



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## ENERGETICKÁ SPOTŘEBA ROVNOTLAKÉ A RŮZNOTLAKÉ DESTILACE TECHNICKÉHO LIHU

ENERGY CONSUMPTION OF EQUIPRESSURE AND VARIOUS PRESSURES TECHNICAL  
ALCOHOL DISTILLATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DAN AUDY

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. QUIDO SMEJKAL, Ph.D.



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Dan Audy

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Energetická spotřeba rovnotlaké a různotlaké destilace technického lihu**

v anglickém jazyce:

### **Energy consumption of equipressure and various pressures technical alcohol distillation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stěžejní částí práce je posouzení energetické spotřeby rovnotlaké a různotlaké destilace technického lihu

Práce se zabývá porovnáním spotřeb energií při klasickém uspořádání varny lihovaru (tj. při práci destilačních kolon v rovnotlakém uspořádání) s uspořádáním pracujícím na principu rozdílných pracovních tlaků v destilačních aparátech, které umožňuje vícenásobné využití tepla dodaného do zařízení.

Porovnání spotřeb energií bude provedeno pro uspořádání se stejnou produkcí technického lihu a pro shodné fyzikálně chemické vlastnosti vstupní suroviny, produktů a odpadů.

Cíle bakalářské práce:

Úvod do problematiky destilace

- Popis a princip způsobů distribuce vstupní energie v podobě tepla u porovnávaných technologií
- Rešerše existujících projektů v oblasti destilace etanolu.
- Porovnání uvedených uspořádání z hlediska energetické a technické náročnosti.
- Prezentace výsledků

Seznam odborné literatury:

Exner P. Praktická lihovarnická příručka Praha 1998

Hromádko J. Výroba bioetanolu Listy cukrovarnické a řepařské 2010

Dyr J. Lihovarství 1. díl Praha SNTL 1955

Dyr J. Lihovarství 2. díl Praha SNTL 1963

Perry Chemical Engineers Handbook Mc Graw Hill New York 1997

Stehlík R. Termofyzikální vlastnosti VUT Brno 1992

Šesták J. Tepelné pochody – transportní a termodynamická data ČVUT Praha 1993

Pavelek Milan, Termomechanika, CERM, 2003, ISBN 80-214-2409-5

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Quido Smejkal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 23. 11. 2012

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Předkládaná práce porovnává spotřebu tepla dvou jednotek na výrobu technického lihu. Cílem práce je srovnání běžného uspořádání rektifikační koncovky lihovaru s alternativním uspořádáním, založeným na modifikovaném tlakovém profilu zařízení.

První jednotka je založena na klasickém uspořádání varny, pracujícím za atmosférického tlaku. Druhá, alternativní jednotka pracuje s rozdílným tlakem v kolonách. V tomto případě jsou tlaky voleny tak, aby bylo možno pomocí kondenzačního tepla v hlavě přetlakové rektifikační kolony vytápět vařák vakuové záparové kolony. Princip rozdílných tlaků v obou kolonách a vhodná volba tohoto rozdílu umožní navíc výhodné využití přebytečného tepla. Zároveň se zmenší riziko napékání inkrustů ve vařáku záparové kolony, protože tato pracuje za nižších teplot než záparová kolona atmosférického provedení.

Porovnávanými medii v této práci jsou: Množství páry použité pro vařáky obou kolon, množství chladicí vody použité pro kondenzaci a chlazení jednotlivých procesních toků. Dále pak přibližný odhad spotřeby elektrické energie pro čerpadla a další stroje.

Pro obě jednotky je uvažováno jak stejné množství zápary, tak stejné množství produktu srovnatelné kvality.

Produktem je technický líh 96,4% a. a. o teplotě 25°C.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

destilace, rektifikace, různotlaká, atmosférická, ethanol, technický líh, distribuce tepla, bilance

## **ABSTRACT**

This work compares the heat consumption of two units for the production of technical alcohol. The aim is to compare ordinary arrangement of rectifying distillery with an alternative arrangement, based on a modified pressure device profile.

The first unit is based on the classic arrangement brewhouse, working at atmospheric pressure. The alternative unit works with different pressures in columns. In this case, the pressures are chosen so that it was possible to use heat from the head of overpressure rectification column for reboiler of vacuum mash column. The principle of pressure differences between the two columns and appropriate choice for this difference also allows the beneficial use of surplus heat. It also reduces the risk of clinkering incrusts in reboiler mash column because this works at lower temperatures than the mash column atmospheric embodiment.

