

## **Oponentní posudek diplomové práce studenta ČVUT, fakulta strojní, Jaromíra Poura, 2023**

Předmětem diplomové práce je separace CO<sub>2</sub> z bioplynu pro jeho další využití. Toto téma je aktuální jak z hlediska efektivnějšího využití bioplynu, tak i z hlediska snížení emisí CO<sub>2</sub>. Oběma těmito stránkami problému se autor věnuje v diplomové práci.

Práce otvírá problematiku bioplynu obsáhlou rešerší zahrnující vznik bioplynu z biologického substrátu, výrobu surového bioplynu, jeho zušlechťování na biometan se separací CO<sub>2</sub> frakce, a čištění CO<sub>2</sub> frakce pro zkapalnění. Tato analýza zdrojů je nezbytná pro posouzení typických a dalších možných příměsí bioplynu, kromě hlavních složek, metanu a CO<sub>2</sub>, protože právě tyto příměsi rozhodujícím způsobem ovlivňují další technologii dočištění a zkapalnění CO<sub>2</sub>. Tím se otvírá vlastní návrhová část práce, zkapalnění CO<sub>2</sub>.

Rešerše je uspořádána velmi podrobně a může sloužit jako velmi přínosný materiál pro projektanty, kteří potřebují znát celkové souvislosti výroby od výchozích surovin až po finální produkty a alternativy jednotlivých provozních jednotek. Také po formální stránce je rešerše zpracována přehledně a s nadhledem s využitím názorných ilustrací nebo jejich přepracováním do názornější podoby.

Při popisu adsorpčních procesů chybí zmínka o desorpčním mediu, obvykle části vyčištěného plynu a jeho recyklaci, tak jak to autor uvádí v následující části o membránové separaci. Schéma kryogenní destilace směsi CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> je příliš zjednodušené a schematické, aby mohly být pochopeny souvislosti zmíněného generování chladu a separace čistých produktů, aniž by musel čtenář vstoupit do citované literatury.

V závěru rešerše autor demonstruje obecné procesní prvky průmyslové technologie na příkladu konkrétních dodavatelů a jejich technologických linek, jejich provozních parametrů a procesních schémat v souvislosti s teorií procesů. Z příkladů skutečných technologií shrnuje obecné zásady návrhu zařízení a rozsah návrhových parametrů.

Na základě literatury vybral autor dvě schémata procesu pro využití v diplomové práci:

- Zkapalňování s dvoustupňovým vnějším chlazením
- Zkapalňování Joule-Thomsonovým cyklem s cirkulací CO<sub>2</sub>

Pro každou z variant uvádí základní schéma. U druhé varianty se zdá být grafický přehmat na obr. 40 v zapojení páry z prvního separátoru za kompresor místo před něj, jako to je správně z druhého separátoru k prvnímu stupni komprese.

Dále se autor zabývá požadavky na čistotu CO<sub>2</sub> v kategoriích pro sedm různých oborů a specificky pak pro nápojový průmysl a potravinářský průmysl. Vysvětluje a na schématu demonstruje potřebná doplňující zařízení pro tyto požadavky.

Zabývá se také metodami přepravy CO<sub>2</sub> a náklady na přepravu v plynném i kapalném skupenství.

Na základě poznatků z rešerše autor přistupuje k vlastnímu návrhu procesní linky na úpravu bioplynu a úpravu CO<sub>2</sub> frakce. Zvolil třístupňovou membránovou separaci CO<sub>2</sub> z biometanu s výslednou čistotou 0,5% metanu a s prakticky veškerým obsahem vody z bioplynu.

Navrhuje další stupně odstranění vody jednak kondenzací po kompresi, jednak následným adsorpčním sušením, pro které také vybírá optimální adsorbent na základě typu jeho krystalické mřížky.

Na základě dat od výrobce membránové jednotky a dalších informací z rešerše stanoví vstupní složení CO<sub>2</sub> frakce s nejvyšší možnou přesností. K obsahu vlhkosti se dopracuje analýzou separace vody kondenzací za kompresorem surového bioplynu pro různé provozní tlaky. Z toho pak stanoví hmotnost náplně adsorbéru.

