

Oponentský posudek habilitační práce Spalovací motor s pohonem na plynné alternativně palivá, Ing. Andrej Chríbik, PhD., Žilina 2024

Posudek byl vyžádán dopisem děkana Strojní fakulty Žilinské univerzity v Žilině ze dne 17. 12. 2024 Č.j.25201/SjF/2024-pvv. Habilitační práce obsahuje 116 stran včetně příloh.

Práce se soustřeďuje na zhodnocení dopadů pyrolýzních plynů z odpadu, hlavně komunálního nebo technologického, v procesu Waste-to-Energy s výhledem na použití těchto plynů jako paliva pro zážehové spalovací motory menších výkonů, vhodných pro mikrokogenerační jednotky při současné výrobě elektřiny a tepla. Hlavními částmi práce jsou

- shrnutí výsledků pyrolýzních procesů pro vybrané vzorky plynů velmi rozdílného složení s obsahem metanu, etanu, oxidu uhelnatého a vodíku jakožto spalitelných plynů s případnou příměsí „inertních“ složek, oxidu uhličitého a dusíku;
- návrh a realizace přestavby motoru Lombardini LGW 702 na zážehové provedení a doplnění instrumentace zkušebního stanoviště pro výzkum průběhu a optimalizaci vlastního spalování;
- doplnění vyhodnocovacího programového vybavení pro termodynamickou analýzu cyklu;
- provedení a zpracování měření na motoru pro vyhodnocení působení jednotlivých složek paliv, které ve směsi interagují s nelineárními dopady na parametry motoru;
- zobecnění závěrů pro použití těchto alternativních paliv v budoucích jednotkách distribuované energetiky.

K silným stránkám habilitační práce patří shromáždění údajů o aktuálně využitelné, ale dosud nepříliš prozkoumané oblasti alternativních paliv v literární rešerši, zajištění směšování syntetických vzorků plynů, pečlivá příprava měření z hlediska hardwaru i softwaru a hlavně provedení velkého rozsahu měření podle jednotné metodiky, poskytující dobře zdokumentovaná a vzájemně porovnatelná data nejen pro účely této práce, ale i pro následný vývoj mikrokogeneračních jednotek. Výsledky jsou vhodně zobecněny.

K problematičtějším stránkám práce patří nedostatečný rozsah rešerše samotných provedení plynových motorů, kde lze hledat inspiraci i pro levná řešení mikrokogeneračních motorů.

Kromě toho by si práce zasloužila zasazení do poněkud širšího rámce jak energetických bilancí při výrobě pyrolýzních plynů, tak alespoň hrubé zhodnocení účinku těchto paliv na výměníky a katalyzátor mikrokogeneračních jednotek. To by umožnilo úplné vyhodnocení nejen obdoby Tank-to-Wheel, TTW přístupu u vozidel, ale vlivu celého řetězce přeměny energií (Well-to-Wheel, WTW). Samotné provozní otázky, zejména vliv dehtů, leží samozřejmě už za cílem habilitační práce.

Při plánování „ideálních“ experimentů by měl být zvětšen rozsah

- zkoušených kompresních poměrů s jejich optimalizací spolu s předstihem zážehu pro nalezení kompromisu mezi mezí klepání a nejlepší účinností (nabízí se s ohledem na kolísání složení plynu i teploty nasávaného vzduchu adaptivní regulace předstihu),
- časování ventilů včetně millerizace,

- změn proudového pole během sání, komprese a hoření (nepřesně nazývaného „turbulencí“) s možným ovlivněním úpravami tvaru spalovacího prostoru při změnách geometrického kompresního poměru,
- údajů o škodlivinách ze spalování i účinnosti trojcestného katalyzátoru, pokud jde o stechiometrické směsi.

Provedení měření v takovém rozsahu by zřejmě narazilo na **dlouhodobě podfinancované vybavení laboratoří**, jehož náprava ležela mimo možnosti uchazeče, jak si jako oponent plně uvědomuji. Absenci měření v chudých směsích i při částečných zatíženích nepovažuji pro levné nepřepřítované motory mikrokogenerace za chybnou. Všechny uvedené problémy by mohly být však při definování rámce experimentů alespoň zmíněny.

Dílčí připomínky k práci jsem připojil do přílohy. Cílem není zvýraznění diskutabilních částí práce, ale spíše využití dílčích závěrů v dalším výzkumu i při formulaci textů publikací. Pod symbolem F jsou v příloze uvedeny připomínky formální.