The comparisons of the media in this work are: The amount of steam used for reboilers of both columns, the amount of cooling water used for condensation and cooling of process streams. Furthermore, an approximate estimate of electricity consumption for pumps and other machinery.

For both units is considered the same amount of mash and the same amount of product of comparable quality.

The product was a technical alcohol 96.4% aa at a temperature of 25 ° C.

## **KEYWORDS**

distillation, rectification, different pressures, atmospheric, ethanol, technical alcohol, heat distribution, review

#### BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE

AUDY, D. *Energetická spotřeba rovnotlaké a různotlaké destilace technického lihu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 33 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Quido Smejkal, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů, odborné literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

V Brně dne 23. 5. 2013

---

Dan Audy



## PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří doc. Ing. Quidu Smejkalovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vedení práce. Dále bych rád poděkoval rodině a všem kamarádům za podporu v průběhu studia a Ing. Jiřímu Hýžovi SPX Czech Republic za spolupráci při volbě čerpadel.



# OBSAH

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY DESTILACE .....	13
1.1 Základní popis technologie .....	13
1.1.1 Mletí.....	13
1.1.2 Propagace.....	13
1.1.3 Fermentace.....	13
1.1.4 Destilace a rektifikace.....	13
1.2 Popis zařízení .....	15
2 POPIS A PRINCIP ZPŮSOBŮ DISTRIBUCE VSTUPNÍ ENERGIE V PODOBĚ TEPLA U POROVNÁVANÝCH TECHNOLOGIÍ.....	16
3 REŠERŠE EXISTUJÍCÍCH PROJEKTŮ V OBLASTI DESTILACE ETHANOLU. ....	17
4 POSOUZENÍ PŘEDPOKLADŮ PLATNOSTI VÝSLEDKŮ V PODMÍNKÁCH ČR ..	18
5 SPECIFIKACE VHODNÝCH SROVNÁVACÍCH KRITÉRIÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	18
5.1 Základní předpoklady procesních bilancí .....	18
5.1.1 Vstupní parametry.....	18
5.1.2 Srovnávací kritéria.....	18
6 CÍLE PRÁCE.....	19
6.1 Postup výpočtu .....	19
6.2 Vzorce použité pro výpočet .....	21
7 PREZENTACE VÝSLEDKŮ .....	23
7.1 Atmosférické uspořádání .....	23
7.1.1 Vařáky, kondenzátory, chladiče .....	23
7.1.2 Čerpadla.....	24
7.2 Různotlaké uspořádání .....	25
7.2.1 Vařáky, kondenzátory, chladiče .....	25
7.2.2 Čerpadla.....	27

8 ZÁVĚR .....	29
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	31
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	32
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	32
SEZNAM TABULEK .....	32
SEZNAM PŘÍLOH.....	33

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY DESTILACE

## 1.1 Základní popis technologie

Surovinou pro výrobu ethanolu jsou vesměs obiloviny a to především obilí a kukuřice. Celá lihovarnická technologie je relativně komplikovaná a lze ji osvětlit v několika základních procesních krocích.

### 1.1.1 Mletí

Obilí se po vyčištění a odslupkování mele pomocí válcových popřípadě kladívkových mlýnů. Vzniklý šrot s velikostí zrna 0,05 – 0,3 mm je skladován v předzásobnících a dále zpracováván.

### 1.1.2 Propagace

V tomto procesu se připravený šrot míchá s vodou a enzymy. V první fázi je přidáván tzv. ztekucovací enzym, který zabezpečí menší lepivost směsi a upraví její viskozitu na hodnoty potřebné pro dobré čerpání a míchání. Ztekucení probíhá po definovanou dobu za teploty dané výrobcem enzymu. Dále je do směsi doplněna další část vody, směs (v odborném jazyce nazývána dílo) je zchlazena na technologicky definovanou teplotu a je dodán zcukřovací enzym. Pomocí tohoto enzymu jsou v díle rozbity škroby na cukry. Vznikající produkt se nazývá sladina.

