

Posudek disertační práce

Jméno kandidáta:	Ing. Ladislav Veselý (Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze)
Název disertační práce:	Study of Power Cycle with Supercritical CO ₂
Studijní doktorský program/obor:	Strojní inženýrství/Energetické stroje a zařízení
Oponent:	Doc. Ing. Petr Eret, Ph.D. (Katedra energetických strojů a zařízení, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni)
Termín odevzdání posudku:	do 20. 7. 2018

Souhrn

Disertační práce pana Ing. Ladislava Veselého se týká teoretického výzkumu tepelných cyklů pracujících s nečistým oxidem uhličitým (CO₂) v superkritickém stavu (S-CO₂). Nečistoty pracovního média jsou zdůvodněny chemickou reakcí CO₂ s materiály komponent cyklu, netěsnostmi systému, stykem s lubrikanty nebo chtěnou přísadou pro detekci netěsností systému. Charakteristickým jevem těchto cyklů je drastická změna hustoty pracovního média při malých změnách teploty a tlaku, zejména v okolí kritického bodu, a vysoký pracovní tlak. To umožňuje extrahovat velké množství energie ze zařízení, které je poměrně malé. Tyto systémy o širokém potenciálu využití jsou stále ve fázi teoretického a experimentálního výzkumu a pro budoucí komerční aplikace je nutno rozšiřovat znalosti o těchto tepelných systémech. Z tohoto důvodu je předkládaná disertační práce potřebná.

Disertační práce má celkem 157 stran a 10 kapitol, z nichž kapitoly 6 – 9 řeší cíle práce. Za hlavní cíl práce (kap. 6) je stanovena identifikace efektu různých pracovních směsí CO₂ na výsledné parametry tepelných cyklů, včetně vymezení maximálního podílu sekundární složky ve směsi bez dopadu na cyklus. Vedlejší cíle jsou popis vlivu směsí na zásadní komponenty oběhu (kompresor, turbína a výměník), optimalizace S-CO₂ cyklů a technicko-ekonomické zhodnocení S-CO₂ cyklů. Tyto cíle jsou dosaženy v kapitolách 7, 8 a 9.

Autor analyzuje vliv jedenácti hypotetických pracovních směsí na chování třech základních cyklů: paralelní komprese (s dělením toku pracovního média), sériová komprese (bez dělení toku pracovního média) a paralelní komprese s dělenou expanzí. Výzkum byl nejprve proveden pro binární směsi CO₂ s He, Ar, CO, N₂, O₂, H₂S, H₂, CH₄, Xe, Kr a SO₂ a to pro různé podíly druhé substance (1 %, 5 % až 10 %). Je ukázáno, že všechny zkoumané látky, zejména He, mají negativní vliv na účinnost všech cyklů, výjimky jsou pouze H₂S, Xe a SO₂. Při množství sekundární látky pouze do 1 % je tento vliv zanedbatelný a to i v okolí bodů maximálních účinností cyklů s čistým CO₂. Jinak je nutno zohlednit vliv směsí při návrhu S-CO₂ cyklů. Při analýze jednotlivých komponent S-CO₂ oběhu je reportováno, že vliv směsí na příkon kompresorů v paralelní i sériové kompresi může být výrazný a negativní pro všechny zkoumané substance s výjimkou H₂S, Xe a SO₂. Výsledky ukázaly zanedbatelný ale přesto pozitivní vliv směsí na výkon turbíny ve všech vyšetřovaných konfiguracích S-CO₂ cyklů. Vliv směsí byl také zkoumán na minimální teplotní rozdíl (pinch point) mezi ochlazovaným a ohříváním médiem u výměníků tepla zahrnutých v cyklu. Zde nešlo výsledky zobecnit a vliv směsí byl rozdílný pro různé druhy výměníku tepla a provozní podmínky. Například u rekuperačních výměníků, příměs s pozitivním vlivem na účinnost cyklu způsobila nárůst minimálního teplotního rozdílu a naopak. Opačný trend byl pozorován u chladičů a ohříváků. Dále bylo ukázáno, že se vliv směsí výrazně projeví

na hodnotě součinitele přestupu tepla či Nusseltově a Prandtlově číslech. V rámci optimalizace S-CO₂ cyklů s příměsí se autor soustředil na vliv vstupní teploty média na výkon kompresoru a turbíny. Pokles vstupní teploty na kompresoru má obecně za následek zmenšení výkonu kompresoru, zvětšení účinnosti a čistého výkonu cyklu. Opět pracovní směsi s H₂S, Xe a SO₂ vykázaly o něco málo lepší parametry než cyklus s čistým CO₂. Technicko-ekonomická analýza S-CO₂ cyklů s binárními směsí ukázala poměrně srovnatelné ekonomické parametry s čistým S-CO₂ cyklem. Příměsí s negativním efektem na cyklus snižují kapitálové náklady, zvyšují specifické náklady a mají z dlouhodobého hlediska zanedbatelný vliv na ekonomické parametry.

Práce v celku ukazuje, že je nutno při návrhu či optimalizaci S-CO₂ cyklů uvažovat vliv nečistot či příměsí. Výsledky jsou převážně prezentovány pro binární směsi. V praxi se bude vyskytovat vícesložková směs a autor poskytuje dílčí výpočty i pro takové případy. Zde je závěr, že vliv bude dán složením směsi, přičemž přísada, která měla pozitivní účinek u binárních směsí, se tak projeví i ve vícesložkové směsi. Výsledky disertační práce pana Ing. Ladislava Veselého byly zejména publikovány ve sbornících vyhlášených mezinárodních konferencích a již mají úspěšnou odezvu. Dle abstraktové a citační databáze Scopus lze od roku 2014 detekovat 6 celkových citací (5 bez autocitací vybraného autora).