K diskusi během obhajoby vybírám následující otázky:

1. Str. 26 – co znamená „kompresní poměr, který se nejlépe osvědčil?“
2. Str. 28 – jaká je přesnost dodržení přebytku vzduchu při přesné regulaci tlaku plynu „nulovým regulátorem“ na tlak vzduchu před vstupem do Venturiho trubice (Hellenschmidtův diagram)?
3. Str. 31 – jak byl průtokoměr Bronkhorst kalibrován pro jednotlivé zkoušené vzorky plynů, je uváděná nejistota měření reprezentativní?
4. Str. 36 – uváděné metody hledání aditivního členu k tlakovému signálu piezoelektrického snímače (zejména náhradou komprese polytropou) předpokládají přesné určení horní úvratě. S jakou přesností byl tento úhel zjištěn?
5. Str. 40 – jaké jsou hlavní chyby při použití „zdánlivé rychlosti vývinu tepla“ (apparent rate-of-heat-release, AROHR), vyhodnocované v práci, bez korekce na sílení tepla do stěn?

Závěry rozdělují do okruhů, zadaných děkanem Sjf ŽU v doprovodném dopise.

1. *Odpovídá námět oboru habilitace, je aktuální z hlediska současného stavu oboru?*
Práce se zabývá velmi aktuálním tématem jak z hlediska racionálního využití různých odpadů komunitních i technologických (např. ze zpracování dřeva), tak pro maximalizaci využití chemické energie alternativního paliva nejen pro výrobu elektrické energie, ale i technologického nebo otopného tepla. Současně mikrokogenerace může při větším nasazení pomoci při udržování stability sítě, ohrožené používáním občasných zdrojů energie OZE. Při dostatečném rozšíření mikrokogenerací lze očekávat i příznivé pořizovací ceny jednotek. Proto je odpověď na tuto otázku jednoznačně kladná.
2. *Byly podstatné části habilitace publikovány na potřebné vědecké úrovni?*
Odkazy v práci i v soupisu publikací ukazují, že toto kritérium bylo rozhodně splněno. Při posuzování počtu publikací nutno respektovat fakt, že experimenty na motorech jsou z hlediska přípravy i provedení samotných měření velmi časově náročné.
3. *Jsou uváděné práce publikovány v renomovaném recenzovaném vědecko-odborném tisku?*
I zde soupis publikací přesvědčivě demonstruje publikaci v prestižních mezinárodních impaktovaných časopisech. Oceňuji, že se publikace zaměřily na fakticky přínosná fóra odborníků (např. SAE), kde je naplněn smysl publikace, nejen na formálně vybrané

časopisy s vysokým impakt-faktorem, avšak s malým dopadem na komunitu odborníků motorářů.

4. *Vyplývá z uváděných prací uchazeče, že se jedná o pracovníka s významnou vědecko-pedagogickou erudicí?*

Uchazeč je dlouhodobě v motorářské komunitě znám svým systematicky rozvíjeným zaměřením na alternativní plynná paliva, kde se vypracoval mezi přední odborníky v této oblasti. Svými výsledky pomohl udržet nejen motorářský výzkum v laboratořích STU SJF Bratislava, ale reflektuje je i ve své pedagogické praxi, jak plyne z jeho přehledu pedagogické činnosti. Jde tedy o pracovníka s významnou vědecko-pedagogickou erudicí.

5. *Prokazuje práce svou formou a zpracováním velmi dobré didaktické schopnosti pracovníka?*

Práce je přehledná a ve své popisné části ukazuje příklad zodpovědného zpracování a bezprostředního popisu i zobecnění experimentálních dat. Pro didaktiku jsem postrádal poněkud explicitnější důraz na jednoduché souvislosti mezi dosahovaným momentem motoru při různých otáčkách a v práci vyhodnocenou objemovou výhřevností směsi (tedy hustotou chemické energie ve směsi), účinností naplnění válce, která je u nepřepřehledného motoru na vnější rychlostní charakteristice závislá hlavně na otáčkách a celkovou účinností motoru (na brzdě), ovlivněné při konstantním časování ventilů a kompresním poměru rychlostí plamene i složením spalin z hlediska trojatomových a víceatomových plynů. Ze zobecnění zjištěných výsledků se totiž tyto závislosti plně potvrdily, ale toto jednoduché vysvětlení jsem v práci nenašel. Na druhé straně nepokládám za nutné komentovat průběhy měrné spotřeby paliva (na rozdíl od výsledné účinnosti motoru), které nejsou při velmi proměnlivé hmotnostní výhřevnosti paliv vzájemně srovnatelné a mají význam jen pro dimenzování palivového systému mikrokogeneračních jednotek, jimiž se práce však nezabývá.