### 1.1.3 Fermentace

Sladina vzniklá v procesu propagace je zchlazena, čerpána do kvasných tanků a doplněna matečným zákvasem popřípadě přímo kvasnicemi a promíchána míchadlem. Tím je započat proces kvašení resp. fermentace. Fermentační teplota je přitom, stejně jako kvasnice, zásadním kritériem procesu a je individuální pro každou sladinu. Fermentace probíhá za stálého odsávání  $\text{CO}_2$  a udržování konstantní teploty v kvasném tanku. Kvasný proces je ukončen zhruba za 96 hodin. Tímto procesem je vyrobena zápara, která je vstupní surovinou pro proces destilace.

### 1.1.4 Destilace a rektifikace

Zápara vyrobená v předchozím procesu je surovinou pro výrobu technického lihu a je heterogenní směsí. Pevný podíl z fermentace je oddělen ve filtraci a kapalná, vícesložková směs je dále zpracovávána s cílem separovat jednotlivé kapalné složky. Používanou metodou pro rozdělení směsi kapalin na složky je destilace a rektifikace.

Destilace je pochod, při kterém se rozdělovaná kapalná směs ohřívá k bodu varu, a vzniklé páry odebírají a kondenzují. Získává se tak kapalina odlišného složení než měla původní kapalná směs. Mnohonásobným opakováním tohoto pochodu lze dosáhnout požadované

čistoty produktu. V praxi je u velkotonážních výrob používána tzv. rektifikace, kde je výše uvedená destilační jednostupňová fázová rovnováha realizována v zařízení, umožňující její vícenásobné opakování. Při bodu varu jsou jednotlivé složky rozděleny podle jejich diskrétních bodů varů a těkavostí, ale taky v závislosti na neidealitách jednotlivých fázových rovnováh.

Destilace kapalných směsí je založena na různé těkavosti kapalin tvořících směs; při téže teplotě mají tyto složky různý tlak par. Složení páry a tedy i složení kondenzátu bude se poněkud lišit od složení původní směsi, v páře bude více těkavější složky než v destilované kapalině.[1]

Dojde-li k varu kapaliny, která je směsí vzájemně rozpustných složek v uzavřeném prostoru, jsou páry bohatší na těkavější složky než kapalina. Kondenzací těchto par získáme destilát bohatší na těkavější složky (s vyšším bodem varu). Z toho důvodu dojde v základní kapalině ke zvýšení koncentrace méně těkavých složek (s vyšším bodem varu).

Výše uvedené velmi zjednodušené popisy destilace a rektifikace je možné popsat blíže:

1. Jednoduchá destilace – rozdělují se směsi skládající se ze snadno těkavé látky s příměsí netěkavých nebo velmi málo těkavých látek.
2. Rektifikace – rozšířený způsob úplného rozdělení směsi vzájemně rozpustných kapalin. Rektifikace je destilace, při které odcházející páry přicházejí do styku s kapalinou stékající proti těmto parám (tzv. zpětný tok). Stékající kapalina vzniká kondenzací par zpětného toku. Rektifikace se provádí v protiproudých kolonách, v nichž zdola nahoru stoupají páry, a proti nim stéká dolů kapalina. Mezi kapalinou a parní fází, které jsou ve styku, nastává výměna energie a hmoty, čímž se páry postupující kolonou postupně obohacují těkavější složkou a kapalina, která stéká dolů, se obohacuje méně těkavou složkou. Kondenzací par vystupujících z kolony získáváme hotový produkt neboli destilát. Enthalpicky viděno předávají brýdové páry nižšího patra teplo patru vyššímu. To je ovšem spojeno s překročením termodynamické limity, kterou je mimo tepelných ztrát bod varu. Toto teplo musí být dodáno nástřikem a vařákem. Ze spodní části kolony je čerpána kapalina s vysokou koncentrací méně těkavé složky tzv. vařákový zbytek. Kapalina, která smáčí část kolony nad nástřikem, se nazývá zpětný tok (reflux). Reflux je kondenzát par z hlavy kolony a kondenzuje v tzv. kondenzátoru refluxu. Aby nedošlo k mžikovému odpaření kapaliny na prvním patře, je nutno kondenzát podchladit o cca 3°C. Páry ve spodní části kolony jsou generovány topným zařízením – vařákem. Vařák dodává do celé kolony potřebné množství tepla.

