

Oponentní posudek diplomové práce studenta Josefa Kareise

Název: Kryogenní separace CO₂ ze spalin

Rok: 2022

Ústav procesní a zpracovatelské techniky / Procesní inženýrství

Úkolem dle zadání bylo zpracování rešerše navržení vlastního konceptu procesu, jeho parametrů, sestavení modelu pro simulační program a jeho pomocí provedení základních bilančních hmotových a tepelných výpočtů pro definované provozní stavy.

Zadané téma je velmi závažné z hlediska energetické budoucnosti lidstva, pro kterou je omezení uhlíkových emisí základním úkolem prevence nebezpečného vývoje, který aktuálně probíhá. Přitom se zjevně po několik dekad nelze obejít bez využití uhlovodíkových paliv, ze kterých se LNG jeví jako nejméně zatěžující uhlíkovými emisemi proti uhlí a naftě.

Oponentovi není známo, že by se někdo zabýval využitím chladu LNG, dováženého ke spalování v energetických zdrojích, k separaci CO₂. Přitom LNG pro výrobu elektrické energie, případně s využitím tepla, je poměrně rozšířené pro malé zdroje do výkonů do stovek MW v místech, kam není možné nebo ekonomické zavedení potrubního plynu, například na ostrovech, nebo v sídlech, vzdálených od civilizační infrastruktury.

Oponentovi není znám případ využití dováženého kapalného kyslíku namísto spalování pomocí vzduchu, nebo, v případě oxyfuel procesu, který umožňuje poměrně snadnou separaci CO₂ a pro který se (u velkých zařízení) používá výroby kyslíku v plynném stavu dělením vzduchu na místě.

U malých zařízení však nelze a priori vyloučit ekonomičnost centrální výroby kapalného kyslíku a jeho dovozu k jednotlivým malým energetickým zdrojům, odhadem, řekněme, desítek MW. Z tohoto hlediska se jeví i tato část zadání perspektivní pro technicko-ekonomické zhodnocení celého řetězce od paliva do CO₂ uloženého v zemních vrstvách.

Po úvodu, v druhé kapitole, se diplomant zabývá, na základě rešerše, klasifikací systémů izolace CO₂ před nebo po spalování a specificky po spalování v oxyfuel procesu.

V třetí kapitole charakterizuje různé procesní technologie používané v procesech izolace CO₂: Absorpce, adsorpce, membrány, chemické spalování a biologický proces s využitím mikrořas.

Pro vlastní řešení tématu práce je nejdůležitější čtvrtá kapitola se studiem vlastností plynů od vysokoteplotní do kryogenní oblasti. Dále uvádí přehled čtyř typů kryogenních procesních technologií s různými způsoby chlazení a zachycování CO₂, většinou desublimací, vymrzáním. Studium a řešení těchto procesů lze považovat z inženýrského hlediska za obtížné vzhledem k výskytu všech tří skupenství a faktu, že trojný bod CO₂ je při teplotě -56°C a tlaku 0,52 MPa, nad kterýmžto tlakem musí být CO₂ udržován, má-li být získáván v kapalném stavu. Z toho důvodu nabývají významu procesy desublimace. Kapitola je zakončena přehledem výhod a nevýhod kryogenní separace.

V páté kapitole je navržen koncept konkrétního autorova řešení procesu.

Autor představuje dva procesy kryogenní separace s kompresí buďto kyslíku i metanu na vstupu do spalovací komory nebo kompresí spalin na výstupu ze spalovací komory.

V šesté kapitole pod názvem Ověřovací studie jsou odpovědně představeny zjednodušující předpoklady pro výpočtové zpracování čtyř koncepčně odlišných technologií s využitím oxyfuel procesu, tedy spalování metanu kyslíkem, v následujících částech práce a korelační koeficienty rovnic

pro termodynamické vlastnosti procesních proudů surovin a spalin. Dále jsou charakterizovány dílčí procesní operace a přístup k jejich výpočtovému řešení. Zde je, také ve vztahu k vybrané technologii diskutabilní stechiometrické spalování metanu kyslíkem z hlediska předpovědi teploty spalovacího procesu a spalin. U oxyfuel procesu, představeného například R. Allamem (2003) se využívá pro udržení teploty spalin v technicky realizovatelných mezích recirkulace CO₂ po vykondenzování vody na vstup do spalovací komory. Tak vlastně CO₂ hraje roli inertu, kterým je u běžných spalovacích procesů dusík.

Podrobněji do koncepce procesů dává autor nahlédnout v kapitole 7 Simulace v programu Aspen Plus.

V případě komprese kyslíku před spalovací komorou se použití kompresoru jeví jako nadbytečné. Pokud je k dispozici kapalný kyslík, je možné tlakovat jej přímo ve skladovacím zásobníku pomocí takzvaného pomocného odpařovače (pressure build-up vaporizer) do kterého se odebírá část kapalného kyslíku a jeho návratem v plynné fázi nad hladinu v tanku se za použití regulátoru udržuje tlak v tanku, při němž pak probíhá proces následného odpařování technologického proudu kyslíku. Tím se dosáhne významných úspor investičních i provozních nákladů a lepší energetické účinnosti. Technologie komprese před spalováním by se tak značně zvýhodnila a mohla by se vzhledem k stanovisku autora, že pouze ta kompresní práce znevýhodňuje jinak optimální PRE-COMP technologii posunout na první volbu.