6. *Prokazuje odezva na práce a dosavadní činnost uchazeče nepochybné uznání vědecko-odbornou komunitou?*

Citační odezva zejména na mezinárodní publikace je adekvátní, nemluvě o slovenských citacích (s vyloučením autocitací). K nepřímé odezvě nutno připočíst i úspěšnost v udělených výzkumných projektech ve funkci řešitele nebo spoluřešitele za STU SJF. Zejména bych vyzdvihl evropský projekt 313011V334. Je mi známa též jeho aktivita v konsorciích připravujících další projekty, které sice nebyly přijaty, ale již samo přizvání do konsorcia představuje uznání uchazečových kvalit.

Podle mého názoru habilitační práce, dosavadní výsledky uchazeče a jejich ohlas odpovídají požadavkům na udělení vědecko-pedagogického titulu docent. Doporučuji tedy jednoznačně pokračovat v habilitačním řízení.

V Praze 21. 1. 2025

Příloha – vybrané konkrétní připomínky

Str. 11 – užitečná by byla rešerše provedení plynových motorů pro kogeneraci

F-Str. 12 – název “syntézní plyn“ bývá vyhrazen pro směsi vodíku a oxidu uhelnatého nejen pro FT syntézu, ale též pro metanizaci a pro výrobu metanolu. Některé zmiňované procesy jsou součástí jiných výrob, např. parní reforming metanu je jeden z velmi rozšířených způsobů výroby vodíku samotného, buď z fosilního NG nebo z biometanu.

Str. 12 – vyšší výhřevnost pyrolýzních plynů proti zplyňované surovině je dána přívodem tepla pro pyrolýzu.

Str. 12 – při pyrolýze pneumatik i při zpracování některých kanalizačních odpadů na bioplyn je problematický obsah sirovodíku nebo oxidu siřičitého.

F Obr. 2.1 – chybí legenda ke dvěma posledním položkám.

Str. 15 – pyrolýza plastového odpadu není obvykle CO₂ neutrální (plasty z ropných uhlovodíků), avšak alespoň částečně recyklací fosilního uhlíku přínosná.

F Str. 16 – tepelnou účinností je zřejmě míněn stupeň využití chemické energie paliva pro technologické nebo otopné teplo.

Str. 17 – jednotlivé energetické parametry KVET by bylo záhodno přesněji definovat a současně zpřesnit terminologii z hlediska racionální termodynamiky (např. teplo nebo práce jsou jen procesy s neúplným diferencíálem, nikoli energie s jejich stavovou podstatou).

Str. 21 – některé parametry by měly být dobře definovány (meze zápalnosti, teplota vznícení!), protože jsou stanoveny z hlediska požární bezpečnosti, ale pro poměry v motoru nejsou použitelné. Metanové číslo je velmi kontroverzní ukazatel, od něhož se v posledních 10 letech ustupuje.

Str. 25 – co znamená „kompresní poměr, který se nejlépe osvědčil?“

F Str. 27 – „difuzor“ (z karburátorové hantýrky) je ve skutečnosti Venturiho trubice.

Str. 28 – jaká je přesnost dodržení přebytku vzduchu při přesné regulaci tlaku plynu „nulovým regulátorem“ na tlak vzduchu před vstupem do Venturiho trubice (Hellenschmidtův diagram)?

Str. 31 – jak byl průtokoměr Bronkhorst kalibrován pro jednotlivé zkoušené vzorky plynu, je uváděná nejistota měření reprezentativní?

Str. 36 – uváděné metody hledání aditivního členu k tlakovému signálu piezoelektrického snímače (zejména náhradou komprese polytropou) předpokládají přesné určení horní úvratě. S jakou přesností byl tento úhel zjištěn?

