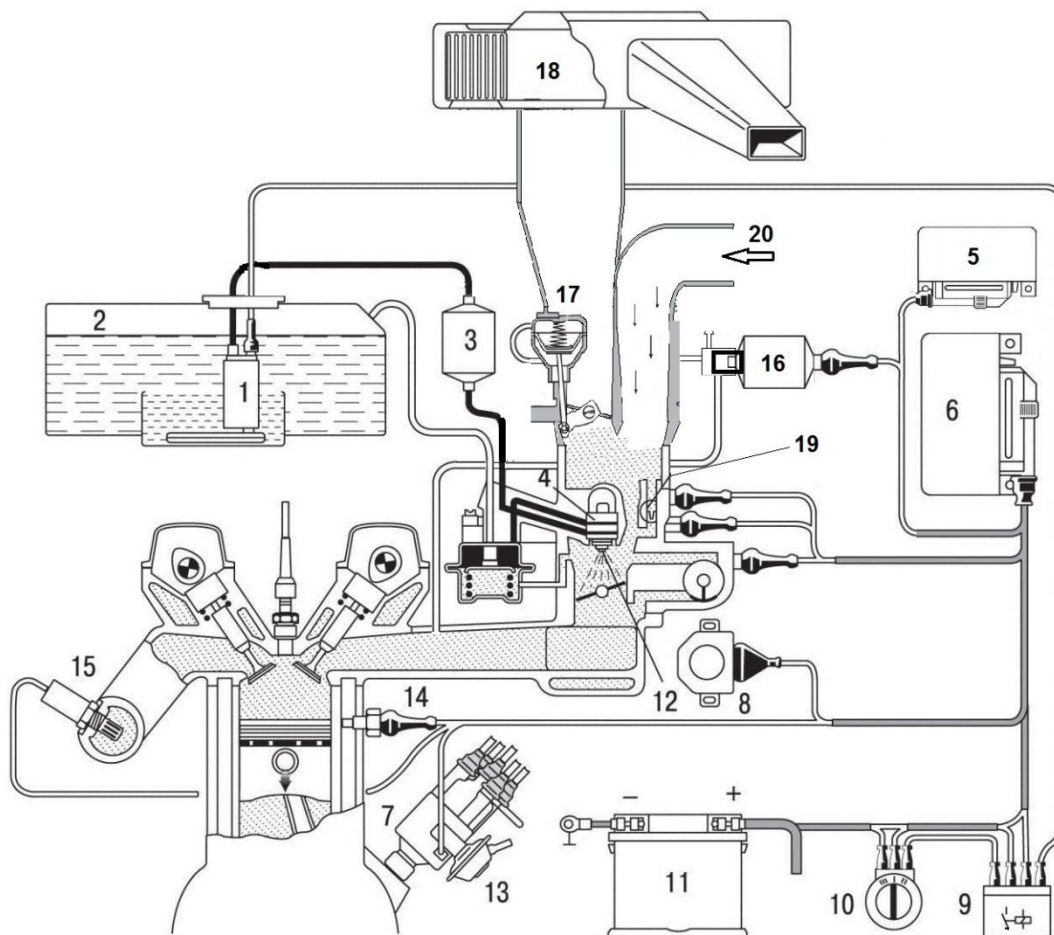
Obrázek 4.5 Zjednodušené schéma přestavby elektronicky neřízeného zážehového motoru (autor): 1. akcelerační klapka, 2. škrtková klapka přívodu vzduchu, 3. ovládací servomotor škrtkové klapky, 4. vzduchový filtr, 5. lambda sonda, 6. těleso rozdělovače, 7. řídicí jednotka bohatosti směsi, 8. přívod dřevoplynu.

Poněkud méně sofistikovanou možností je i použití systému známého z období druhé světové války. Při použití tohoto systému se neuvažuje využití zpětné vazby z lambda sondy pro regulaci bohatosti směsi ale zkušenost obsluhy stroje. Řidič či

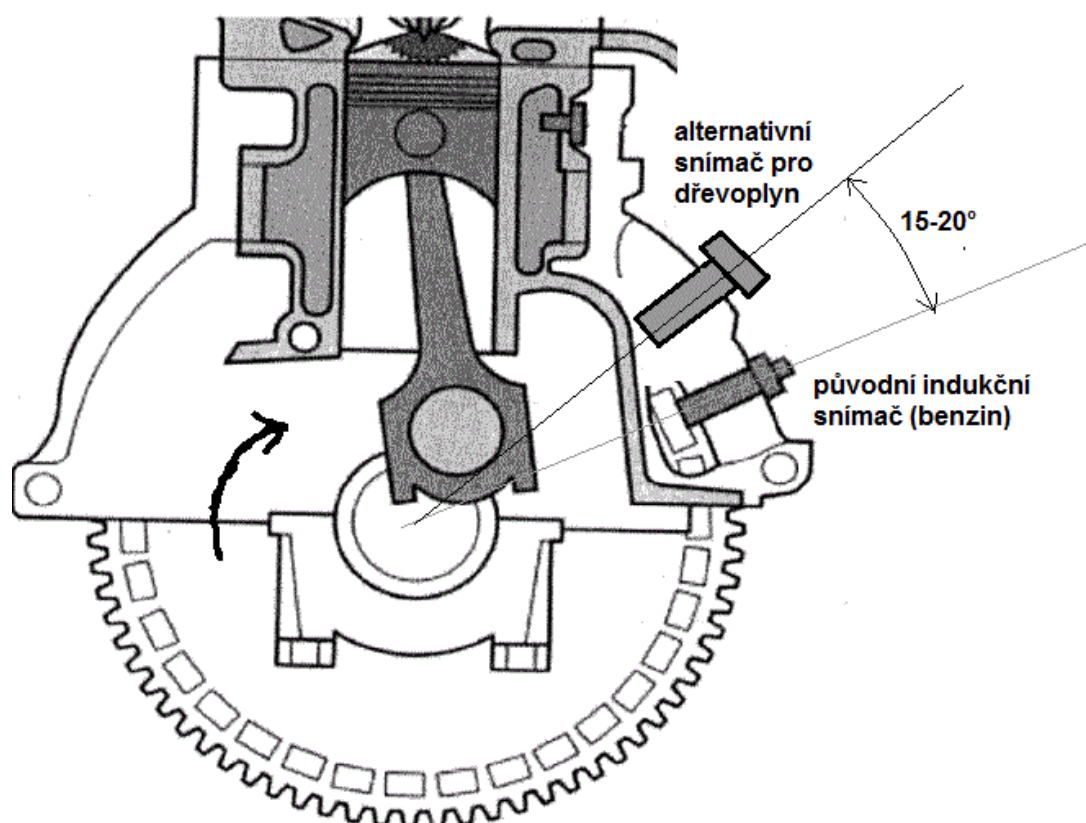
obsluha stroje reguluje bohatost směsi na základě subjektivního dojmu z chodu a výkonu motoru ručně obvykle táhlem či bowdenem spojeným s klapkou směšovacího vzduchu (příloha č. 27). Regulace směsi tak vyžaduje značnou zručnost a zkušenost obsluhy, neboť je nutné nastavení úhlu otevření směšovací klapky při provozu neustále měnit v závislosti na aktuální tlakové ztrátě soustavy a zatížení motoru.