V kapitolách 8 až 11 autor představuje výsledky hmotových a energetických bilancí pro 3 varianty cyklu s chlazením spalin kapalným kyslíkem a samostatný odstavec věnuje problematice eventuálního využití chladu LNG.

Celý proces od odpaření LNG a LOX až po zkapalnění CO₂ představuje síť výměníků tepla, pro kterou je obvyklé zobrazit průběhy teplot ve všech na sebe navazujících jednotkách systému. Pak je možno posoudit, které místo celkové výměny tepla je limitující z hlediska volby minimálního delta T v systému (takzvaný pinch). Autor uvádí tepelné diagramy výměníků samostatně na více stránkách, což činí pochopení návaznosti, celkové tepelné bilance a jejích limitů obtížnějším.

Oponent si pro svou potřebu doplnil schema cyklu PRE-COMP 1 Komp. teplotami a tlaky a dospěl k některým nejasnostem ohledně volby parametrů:

- 1) Teplo, generované ve spalovací komoře při teplotě 900°C je využíváno pro ohřev vody o tlaku 0,5 MPa na teplotu 163°C, což je cca 10°C nad teplotou varu. Taková jen nepatrně přehřátá pára se hodí na vytápění. Přitom by bylo možno vysokou teplotu spalin použít na ohřev vody o vysokém tlaku pro turbínu tepelné elektrárny, kde se jde až na 550°C což umožňuje vysokou termodynamickou účinnost výroby elektrické energie.
- 2) Poněkud zvláštní je rozdělení teplot v proudu spalin mezi výměníky E111 a E112, které jsou zařazeny seriově jak na straně spalin, tak v protiproudu na straně vody, přičemž první chladí spaliny o 5°C a druhý o 733°C.

Zajímavým postřehem, který autor dále rozpracoval, je posouzení a vyhodnocení vlivu čistoty kyslíku. Inert v kyslíku o čistotě 95%, kterým je převážně argon a podíl dusíku v něm je z hlediska této studie irelevantní. Na obr. 14 autor uvádí spotřebu energie pro výrobu kyslíku. Další aspekt, který by bylo potřeba zhodnotit je vliv inertu na proces kondenzace CO₂, kde vede ke zhoršení součinitele tepla a požadavku na snáročnější separaci kapalné a plynné fáze, přičemž je nutno uvažovat, že odfukovaný inert bude také obsahovat určité (zanedbatelné?) množství CO₂.

V současnosti se kapalný kyslík distribuuje ve velkém o čistotě 99.5% nebo vyšší.

V kapitole 11 autor zvážil možnost využití pouze chladu LNG a dospěl k závěru, že jím lze pokrýt pouze 77% celkové potřeby chladu na kondenzaci CO₂. Oponent doporučuje věnovat pozornost této technologii a její případné optimalizaci, protože potenciál využití LNG pro menší energetické zdroje s eventuální výrobou plynného kyslíku na místě je větší než s dovážením kapalného kyslíku. Z hlediska celkové energetické bilance je nutno vzít v úvahu, že spotřeba elektrické energie na výrobu plynného kyslíku činí kolem 0,4 kg/Nm³, zatímco u kapalného kyslíku je to kolem 1,4 kg/Nm³.

V kapitole 12 autor představuje výsledky porovnání celkem šesti různých procesů a upozorňuje na poměrně malé rozdíly ve využití tepla a značné ve spotřebě energie na kompresory, kde však je dle názoru oponenta možno výsledky korigovat možností eliminace kompresoru při odpařování kryogenní kapaliny tepelnou samokompresí. Zdá se, že některé závažnější rozdíly mezi jednotlivými variantami se projeví až při detailnějším technickém procesně strojním řešení v projekčních studiích (čistota CO₂ pro další využití nebo účinnost separace). Autor navrhuje ještě další hlediska, která by mohla být brána v potaz.

V každém případě autor svou diplomovou prací otevřel prostor pro diskusi o možnosti uplatnění technologie využití chladu zkapalněných plynů (dle oponenta především LNG) pro izolaci CO₂ ze spalin.

Navrhuji, aby autor při obhajobě zodpověděl následující otázky:

- 1) Jak byla stanovena teplota spalin na výstupu ze spalovací komory?
Byly zváženy bezpečnostní otázky kontroly spalovacího procesu metanu s kyslíkem?
- 2) Jaký je účel celého procesu z hlediska využití tepla a vygenerované páry o poměrně nízké teplotě

Celkově je práce přehledná a kapitoly a jejich věcný obsah jsou logicky řazené.

Autor splnil požadavky zadání a překročil je zejména vypracováním šesti variant technologie místo patrně původně zamýšlené jedné, provedl jejich porovnání a upozornil na důležité specifické aspekty, které nemohly být na počátku práce předvídané.

Alternativní pohledy oponenta není potřeba brát jako výtky, ale spíše jako náměty pro budoucí rozvoj řešení této nové technologie.

Navrhuji hodnocení A.

Ing. Václav Chrz, CSc.