Str. 40 – předpoklad o nulovosti 3 členů vztahu (4.12) je chybný, u těsného spalovacího prostoru platí jen pro toky entalpie. Zanedbání podstatných tepelných toků do stěn znemožňuje odhadovat chemickou účinnost hoření, diferencíál celkové hmotnosti plynu ve válci je sice nula, ale derivace vnitřní energie je spočtena chybně, protože vnitřní energie není v tomto případě jen funkcí teploty, ale též proměnlivého složení! Doporučuji vycházet ze základních rovnic termodynamiky, ne z potenciálně chyby působícího algoritmu Rassweiler-Withrow a použít spíše formu s entalpií, která je k dispozici v tabelované formě pro všechny látky z alternativních paliv, a to včetně reakční entalpie. Pak výpočet změny složení automaticky poskytne uvolněnou

chemickou energii při aktuální teplotě ve válci. Není tedy nutná Kirchhoffova korekce výhřevnosti. Kromě toho jej lze snadno doplnit o výpočet rovnovážného složení pomocí Holubovy metody (minimum volné entalpie), což je zvláště žádoucí při spalování stechiometrické směsi. Jako numerický algoritmus pro určení časového průběhu uvolňované chemické energie, vycházející i z komplikovanějších zónových modelů dějů ve válci (dělení přinejmenším na spálenou a nespálenou oblast s velmi rozdílnými teplotami) lze doporučit iterační algoritmus používající rovnice přímé metody pro simulaci tlaku ve válci, známý jako Three Pressure Analysis – Gamma Technologies.

Str. 44 – při vyhodnocení skutečného toku chemické energie z paliva je možné definovat počátek i konec hoření podle smluvních procent shořelé směsi – doporučuje se 1% nebo 10% jako indikátor ukončení fyzikálně-chemicky neexistujícího „průtahu zážehu“ a 90 nebo 95% jako smluvní konec hoření. Metodika dle obr. 4. 12 je fyzikálně nevhodná, protože vychází z uvolňování chemické energie po odečtení významného přestupu do stěn. Tyto chyby se pak odrážejí i v náhradních Vibeho funkcích.

Str. 45, Tab. 5.1 – zatímco některé energetické parametry lze alespoň pro ideální plyn odhadnout ze skalárních součinů, pro jiné – jako meze zápalnosti – to zřejmě neplatí.

F Str. 48 ad. – jednotlivé varianty na grafech by měly být odlišeny typem čáry nebo tvarem bodů, protože barvy jsou špatně rozeznatelné.

Str. 48 – konstatování vlivu složení paliva na parametry motoru při konstantním úhlu předstihu je pouze popisem zjištěné závislosti s jasně neoptimálním předstihu pro rychle hořící paliva; adekvátní je porovnání při optimálním úhlu předstihu, kde se pak projevuje kombinace vlivu hustoty energie ve směsi a vlivu rychlosti hoření na celkovou účinnost motoru, jak je zmíněno v textu posudku.

Str. 51 – parametry Vibeho funkce se hledají LINEÁRNÍ regresí metodou nejmenších čtverců po dvojnásobné logaritmické transformaci ROHR v závislosti na poměrném úhlu (času) hoření v intervalu od smluvního počátku do smluvního konce hoření. Z fyzikální podstaty odvození Vibeho funkce je zřejmé, že parametr **a musí být konstantní** (což je shodou okolností v obr. 5.6 zhruba dodrženo ve většině případů). Původně Vibem navržená hodnota $a=6,908$ dává numericky nestabilní výsledky pro smluvní konec hoření při 99.99% shořelého paliva, ale pro smluvní úhel konce hoření při 95% shořelého paliva vychází $a=3$ a úhel konce hoření má přitom stále fyzikální obsah. Oblast před smluvním začátkem hoření (s úspěchem po 40 let používáme začátek hoření při shoření 1%, ale v literatuře se najdou i údaje pro 10%) se pak extrapoluje zpětně bez vlivu na výsledný průběh tlaku.

Str. 53 – vedle objemové kontrakce při hoření $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ proti objemově neutrálnímu spalování $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ je při rostoucím obsahu CO významný i pokles rychlosti hoření; při hoření paliva s obsahem metanu mezi 4.9-13.9% však – snad vlivem neoptimálního počátku hoření – moment nenarostl (obr. 6.1), naopak mírně poklesl. Proto:

Str. 56 – důvod přechodu k jisté intenzitě klepání při obsahu metanu mezi 4.9-13.9% a její následné vymizení při vyšším obsahu metanu by bylo vhodné osvětlit dalšími pokusy.