### **Čtyřtaktní zážehový motor osazený vstřikováním paliva, elektronickým zapalováním a lambda regulací**

Typickým zástupcem je motor z běžného osobního automobilu, který je vybaven elektronicky řízeným systémem vstřikování paliva, elektronicky řízeným zapalováním a lambda regulací bohatosti směsi. Výhodou tohoto typu motoru je snadná realizace možnosti operativní změny paliva z kapalného na plynné. Možnost snadného změny paliva vyplývá z konstrukce vstřikovací soustavy, která umožňuje rychlé přerušení přívodu paliva nebo elektrických impulzů do vstřikovačů a tím pádem operativní přechod na plynné palivo. Možnost přestavby elektronicky řízeného motoru znázorňuje obrázek 4.6 a příloha č. 28. Určitý problém může nastat při zvyšování hodnoty předstihu. Obvyklou výchozí hodnotou pro určení bodu zážehu je signál z indukčního snímače, který snímá indukční kolo umístěné na klikovém nebo vačkovém hřídeli. Zvětšení předstihu je možné realizovat montáží druhého indukčního snímače úhlově posunutého od původního snímače zhruba o 15 – 20° ve směru „dříve“ (obrázek 4.7). Současně při přepínání paliv je nutné přepínat i indukční snímače.



Obrázek 4.6 Schéma přestavby elektronicky řízeného motoru (autor): 1. palivové čerpadlo, 2. benzinová nádrž, 3. Benzinový filtr, 4. Elektromagnetický ventil vstřikovače, 5. Řídící jednotka ovládání bohatosti směsi pro dřevoplyn, 6. Řídící jednotka vstřikování benzínu, 7. Rozdělovač s indukčním snímačem, 8. Snímač polohy škrtkové klapky, 9. Spínací relé, 10. Spínací skříňka, 11. Akumulátor. 12. Vstřikovací tryska, 13. Podtlaková regulace předstihu, 14. Snímač teploty motoru, 15. Lambda sonda, 16. Podtlakový elektromagnetický ventil. 17. Podtlakové ovládání bohatosti směsi, 18. Vzduchový filtr, 19. Snímač teploty nasávaného vzduchu, 20. Přívod dřevoplynu.



Obrázek 4.7 Montáž alternativního indukčního snímače zapalování (autor).

### Čtyřtákní vznětový motor s přímým vstřikováním paliva

Přestavby čtyřtákních vznětových motorů lze pojmout dvěma způsoby:

- Konverze na zážehový způsob práce.

Přestavba spočívá v kompletním odstranění vstřikovací soustavy montáží komponentů určených k zážehovému způsobu práce (příloha č. 29). Z tohoto kroku vyplývá náhrada vstřikovačů zapalovacími svíčkami, montáž elektronického zapalování nebo mechanického indukčního zapalování (montáž rozdělovače), dále montáž směšovače s regulací bohatosti směsi a snížení kompresního poměru na hodnotu přibližně 12:1. Snížení kompresního poměru je možné uskutečnit montáží silnějšího těsnění hlavy motoru nebo snížením dna pístů soustružením (soustružení, frézování) Snížování dna pístů je významný zásah do vyvážení klikového mechanismu a je nutné tuto skutečnost zohlednit. Nejvhodnějšími motory pro tuto úpravu jsou atmosférické motory s přímým vstřikováním paliva do spalovacího prostoru ve dně pístů. Motory s nepřímým vstřikem paliva (komůrkové) nejsou příliš vhodné. Obecnou nevýhodou této úpravy je ztráta příznivého průběhu točivého momentu, který je spjat se vznětovými motory.

- Ponechání vstříkovací soustavy s iniciací směsi dřevoplynu a vzduchu pomocí vstříknutí malého množství nafty.

Principem přestavby je zažehnutí směsi dřevoplynu a vzduchu vstříknutím a následným vznícením malého množství motorové nafty. Vznícené palivo následně zažehne okolní směs. Motor nasává místo vzduchu směs dřevoplynu a vzduchu, do které je vstříknuto na konci kompresního zdvihu iniciační množství paliva. Tento způsob zapalování je velmi často využíván u velkých motorgenerátorů určených pro pohon zemním plynem. Samotná přestavba spočívá v montáži směšovače a úpravě vstříkovacího čerpadla hlavně v oblasti regulátoru a nastavení minimální a maximální dávky paliva. Výhodou těchto přestaveb je částečné zachování příznivé momentové charakteristiky a možnost snadného přechodu na konvenční palivo (motorová nafta). Podrobněji se touto problematikou zabývá dokument FAO - Wood gas as engine fuel. Nevýhodou přestaveb je nutný zásah do vstříkovacího čerpadla a problematický chod motoru v oblasti částečného zatížení, kdy vlivem kvantitativní regulaci ze strany směšovače dochází ke snížení kompresního tlaku, které může způsobit nevznícení paliva a nepravidelný chod motoru. Další nevýhodou je nutnost ponechání původního kompresního poměru motoru daného konstrukcí a vznětovým způsobem práce, což může vést za jistých okolností k detonačnímu spalování. V praxi se tento způsob přestaveb pro pracovní stroje příliš nepoužívá, jeho využití je spjato zejména s motory, u nichž se částečné zatížení neuvažuje.

## 4.3 Návrh jednoduchého zařízení

### 4.3.1 Účel použití a základní data

Návrh celého zařízení vychází z konkrétního požadavku na výrobu a montáž zplynovacího zařízení v podhůří Šumavy. Cílem celého projektu je zajištění energetické soběstačnosti na odlehle hájovně s použitím místně dostupného paliva – dřevní štěpky. Hájovna v současnosti funguje v ostrovním provozu. Jako primární zdroj energie je využito sluneční záření pomocí fotovoltaických panelů umístěných na střeše objektu. Elektrická energie je shromažďována v sérii akumulátorů. Jako doplňkový zdroj elektrické energie a tepla v zimním období, kdy je výkon fotovoltaických panelů značně snížen, slouží automatický parní stroj „BIZON“ rakouské výroby poháněný spalováním dřevních peletek. Maximální výkon parního stroje je 2 kW elektrické energie a 20 kW tepelné energie, která je využívána k vytápění objektu. Parní stroj je v provozu od roku 2010 a je využíván v rozsahu zhruba 800 hodin ročně a to pouze pro překlenutí povětrnostně nepříznivých zimních dní. Vzhledem k omezené životnosti parního stroje, absenci servisních služeb a nutnosti pohonu na poměrně drahé dřevní peletky, se majitel rozhodl nahradit parní stroj zplynovacím zařízením ve spojení se spalovacím motorem a synchronním generátorem. Využitím zplynovací technologie majitel hájenky rád využil potenciál snadno dostupné dřevní štěpky vyplývající z hospodářské činnosti na lesních pozemcích náležících k objektu hájovny. K drobným zemědělským a



lesní činností využívá majitel objektu malý pracovní stroj vybavený bateriovým elektropohonem, tříbodovým závěsem, čelním nakladačem a sklápěcí ložnou plochou. Výrobou elektrické energie zplynováním dřeva by rád rozšířil možnosti využití tohoto stroje zejména v zimním období pro odklíz sněhu a těžební činnost v lese.