Vybírá postupně možné dodavatele doplňujících strojů a zařízení:

- dodavatele vodního chladicího systému pro danou spotřebu chladicí vody,
- Pro externí chlazení vybral jako ekologické chladivo CO<sub>2</sub> a v návaznosti na tuto volbu příslušného dodavatele.
- dodavatele kompresoru CO<sub>2</sub>

Poté se věnuje návrhu schémat pro zkapalňování CO<sub>2</sub> ve třech variantách:

- Izobarické chlazení z vnějšího zdroje,
- kombinace Joule-Thomsonova cyklu s vnějším chlazením,
- kombinace Joule-Thomsonova cyklu s vnějším chlazením a recyklem na mezitlak kompresoru.

Následně přistupuje k simulaci obou variant v programu Aspen Plus, a to nejdříve pro čistý CO<sub>2</sub>, následně pak pro CO<sub>2</sub> frakci daného složení. Po provedení simulace dochází autor k výsledným hodnotám zbytkových koncentrací CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>, které nesplňují požadavky na potravinářskou čistotu. Autorovo správné poznání vlivu vyšší vstupní teploty před škrcením na koncentraci těkavějších příměsí v produktu, které dokládá variantními výpočty, je možno doplnit, že je to výsledkem hmotové bilance, kdy podíl plynného recyklu po „flash“ rozdělení přehřáté kapaliny do stejného tlaku je vyšší a odtud nižší koncentrace těkavějších složek. Obdobně je tomu s klesajícím tlakem před škrcením. Proto by porozumění bilanci pomohlo zařazení sloupce s hmotnostním průtokem plynné frakce do tabulky 41 a 42. Ten je možno orientačně dohledat v tabulce 32 pro případ čistého CO<sub>2</sub> ve výši 36% zpracovávaného CO<sub>2</sub>. Otázka zpracování tohoto proudu není řešena. 10% celkového množství je využito pro regeneraci adsorbéru. Zbýlých 26% je navrženo recyklovat před kompresor membránové jednotky. Dále autor uvádí pro optimalizovaný výpočet snížení na celkové relativní množství recyklu 19%.

Po těchto předběžných variantách přistupuje autor k celkovému schématu technologie, zahrnujícímu i separátor vody a adsorbéry. Současně předkládá i návrh samostatného schématu s použitím destilační kolony na odstranění těkavějších složek při menším průtoku odpadní frakce s návrhem základních procesních toků kolony, ale na základě předpokladu

vysoké ekonomické a provozně technologické náročnosti, jakož i porovnání s literaturou, ji již do modelu nezahrnuje.

V samostatné kapitole provedl autor výpočet uhlíkové stopy, v tomto případě úspory emisí CO<sub>2</sub> jeho záchytem. Záchyt je snížen o 11 až 15% spotřebou elektrické energie technologie.

V kapitole „Diskuse výsledků“ shrnuje autor závěry o ekologii z hlediska uhlíkové stopy, ekonomii provozu z hlediska energetických nákladů a znovu osvětluje problematiku získání produktu s potravinářskou kvalitou se závěrem, že je pro takový účel nutno vybavit zařízení destilační kolonou. Tyto informace zajímají především potenciální investory do této nové technologie.

Celkově lze práci hodnotit jako velmi přínosnou. Autorovi se podařilo pokrýt řadu složek řešení od teoretických základů analýzy procesu za využití rozsáhlého kvalifikovaného využití programu Aspen Plus až po praktické návrhové stupně specifikace strojů a jiných jednotek procesu včetně ekologické problematiky.

Za nejdůležitější poznatky považuji celkovou spotřebu elektrické energie a upozornění na složitost odstranění těkavých příměsí z kapalného CO<sub>2</sub> produktu. Autor prokázal schopnost procesně projekčního řešení složité technologické linky.

Navrhuji hodnocení práce stupněm výborně.

Ing. Václav Chrz, CSc.  
Chart Ferox, Děčín

Dne 22.8.2023