## 1.2 Popis zařízení

Vzájemný styk kapaliny a páry proudící kolonou zajišťují vodorovné přepážky (patra). Patra mají pro průchod par o daném objemu výpočtem stanovený počet otvorů v různém provedení. Každý tento výpočet odpovídá typu zvolené vestavby.

Každé patro je opatřeno přepadovou trubkou, která udržuje konstantní hladinu kapaliny na patře a tím, že její spodní konec je ponořený do kapaliny na nižším patře zajišťuje hydraulický uzávěr pro průtok kapaliny.

Pod nejnižší patro kolony jsou přivedeny páry z vařáku a na nejvyšší patro kolony přitéká výše zmíněný zpětný tok (reflux).

U kontinuálně pracující rektifikační kolony dochází pod nástřikem k snižování koncentrace těkavější složky ze stékající kapaliny a v horní části k obohacování páry těkavější složkou. Páry procházející celou kolonou zespoda nahoru odcházejí do kondenzátoru. Část zkondenzovaných par se vrací do kolony jako zpětný chod, zbytek je odebírán jako produkt.

Na každém patře nastává výměna hmoty mezi parní a kapalnou fází. Část těkavější složky přechází přitom do parní fáze a část méně těkavé do fáze kapalné. [1]

## **2 POPIS A PRINCIP ZPŮSOBŮ DISTRIBUCE VSTUPNÍ ENERGIE V PODOBĚ TEPLA U POROVNÁVANÝCH TECHNOLOGIÍ**

Při uspořádání, kdy je v obou kolonách (záparové a rektifikační) atmosférický tlak, je vstupní energie ve formě topné páry přiváděna nezávisle do mezitrubkového prostoru obou vařáků těchto kolon.

Tyto vařáky jsou samostatně regulovatelné dle nastavení vstupů a jsou energeticky soběstačné. Vstupní energie potřebná k topení je tedy součtem energií spotřebované těmito vařáky. V bilancích spotřeby tepla je uvažováno pouze kondenzační teplo přivedené topné páry. Zkondenzovaná pára z těchto vařáků se v podobě parního kondenzátu následně vrací do kotelny k opětovnému zpracování. To znamená, že jsou tepelné ztráty zařízení v již tak velmi komplikovaném výpočtu zanedbány.

Při uspořádání, kdy kolony pracují s různými tlaky tak, že v jedné z kolon je podtlak a ve druhé přetlak, je vstupní energie ve formě topné páry přiváděna pouze do kolony pracující s vyšším tlakem (rektifikační).

V první koloně (záparové) pracující v podtlaku se jako topné médium využívají páry technického lihu produkované rektifikační kolonou, které mají díky zvýšenému tlaku v koloně a požadovanému refluxnímu poměru dostatek použitelné energie ve formě tepla na potřebné teplotní úrovni (zohlednění exergetické úrovně sdíleného tepla).

Část kondenzátu technického lihu z vařáku záparové kolony se vrací do rektifikační kolony jako reflux a část je odebírána ve formě technického lihu jako produkt.

I v této procesní variantě se do bilancí spotřeb tepla opět zahrnuje pouze kondenzační teplo par technického ethanolu při dané teplotě a tlaku. Parní kondenzát vařáku rektifikační kolony je odváděn zpět do kotelny, část tepla kondenzátu se využívá k předehřevu nástřiku surového lihu do rektifikační kolony.



### 3 REŠERŠE EXISTUJÍCÍCH PROJEKTŮ V OBLASTI DESTILACE ETHANOLU.

Klasická zařízení varen (destilačních jednotek) pro produkci ethanolu jsou popsána v [3]. Jedná se o vícekolonové soubory aparátů (kolony, vařáky, výměníky) s odlišným potrubním propojením. Nejznámější systémy pro produkci ethanolu nesou označení Barbet pracující s atmosférickým tlakem v aparátech. Novější destilační jednotky budovány v ČR v letech 1970 – 1990 nesly označení Grimma.

Na území ČR jsou většinou provozovány destilace a rafinace lihu pracující za atmosférického tlaku například:

1. Bioferm – lihovar Kolín, a.s.	13 200	m <sup>3</sup> /rok
2. Zevar, s.r.o. Větrný Jeníkov	5 600	m <sup>3</sup> /rok
3. Lihovar Budeč spol. s.r.o.	4 000	m <sup>3</sup> /rok

Novější zařízení je instalováno v Moravském Lihovaru Kojetín, pracujícím v různotlakém uspořádání jej dodala firma Technip-Speichim. Zařízení produkuje veřejný líc v množství 15 000 m<sup>3</sup>/rok.