#### Účel využití:

Navrhované zařízení je primárně určeno pro výrobu elektrické energie pro dobíjení akumulátorů ostrovního systému a dobíjení akumulátorů pracovního stroje o výkonovém rozsahu 5 – 7 kW<sub>e</sub> bez využití odpadního tepla z motoru a generátorového zařízení. Plánované využití zařízení v rozsahu do 900 hodin ročně a to pouze v zimním období nebo při poruše fotovoltaické soustavy.

#### Vstup:

Dřevní štěpka vyrobená z náletových dřevin o vlhkosti < 18 % s minimem příměsí (listí, jehličí, zemina apod.) předpokládaná spotřeba 1,4 kg/kWh; zdroj elektrické energie 230 V ~ 100 – 120 W pro pohon roztápěcího ventilátoru, oběhového čerpadla prací vody, lambda regulace a střešovacího zařízení; prací voda v objemu cca 5 litrů (v zimním období nutné po odstavení vypouštět pro zamezení zamrznutí).

#### Výstup:

Elektrická energie 230 V ~ 5 – 7 kW jedna fáze, popel a nedopal ve formě dřevěného uhlí o zrnitosti < 7 mm odhadovaném objemu 80 g/kWh<sub>e</sub>, vodní pára, spaliny z motoru, dehet ve formě vysušeného zbytku určeného k likvidaci spalováním v odhadovaném množství 3 g/kWh<sub>e</sub>, odpadní teplo z motoru a generátoru (využití se neuvažuje).

#### Provoz:

Zařízení je určeno pro dobíjení ostrovního systému v případě potřeby substituce či posílení fotovoltaického systému. Využití zplynovacího zařízení je uvažováno 2x až 3x týdně po dobu 4 – 5 hodin za předpokladu plného výkonu. Předpokládaná autonomie provozu bez nutnosti jakékoliv obsluhy je 3-4 hodiny.

#### Obsluha:

Projekt klade důraz na jednoduchost zařízení s minimem automatizačních prvků a elektroniky z důvodu snadného odhalení poruchy zařízení a její odstranění i méně zkušenou osobou bez odbornějšího vzdělání. Z tohoto důvodu je obsluha poněkud náročnější a sestává se hlavně z úkonů souvisejících s doplňováním paliva, odstraňováním popela a dehtu, ručním startováním motoru a péčí o vodní vypírku v zimním období.

Umístění:

Vzhledem k bezpečnostním rizikům spojených s obsahem oxidu uhelnatého v produkovaném plynu bude zařízení realizováno na volném prostranství jako samostatně stojící a dobře odvětraný objekt a rozměry: šířka 1500 mm, délka 1500 mm, výška 2300 mm.

Způsob filtrace plynu:

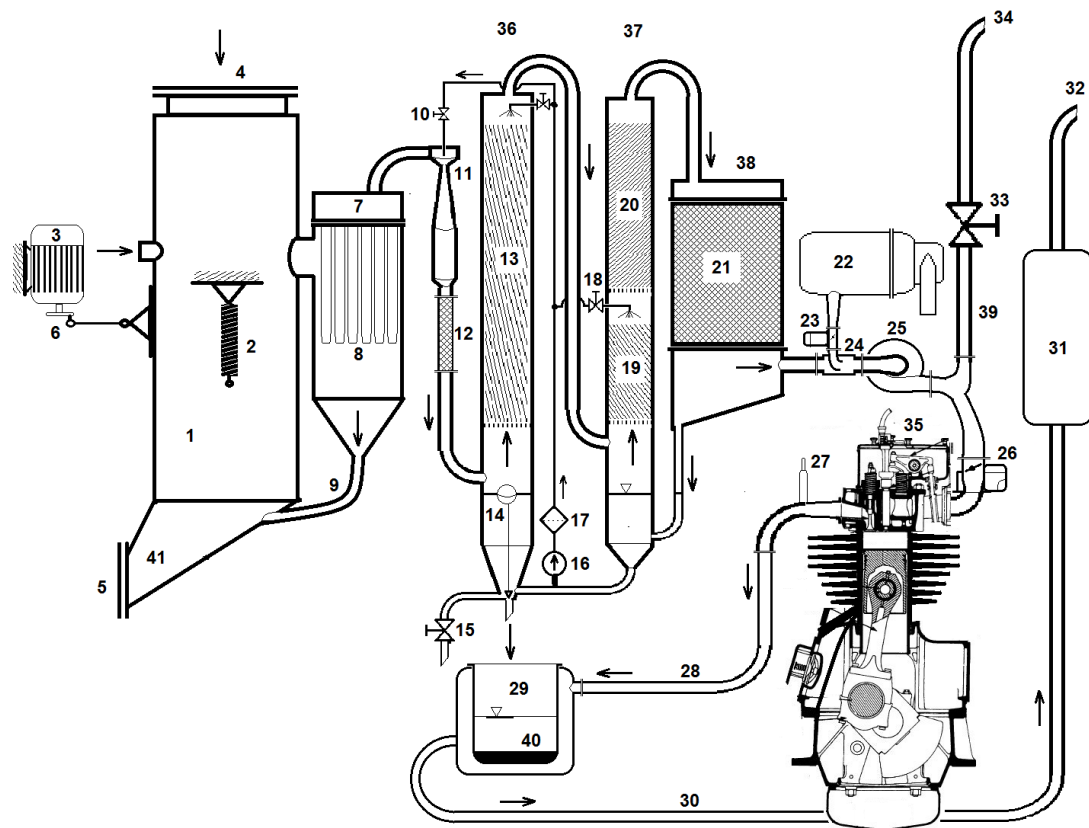
1. fáze – vysokoteplotní tkaninový filtr pro odstranění TZL regenerovaný stříráním. Materiál filtračních rukávců – NOMEX.
2. Fáze – dvoustupňová vypírka studenou vodou s uzavřeným oběhem prací vody. První stupeň je tvořen vodním protiproudým skrubrem s náplní keramzitu, druhý stupeň tvoří vodní protiproudý skrubr s náplní keramzitu doplněný o kovový demister.
3. fáze – nízkoteplotní filtrace na vrstvě rostlinného materiálu.

Způsob chlazení plynu:

Přímé chlazení plynu nástřikem studené prací vody.

### **Základní komponenty zařízení**

Souproudý generátor plynu vlastní konstrukce, rukávcový filtr využívající skelných vláken, přímé chlazení plynu vodou, dvoustupňová vodní vypírka plynu spojená s demisterem, filtrace na bázi zrnitého materiálu, ventilátor, lambda regulace bohatosti směsi. Produkovaný plyn bude spalován v konvenční upravené, původně benzinové, elektrocentrále o původním výkonu 9kW<sub>e</sub>. Zjednodušené schéma ukazuje obrázek 4.8.