Komentáře

Práce obsahuje několik nepřesností, které ji ale neubírají na vědecké kvalitě např.:

- str. 19, rov. 3.3: Univerzální plynová konstanta má hodnotu 8.315 J/mol/K nikoliv 8315 J/mol/K.
- str. 20, rov. 3.8: y_i má být Y_i .
- str. 36, řádek 3: Z obrázků plyne, že analýza byla provedena pro rozmezí tlakového poměru $Ra = 1 - 3$ nikoliv 1.5 - 3.
- str. 68: Obrázky 7.30, 7.31, 7.32, 7.33 ačkoliv ukazují odlišné výsledky, mají stejné popisky. Popisek by měl zmínit podmínky, za kterých bylo dosaženo prezentovaných výsledků. Ze stejného důvodu je těžké se zorientovat u dvojic obrázků 7.34, 7.35 a 7.36, 7.37 a ani příslušný text to nespécifikuje. Podobný problém má většina obrázků do konce kapitoly 7.
- str. 75, poslední odstavec, řádek 5: Slovo „negative“ musí být nahrazeno slovem „positive“, aby věta dávala smysl.
- str. 88, obr. 8.2: Popisek má být „čistý výkon cyklu“ nikoliv „účinnost cyklu“.
- str. 108, tabulka 9.1: U parametrů technicko-ekonomické analýzy je vhodnější označení „economic assumptions“ než „boundary conditions“.

Otázky

- Kapitola 3 je přehledem stavových rovnic reálných plynů a jejich upřesnění pro směsi plynů. Je uvedeno, že Peng-Robinson rovnice či Soave-Redlich-Kwong rovnice poskytují přesnější odhady vlastností směsí i pro CO₂. Které z těchto rovnic jsou vlastně použity pro výpočty vlastností směsí CO₂ (v použitých aplikacích NIST REFPROP, CoolProp, TREND 2)?
- str. 26, řádek 1: Z textu není zřejmé, jaký je tlakový poměr individuálních kompresorů v sérii. Existuje nějaký optimální dělicí tlak i pro S-CO₂?
- str. 34, obr. 6.2: Jaká rovnice byla použita pro vykreslení reálné komprese a expanze?
- str. 36, řádek 2: Je škoda, že autor do modelu nezahrnul i nezbytné tlakové ztráty. Jak by se například projevíly tlakové ztráty v tepelných výměnících na stanovení účinnosti či výkonu systému?
- str. 36, odst. 6.2, řádek 8: Dle obrázku 6.3 na str. 37 je maximální účinnost cyklu s paralelní kompresí 33.44 % a je naznačena body $P_2 = 30$ MPa a $Ra = 2.65$. Tomu ovšem neodpovídají v textu uvedené body $P_2 = 27$ MPa a $Ra = 3$? Prosim okomentovat.

- str. 39, řádek 5: Autor uvádí, že nárůst účinnosti cyklu pro H₂S je lineární pro všechny zkoumané koncentrace (tj. 90 – 100 %). To je ovšem v rozporu s příslušným obrázkem 6.9 na str. 40, kde je trend vykreslen křivkou? Prosím okomentovat.
- str. 50, řádka 6: Pokud budeme uvažovat, že dle obrázku 6.3 na str. 37 maximální účinnost cyklu s paralelní kompresí nastává při P₂ = 30 MPa a Ra = 2.65 (nikoliv P₂ = 27 MPa a Ra = 3), bude výkon kompresoru 1 stále menší než kompresoru 2?
- str. 65, obr. 7.26: Jak je definován relativní teplotní rozdíl (osa y) v tomto obrázku a dalších?
- str. 89, řádka 2: Proč je uvedeno, že nárůst čistého výkonu je lineární, když obr. 8.2 na str. 88 lineární trend neukazuje?
- str. 94, řádka 1: Proč je uvedeno, že výkon kompresor v okolí kritického bodu s výjimkou směsi s H₂S klesá, když obr. 8.8 na str. 93 ukazuje, že pokles výkonu platí i pro H₂S?
- str. 106: Jakých hodnot nabývá je „n“ v rovnicích 9.2 a 9.3?

Celkové hodnocení

Práce je přehledná, konzistentní a logicky uspořádaná. Autor prokázal velmi dobré znalosti o úrovni současného stavu problematiky a vhodným způsobem použil odpovídající metody řešení k naplnění cílů práce. Oceňuji, že je práce napsána v anglickém jazyce a kromě několika málo překlepů, chybějících předložek a gramatických chyb má jazyková stránka velmi dobrou úroveň. Její teoretické výsledky jsou zajímavé, originální a přínosné. Kandidát je prezentoval a publikoval jako hlavní autor ve sbornících vyhlášených mezinárodních konferencí. Paradoxně většího publikačního úspěchu dosáhl jako hlavní autor či spoluautor u impaktovaných článků, které nejsou přímo navázané na jeho disertační práci. To ovšem potrhuje kvalitu jeho širší vědecké práce.

Závěr

Práce plně vyhovuje požadavkům na udělení akademické hodnosti Ph.D. a doporučuji její přijetí k obhajobě.

V Plzni dne 04. 07. 2018

Petr Eret