Zařízení pro produkci Bioethanolu pracující na různotlakém principu jsou na území ČR například tato:

1. Agroethanol TTD, a.s. Dobrovice	100 000	m <sup>3</sup> /rok
2. PLP a.s. Trmice	100 000	m <sup>3</sup> /rok
3. Ethanol Energy a.s. Vrdy	71 000	m <sup>3</sup> /rok

## 4 POSOUZENÍ PŘEDPOKLADŮ PLATNOSTI VÝSLEDKŮ V PODMÍNKÁCH ČR

Podklady byly čerpány na základě údajů o činnosti rektifikačních zařízení pro produkci ethanolu provozovaných v ČR. Např.:

Zevar s.r.o Větrný Jeníkov

Ethanol energy a.s. Vrdy.

Jmenovaná lihovarská zařízení produkují ethanol s koncentrací 96%vol. využívaný pro produkci bioethanolu pro palivářské účely respektive pro výrobu nemrznoucích směsí a kapalin.

Informace získané o spotřebách energií těchto provozů jsou srovnatelné s měrnými spotřebami energií prezentované v této práci.

## 5 SPECIFIKACE VHODNÝCH SROVNÁVACÍCH KRITÉRIÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 5.1 Základní předpoklady procesních bilancí

Pro srovnání procesních zapojení:

- Zařízení pracující s atmosférickým tlakem v kolonách a samostatným topením kolon
- Zařízení pracující s různým tlakem v kolonách využívající kondenzačního tepla par ethanolu rektifikační kolony pro ohřev vařáku záparové kolony

#### 5.1.1 Vstupní parametry

1. Stejně množství a složení záparu
2. Parametry topné páry  $p=0,6$  MPa,  $t=158,8^{\circ}\text{C}$
3. Chladicí voda  $t=25^{\circ}\text{C}$

#### 5.1.2 Srovnávací kritéria

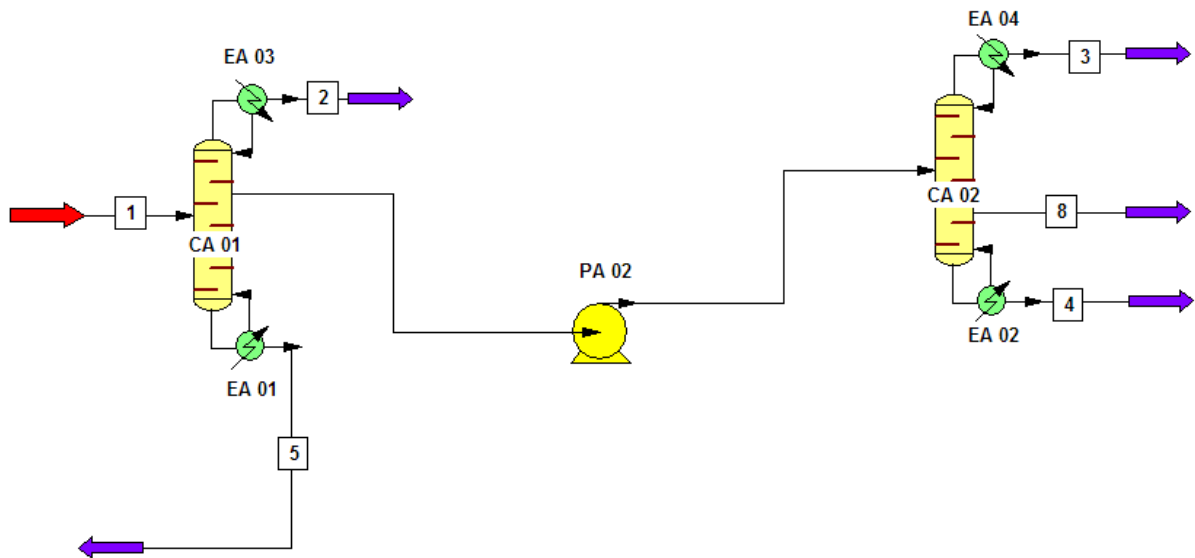
1. Spotřeba páry vztažená na  $\text{m}^3$  produkovaného technického ethanolu
2. Spotřeba chladicí vody vztažená na  $\text{m}^3$  produkovaného technického ethanolu
3. Odhad spotřeby elektrické energie