Obrázek 4.8 Schéma navrhovaného zařízení (autor): 1. Těleso generátoru dřevoplynu, 2. Pružný závěs generátoru, 3. Elektromotor střásacího mechanismu, 4. Plnicí víko generátoru, 5. Víko pro odstraňování popela, 6. Excentrický mechanismus střásání, 7. Těleso rukávového filtru, 8. Soustava textilních rukávů, 9. Výpad odfiltrovaných TZL do společného zásobníku s popelem, 10. Regulační ventil průtoku vody pro přímé chlazení plynu, 11. Těleso nastřikování vody do plynu, 12. Pružná hadice pro vedení plynu, 13. Náplň prvního stupně vodní vypírky, 14. Plovák automatického vypouštění kondenzátu, 15. Ruční ventil pro vypouštění vody, 16. Čerpadlo vypírací a chladící vody, 17. Vodní filtr hrubých nečistot, 18. Regulační ventil průtoku pro druhý stupeň vodní vypírky, 19. Náplň druhého stupně vodní vypírky, 20. Náplň demisteru (odlučovače vodních kapek), 21. Náplň jemného dočišťovače, 22. Vzduchový filtr, 23. Servopohon škrvení přívodu směšovacího vzduchu, 24. Směšovač, 25. Ventilátor roztápění a přeplňování, 26. Původní upravený karburátor spojený s regulátorem otáček motoru, 27. Lambda sonda, 28. Zaizolované vedení výfukových plynů, 29. Tepelný výměník pro odpařování vodního kondenzátu, 30. Nezaizolované vedení výfukových plynů, 31. Tlumič výfuku, 32. Koncovka výfukového vedení, 33. Uzavírací ventil pro režim roztápění, 34. Vyústění roztápěcí odbočky – možnost montáže polního hořáku, 35. Spalovací motor elektrocentrály, 36. První stupeň vodní vypírky plynu, 37. Druhý stupeň vodní vypírky plynu, 38. Koncový dočišťovač plynu, 39. Odbočka pro roztápěcí režim, 40. Tuhý dehtový zbytek po odpaření vody určený k likvidaci, 41. Společný zásobník pro nedopal, popel a odfiltrovaný prach.

### 3.4.2 Popis funkce zařízení

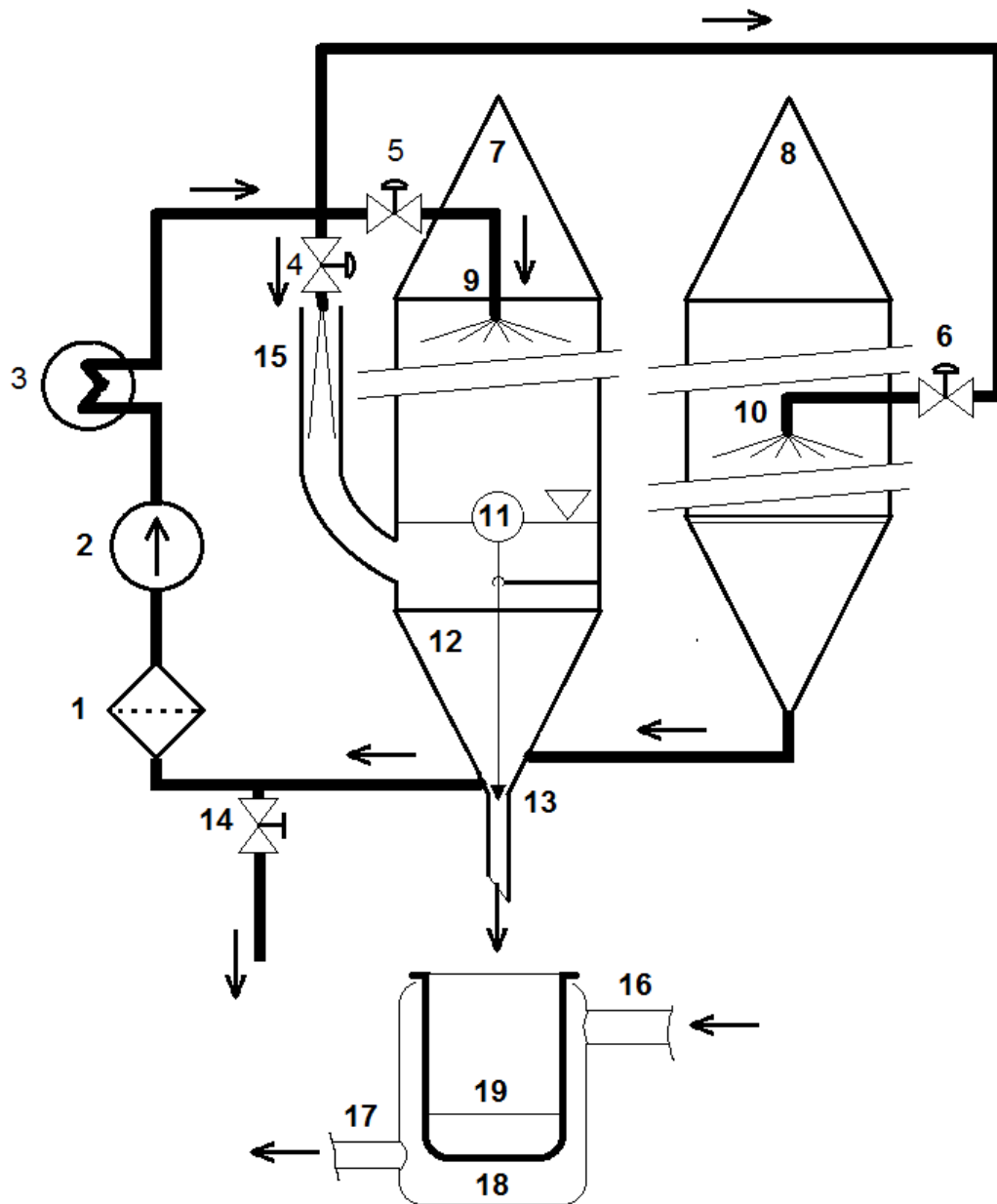
Palivo je zplynováno v souproutém generátoru se zásobníkem paliva o objemu přibližně 80 litrů. Velikost zásobníku paliva byla volena s ohledem na požadovanou autonomii zařízení. Plnění zásobníku probíhá ručně po otevření vrchního plnicího víka. Generátor je dvouplášťový s předehřevem zplynovacího vzduchu. Vzhledem k obecně problematickému sestupu paliva souproutým generátorem a možné tvorbě zkratových kanálů je generátorové zařízení vybaveno automatickým střásacím zařízením, které umožňuje vibrační střásání v pravidelných nastavitelných intervalech. Generátorové zařízení ve své horní části ukotveno v pružném závěsu k základnímu rámu a ve spodní části je spřaženo s klikovým mechanismem střásacího elektromotoru, který je ovládán programovatelným časovým spínačem. Střásání má několik základních funkcí, v první řadě zamezuje tvorbě kleneb a „vyhořelých“ míst v zásobníku a napomáhá dobrému sestupu paliva generátorem. Další funkcí je zaručení dobrého propadávání popela a nedopalu roštem, což má zásadní vliv na tlakovou ztrátu v generátoru. Pokud popel omezeně nebo vůbec nepropadá roštem, začíná se hromadit v prostoru nad roštem a brání prostupu plynu redukční zónou generátoru. Vibrace vytvářené střásacím ústrojím zaručují dostatečný propad popela roštem. Střásací zařízení má zásadní vliv také na funkci tkaninového filtru. Při filtraci plynu přes tkaninu se hromadí odfiltrovaný popel a prach na povrchu tkaniny, postupně utváří vrstvu zvanou „filtrační koláč“ a zvyšuje celkovou tlakovou ztrátu filtru. Horký plyn vystupující z generátoru proudí do tkaninového filtru, kde prochází soustavou sedmi tkaninových rukávců. Každý rukávec je natažen na kovovou kostru, která je tvořena ocelovým drátem ve tvaru tlačné pružiny. Kostra určuje tvar rukávce a umožňuje násobení vibrací od střásacího mechanismu. Těleso tkaninového filtru je konstrukčně spjato s generátorem a otřesy od střásacího mechanismu působí i na rukávce. Filtrační koláč na povrchu rukávců je tedy odstraňován střásáním. Odhadovaná pracovní teplota tkaninového filtru je v rozsahu 80 až 250°C. Pro udržení vysoké pracovní teploty filtru zejména v zimním období je spodní část generátoru a těleso filtru zevnějšku tepelně izolováno materiálem na bázi skelných vláken o minimální tloušťce 30 mm, izolace je kryta leštěným hliníkovým plechem o síle 0,8 mm. Popel a prach odstraněný v tkaninovém filtru je sveden do společného zásobního prostoru pod roštem generátoru. Popel a nedopal je nutné v pravidelných intervalech odstraňovat a to po odejmutí víka pro odstraňování popele. Kapacita zásobního prostoru pro popel vystačí odhadem na 10 až 12 hodin provozu, po uplynutí této doby (nebo dříve) je nutné motor zastavit a popel odstranit.

Odfiltrovaný plyn o teplotě < 250°C vycházející z tkaninového filtru je přímo chlazen nástřikem prací vody do plynového potrubí. Plyn a prací voda proudí do spodní části prvního skrubru, dále plyn stoupá skrubrem skrze vrstvu keramzitu za současného promývání prací vodou, která je do skrubru vstřikovávána v jeho horní části. V druhém stupni vodní vypírky je plyn vypírán v dalším skrubru obdobným způsobem. Druhý

skrubr je doplněn o demister, který je tvořen vrstvou plynulých nerezových třísek. Demister z plynu odstraňuje podstatnou část vodní mlhy, která se tvoří při vypírání plynu. Plyn dále pokračuje do koncového filtru, kde plyn nucen prostoupit vrstvou rostlinného materiálu. Jako filtrační materiál je uvažována dřevní štěpka, kterou bude nutné po určitém čase obměňovat z důvodu poklesu její schopnosti absorbovat zbylý dehet z plynu. Předpokládaný interval výměny náplně koncového filtru je 40 provozních hodin. Po koncovém dočištění vstupuje plyn do směšovače, kde se mísí s odfiltrovaným vzduchem v poměru zhruba 1:1. Regulaci bohatosti směsi zajišťuje servoventil ovládaný řídicí jednotkou, která vyhodnocuje napětí na svorkách lambda sondy. Systém regulace bohatosti směsi je přejet a upraven z konvenčního systému řízení bohatosti směsi pro zemní plyn. Tyto systémy jsou běžnou součástí osobních vozidel poháněných zemním plynem. Směs dřevoplynu a vzduchu pokračuje do ventilátoru a přes akcelerační štkící klapku do motoru. Systém regulace otáček motoru je přejet bez úprav a konstrukčně souvisí s původním karburátorem na benzin. Možnost provozu elektrocentrály na benzin se neuvažuje. Ventilátor je za běhu motoru v provozu a zajišťuje nízkotlaké přeplňování motoru, z důvodu snížení výkonové ztráty motoru.

### **3.4.3 Popis funkce vodního okruhu**

Zásadním problémem u zplynovacích zařízení je filtrace plynu a snižování obsahu dehtu v plynu. S touto problematikou úzce souvisí produkce nebezpečného odpadu v podobě dehtů. Navrhované zařízení využívá ke snížení obsahu dehtu v plynu vodní vypírku, která byla zvolena hlavně na základě dostupnosti a nízké ceny prací vody. Systém pracuje s uzavřeným oběhem prací vody. Oběh prací vody zajišťuje radiální odstředivé čerpadlo, které nasává vodu přes vodní filtr hrubých nečistot z prostoru pod vypíracími skrubry. Voda je dopravována od čerpadla přes vodní chladič do jednotlivých trysek. Průtok jednotlivými tryskami je regulován nastavitelnými ventily pro optimální provoz každé trysky. První tryska slouží k přímému chlazení plynu, druhá tryska skrápí náplň 1. stupně vodní vypírky, třetí tryska skrápí náplň 2. stupně vodní vypírky. Voda poté protéká zpět do zásobního prostoru pod skrubry, odkud je opět nasávána čerpadlem. Voda je postupně zanášena zkondenzovaným dehtem a je nutné ji průběžně obměňovat. Čistá voda je do systému doplňována kondenzací vodní páry obsažené v produkovaném plynu a způsobuje nárůst hladiny v zásobním prostoru pod skrubry. Objem vody v zásobním prostoru reguluje automatický ventil ovládaný plovákem. Při nárůstu hladiny automatický ventil přepustí část znečištěné prací vody do prostoru odpařovací misky výparníku, kde dochází k odpaření vody separací dehtu na dně odpařovací misky. Výparník je vyhříván výfukovými plyny z motoru. Pro vypouštění prací vody v zimním období slouží výpustný ventil. Likvidace dehtu soustředěného v odpařovací misce se děje spalováním za vysokých teplot.



Obrázek 4.9 Schéma vodního okruhu (autor): 1. Vodní filtr hrubých nečistot, 2. Oběhové radiální čerpadlo, 3. Chladič vypírací vody, 4. Regulační ventil přímého chlazení plynu, 5. Regulační ventil pro první stupeň vodní vypírky, 6. Regulační ventil pro druhý stupeň vodní vypírky, 7. První stupeň vodní vypírky, 8. Druhý stupeň vodní vypírky, 9. Tryska prvního stupně vodní vypírky, 10. Tryska druhého stupně vodní vypírky, 11. Plovák automatického ventilu, 12. Zásobní prostor prací vody, 13. Automatický ventil vypouštění prací vody, 14. Ruční vypouštěcí ventil prací vody, 15. Prostor přímého chlazení plynu, 16. Vstup výfukových plynů do výparníku, 17. Výstup výfukových plynů z výparníku, 18. Výparník, 19. Odpařovací miska s dehtovým zbytkem.

## 5. Závěr

Využití zplynovacích technologií pro pohon pracovních strojů a obecné využití této technologie v ČR je zatím velmi okrajové, zejména z důvodu nízkého povědomí a stále přetrvávajících problémů s filtrací plynu, stabilitou zplynovacího procesu a nutností obsluhy. V neprospěch hraje rovněž poměrně komplikovaná konstrukce a složitost celého zařízení, které v případě přestavby pracovních strojů vyžaduje montáž objemného generátoru, filtrů a dalších zařízení. Možnost využití zplynovací technologie v oblasti pohonu pracovních strojů a zařízení skýtá určité výhody v porovnání s konvenčními způsoby pohonu, zejména pak úsporu nákladů na palivo a možnost jeho samozásobení. K dalším přednostem patří i uhlíková neutralita dřevoplynového pohonu. Negativním zjištěním je poměrně nízká efektivita dřevoplynového pohonu, která při měření dosahovala pouze na úroveň 14,2 % a spotřeba paliva  $1,73 \text{ kg.kWh}^{-1}$ . Experimentální zařízení při Dánské technické univerzitě dosahovalo účinnosti transformace paliva 24 %<sup>30</sup>. V ČR pracuje neúčinnější zařízení využívající technologii zplynování s účinností okolo 32 %<sup>31</sup> se spotřebou 0,85 kg dřevní štěpky na kWh. .