## 6 CÍLE PRÁCE

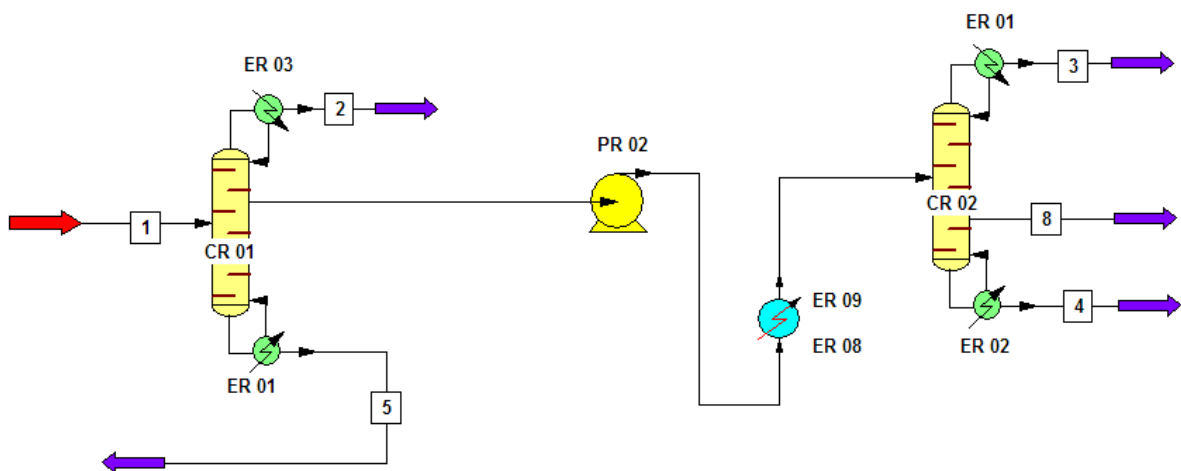
Cílem práce je porovnání vypočtené spotřeby páry, chladicí vody a odhadované spotřeby elektrické energie, vztažené na  $\text{m}^3$  produkovaného lihu dvou výše popisovaných technologií.

### 6.1 Postup výpočtu

Pro výpočet byl použit software CHEMCAD, ve kterém byla navržena obě uspořádání.



Obr. 1 Atmosférické uspořádání



Obr. 2 Různotlaké uspořádání

Z obrázku 1 a 2 není zcela patrný rozdíl mezi dvěma porovnávanými metodami. Výpočet v programu CHEMCAD byl použit pro získání vstupních a výstupních parametrů medií při různých tlakových poměrech v zařízeních. Schema výpočtového modelu je proto částečně zjednodušeno. Pro atmosférické zapojení (obr. 1) je vytvořený model téměř totožný se skutečným schématem zapojení (viz příloha 1). Ve schématu zapojení jsou navíc chladiče produktů a čerpadla.

#### Popis technologie

U modelu různotlakého zapojení, kde je využito tepla par z hlavy rektifikační kolony, bylo třeba zapojení oproti skutečnému (viz příloha 2) zjednodušit tak, že bylo propojení mezi hlavou rektifikační kolony a vařákem kolony záparové úplně vypuštěno. Vařák záparové kolony je zároveň kondenzátorem refluxu kolony rektifikační, jak vyplývá z označení v modelu na obr. 2. V tomto modelu chybí kondenzátor zbytku par ER 04, chladiče produktů a čerpadla.

Proudem 1 je veden nástřik zápary na patro 16 kolony CA01.

Proudem 2 je veden úkap do skladu nestandardu.

Proudem 3 je odtahován produkt – TECHNICKÝ LÍH – do skladu produktu.

Proudem 4 je odváděna lutrová voda, která je po vychlazení vypouštěna do kanalizace.

Proudem 5 jsou odváděny výpalky do skladu výpalků.

Proudem 8 jsou odtahovány z pater 50 až 61 tzv. přiboudliny (směs isobuthanolu a 3-M butanolů) tyto jsou na speciální děliče odděleny od lihovodní směsi a skladovány pro další využití. Jedná se o sloučeninu s vysokou schopností vázat pachy a aromatické sloučeniny a v převážné míře je využita v kosmetickém průmyslu.