Využití dřevoplynu se jeví jako ekonomicky výhodné. Skutečnost je ale poněkud jiná. Do celkových nákladů na provoz uvedených strojů nevstupují jen náklady na palivo, ale množství dalších souvisejících nákladů na údržbu, pořizovací náklady na koupi stroje nebo v případě dřevoplynového pohonu náklady spojené s přestavbou a vývojem stroje. Dále do nákladů vstupuje náročnost obsluhy, která je v případě dřevoplynového pohonu značná ve srovnání s novým konvenčním strojem. Nutno přihlídnout i k nižší spolehlivosti dřevoplynového pohonu která je obvykle způsobena kolísající kvalitou paliva a nevhodnou obsluhou. Dosavadní zkušenosti s provozem pracovních strojů osazených dřevoplynovým pohonem.

Provoz pracovního stroje poháněného dřevoplynem je do jisté míry pracnější než pohon na konvenční paliva, vyžaduje zkušenost v obsluze a kvalitní palivo, které má zásadní vliv na spolehlivost zařízení. Palivo použité pro generátor musí být co nejsušší ideálně s co nejmenším podílem listí a hlíny. Vlhké palivo stěžuje roztápění generátoru a start motoru. Roztápění generátoru mohou značně ztížit i povětrnostní vlivy. Velmi chladné nebo velmi vlhké počasí mohou prodloužit dobu roztápění až na půl hodiny, které při teplém a suchém počasí trvá 5 minut. V souvislosti s delší dobou roztápění se snižuje i pohotovost k provozu. Ta je snížena i pracnější obsluhou, která vyžaduje vybírání popele, doplňování paliva a vypouštění vodního kondenzátu. Za dobu téměř šesti let provozu traktoru poháněného dřevoplynem jsem neměl vážnější poruchu související s motorem nebo generátorovým zařízením. Měřený stroj má v době odevzdání této diplomové práce odpracováno zhruba 1000 motohodin a to výlučně v dřevoplynovém režimu.

## Seznam použitých zdrojů

1. Pohořelý M., Jeremiáš M., Kameníková P., Skoblja S., Svoboda K., Punčochář M.: Zplyňování biomasy, *Chemické Listy* 106, 264,274 (2012)
2. Beňo Z., Skoblja S.: Souproudé zplyňovací generátory a jejich použití pro výrobu elektrické energie z biomasy, Dostupné z <http://biom.cz>
3. Příhoda J.: Technologie pro zpracování dendromasy - těžebních zbytků. Dostupné z <http://biom.cz>
4. Ochodek T., Koloničný J., Branc M.: "Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy", 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1426-1
5. Gescheidle R. a kolektiv, [z německého originálu přeložili Iva Michňová a Zdeněk Michňa]. Příručka pro automechanika, 2. upravené vydání, Praha: Sobotáles, 2002. ISBN 8085920832.
6. Tůma A., Generátory a jejich obsluha. Praha: Grégr a syn, 1944.
7. Zárybnická M., Návrh sušky na biomasu. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Baláš M. Ph.D.
8. Radina O., Energetické využití dřevoplynu. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Petr Jindra.
9. Novotný L., Vliv složení biomasy na účinnost přeměny energie v plynovém spalovacím motoru, České Budějovice 2011, Diplomová práce, Jihočeská univerzita, pedagogická fakulta, vedoucí práce Ing. Michal Šerý.
10. Trefulka J., Dřevoplyn. Žďár 1935. vlastním nákladem.
11. Skoblja S., Úprava složení plynu ze zplyňování biomasy. Praha, 2004. Disertační práce. VŠCHT. Vedoucí práce Doc. Ing. Bohumil Koutský, csc.
12. Návod k obsluze traktorů Zetor 5011, 6011, 6045, 7011, 7045. ZETOR BRNO 1980. Dokumentačně propagační oddělení.
13. Lupoměch F.: Traktory Zetor. Computer Press, 2009 (1.) - váz., 392 str. ISBN: 978-80-251-2640-0
14. Holý M.: Porovnejte vliv různých druhů biopaliv (složení, výrobce) pro vznětové motory na jejich výkon a měrnou spotřebu. České Budějovice, 2012. Bakalářská práce. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích Zemědělská Fakulta. Vedoucí práce Ing. Josef Frolík, CSc.
15. Reed T. B.: Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Colorado, Biomass Energy Foundation, 1988.
16. Drga M.: Zplyňování biomasy. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUTBR. Vedoucí práce Ing. et Ing. Jan Škvařil
17. Skov N. A., Papworth M. I.: Driving on wood: The lost art of driving without gasoline. Franktown: The biomass energy foundation press, 2006.
18. Hampl J., Lokomotiva na dřevoplyn



19. Lafontaine H., Zimmermann G. P.: Construction of a simplified wood gas generator for fueling internal combustion engine in a petroleum emergency. Miami, Florida: Biomass energy foundation, 1989.
20. Kroll W.: Der Gasgenerator. Berlin: Verlag G. Kliemt, 1943.
21. Výběr z technické dokumentace k traktorům CLAAS. Zapůjčil hlavní technik Ing. Vybíral Zdeněk, AGRALL zemědělská technika, Bantice 79, 671 61 Prosiměřice
22. Ing. Antonín Marčák – osobní jednání (leden 2014)
23. Mechanical wood products branch, Forest Industries Division. Wood gas as engine fuel. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986. ISBN 92-510-2436-7.
24. Konference, Nové technologie pro pyrolýzu a zplyňování, Jihlava 6.12 2011, příspěvek - Dřevní plyn z pohledu výrobce spalovacího motoru, Ing. Jan Černožský, TEDOM-VKS s.r.o.
25. Beroun S., Štech V.: Výkonové a emisní parametry plynových motorů kogeneračních jednotek při provozu na paliva různé kvality. Technická univerzita v Liberci. V rámci projektu MŠMT 1M0568
26. Matějovský V.: Automobilová paliva. Vydání 1. Praha: Grada, 2005, 223 s., ISBN 80-247-0350-5
27. Baláš M.: Čištění energoplynu kovovými katalyzátory, Brno 2010, disertační práce, VUTBR, Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc. 133 s.
28. Skoblia S., Pícek I., Beňo Z., Pohořelý M.: Vývoj malých a středních kogeneračních jednotek na biomasu a jejich aplikace v praxi, Příspěvek do odborného semináře, Energie z biomasy XIII, Brno 2012
29. Šedivý P.: Konstrukční úpravy motorů pro pohon dřevoplynem a měření jejich základních veličin, Bakalářská práce, Jihočeská univerzita, zemědělská fakulta, České Budějovice 2013, Vedoucí práce Ing. Josef Frolík, CSc.
30. Henriksen U., Ahrenfeldt J., Jensen T., Gøbel J., Bentzen J., Hindsgaul C., Sørensen L.: The design, construction and operation of a 75kW two-stage gasifier. Energy 2006, vol. 31, 10-11, s. 1542-1553. DOI: 10.1016/j.energy.2005.05.031.
31. Konference, Nové technologie pro pyrolýzu a zplyňování, Jihlava 5.12 2013, příspěvek - Vícestupňové zplyňování, dlouhá cesta od myšlenky k realizaci, Skoblia Sjarhei, Pícek Ivo, Beňo Zdeněk, Pohořelý Michael.
32. Elektronické výukové materiály VŠCHT, Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/odprasovani.htm>
33. Kubíček J., Mokrý čišťování energoplynu před jeho využitím ve spalovacím motoru, disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2006, Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Ochrana, CSc., ISSN 1213-4198

## **Příloha diplomové práce**

### **Úpravy pracovních strojů a příslušenství pro pohon dřevoplynem**



Příloha č. 1. Spodový generátor (Ing. Antonín Marčák)



Příloha č. 2. Filtrace dřevoplynu na vrstvě rostlinného materiálu – stav filtračního materiálu po patnácti hodinách provozu. (autor)





Příloha č. 3 Cyclonový odprašovač (autor)

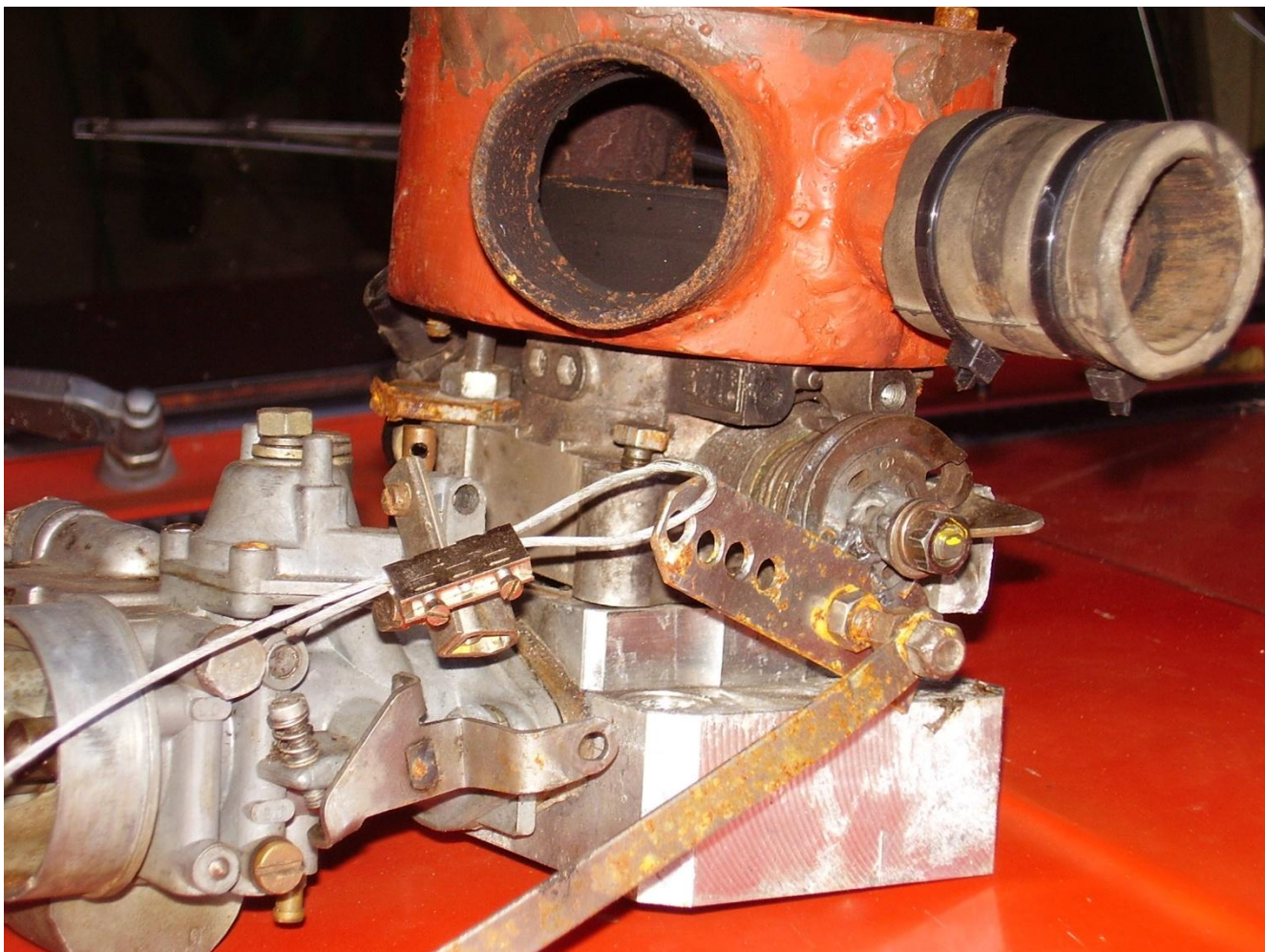


Příloha č. 4. Jednoduchý vodní protiproudý skrubr.- uprostřed (autor)





Příloha č. 5. Jednoduchý směšovač v kombinaci s klasickým karburátorem (autor)



Příloha č. 6. Jednoduchý směšovač v kombinaci s klasickým karburátorem (autor)





Příloha č. 7 Mechanizované vkládání materiálu do štěpkovače. (autor)



Příloha č. 8 Diskový štěpkovač – uchycení nože (autor)





Příloha č. 9 Šnekový štěpkovač (autor)



Příloha č. 10 Rotační spirálové ostří (autor)





Příloha č. 11 Výroba paliva pro generátor (autor)





Příloha č. 12 Bukové „špalíky“ (autor)



Příloha č. 13 Speciální konstrukce pro sušení dřevní štěpky (autor)





Příloha č. 14 Dřevní štěrka použitá při měření (autor)





Příloha č. 15 Pracovní stroj použitý k měření (autor)



Příloha č. 16 Kotoučová pila připojená k měřenému stroji (autor)





Příloha č. 17 Kuželová štípačka připojená k měřenému stroji (autor)





Příloha č. 18 Vozidlo Mazda 626 (autor)





Příloha č. 19 Montáž motoru Mazda 626 (autor)





Příloha č. 20 Generátor vlastní konstrukce (autor)



Příloha č. 21 Claas Arion 520 při v průběhu měření (autor)





Příloha č. 22 Zetor 7011 v průběhu měření (autor)





Příloha č. 23 Záložní generátor použitý při měření (autor)

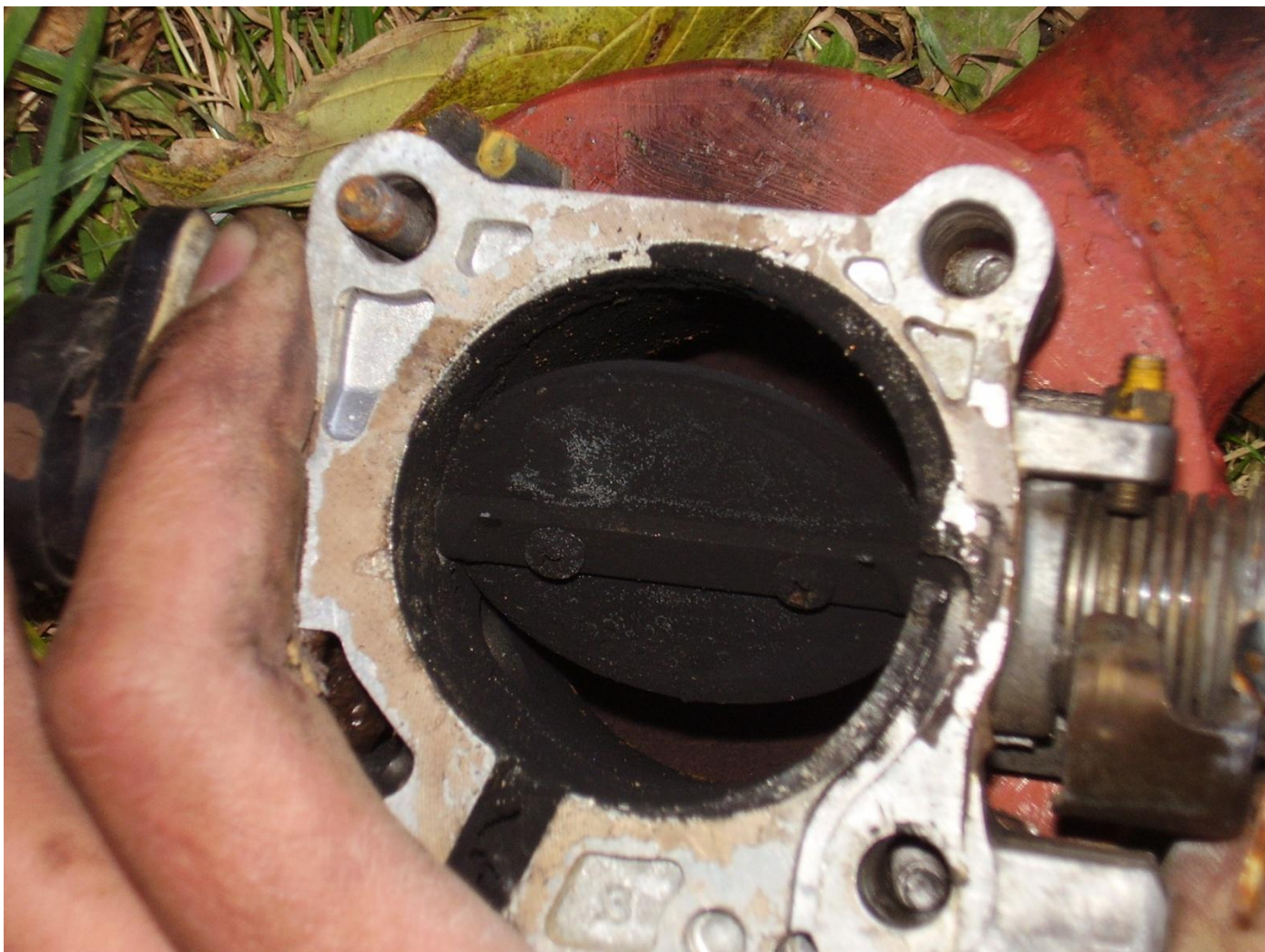


Příloha č. 24 Elektrické topidlo použité při měření (autor)





Příloha č. 25 Průběh měření



Příloha č. 26 Koroze směšovače (autor)



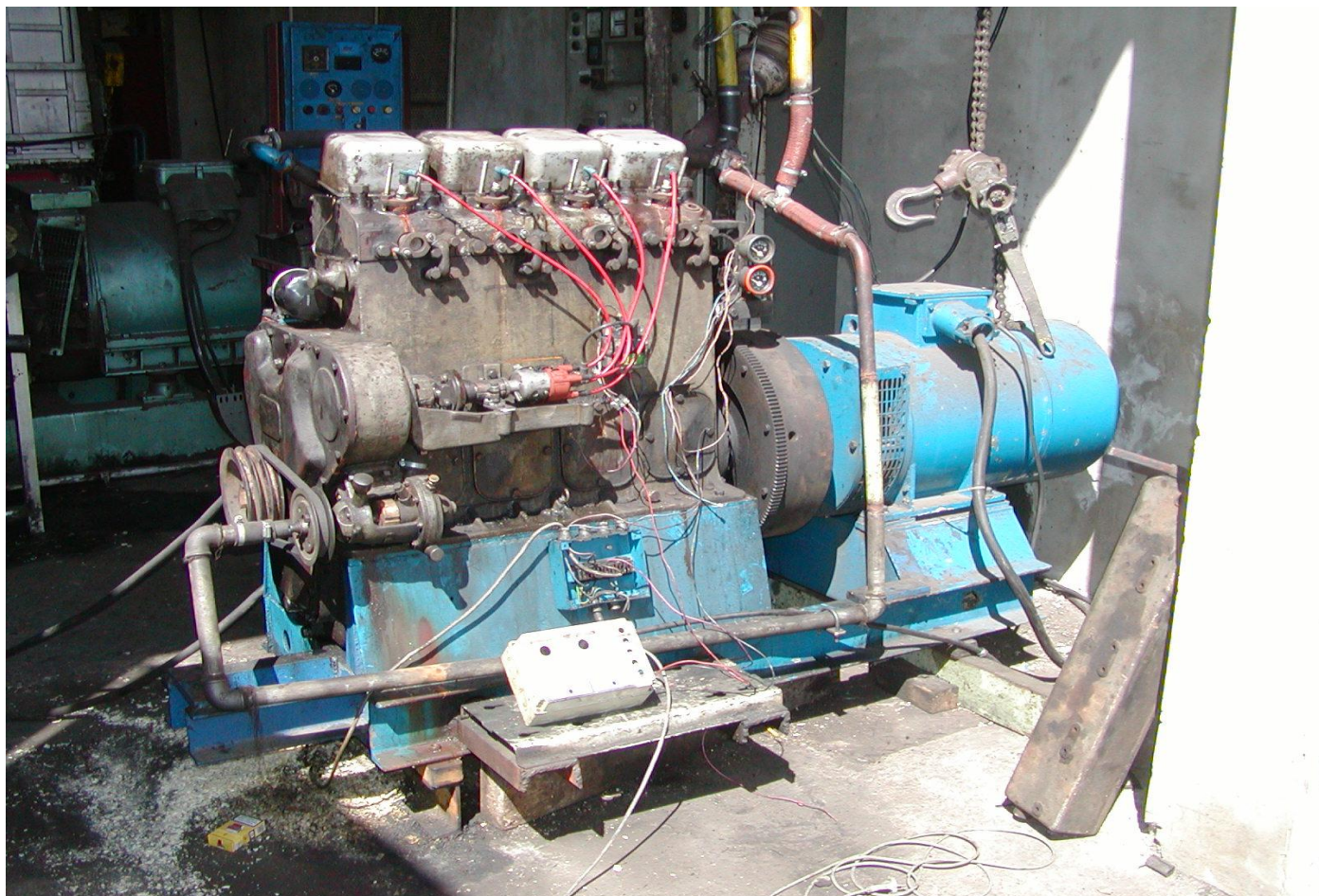


Příloha č. 27 Ruční ovládání směšovacího poměru (autor)



Příloha č. 28 Přestavba elektronicky řízeného motoru Citroen (autor)





Příloha č. 29 Konverze vznětového motoru na zážehový (Ing. Antonín Marčák)