Čerpadlem PA02 je nastřikován surový líh na patro 44 kolony CA02.

Obě zapojení byla nastavena tak, aby měl výstupní produkt srovnatelnou kvalitu i množství a byla zajištěna funkčnost celku.

Výsledkem prací s tímto softwarem byl výpočet průtoku, složení, teplot, vlastností látek proudících v jednotlivých větvích, teplo potřebné ve vařácích a kondenzační teplo hlavových produktů.

S těmito parametry bylo dále pracováno v programu Microsoft Excel, ve kterém byly získané výsledky dále vyhodnoceny.

## 6.2 Vzorce použité pro výpočet

- množství tepla (obecně)

$$Q = G_m \cdot c \cdot \Delta t \quad [kJ \cdot h^{-1}]$$

$G_m$ .....tok  $[kg \cdot h^{-1}]$

$c$ .....měrná tepelná kapacita  $[kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$

$\Delta t$ .....změna teploty  $[K]$

- množství topné páry

$$G_{m_p} = \frac{Q}{l_v} \quad [kg \cdot h^{-1}]$$

$Q$ .....teplo  $[kJ \cdot h^{-1}]$

$l_v$ .....výparné teplo  $[kJ \cdot kg^{-1}]$

- množství chladicí vody

$$G_{m_{chv}} = \frac{Q}{c_v \cdot \Delta t_{chv}} \quad [kg \cdot h^{-1}]$$

$Q$ .....teplo  $[kJ \cdot h^{-1}]$

$c_v$ .....měrná tepelná kapacita vody  $[kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$

$\Delta t_{chv}$ .....oteplení chladicí vody  $[K]$

- množství chladicí vody na  $m^3$  produkovaného technického lihu

$$G_{V_{chv}} = \frac{G_{m_{chv}} \cdot \rho_{E96\%}}{G_{E96\%}} \quad [kg \cdot m^3]$$

$G_{m_{chv}}$ .....množství chladicí vody

$G_{E96\%}$ .....množství produkovaného technického lihu

$\rho_{E96\%}$ .....měrná hustota produkovaného technického lihu

- množství páry na  $m^3$  produkovaného technického lihu

$$G_{V_p} = \frac{G_{m_p} \cdot \rho_{E96\%}}{G_{E96\%}} [kg \cdot m^3]$$

$G_{m_{Chv}}$ .....množství chladicí vody

$G_{E96\%}$ .....množství produkovaného technického lihu

$\rho_{E96\%}$ .....měrná hustota produkovaného technického lihu

Elektrické příkony čerpadel byly určeny ve spolupráci s firmou SPX Flow Technology, s.r.o.

## 7 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

### 7.1 Atmosferické uspořádání

#### 7.1.1 Vařáky, kondenzátory, chladiče

S použitím výše uvedených softwarů a vzorců byly vypočteny výsledky uvedené v následujících tabulkách. Hodnoty v těchto tabulkách vyjadřují množství tepla přepočteného na množství topné páry potřebné pro topení v jednotlivých kolonách a množství chladicí vody potřebné pro kondenzaci a chlazení v jednotlivých kondenzátorech a chladičích.

Označení aparátů odpovídá označení v programu CHEMCAD a označení v celkovém schématu (příloha 1).

Atmosférické provedení - vařáky				
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Potřebné teplo [kJ/h]	Množství páry páry [kg/h]
<b>1</b>	EA 01	VAŘÁK ZÁPAROVÉ KOLONY	3432000	1645
<b>2</b>	EA 02	VAŘÁK REKTIFIKAČNÍ KOLONY	2365000	1134

*Tabulka 1 Vypočtené hodnoty vařáků atmosférického provedení*

Atmosférické provedení - kondenzátory a chladiče						
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Přebytek tepla [kJ/h]	Množství chladicí vody [kg/h]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní teplota [°C]
1	EA 03	KONDENZÁTOR ÚKAPU I	1233000	29498	76,0	65,5
2	EA 04	KONDENZÁTOR PRODUKTU	2352000	56268	77,7	74,7
3	EA 05	CHLADIČ PRODUKTU	76384	1827	74,7	25,0
4	EA 06	CHLADIČ ÚKAPU I	1507	36	65,5	25,0
5	EA 07	CHLADIČ PŘIBOUDLINY	8692	208	87,8	25,0

Tabulka 2 Vypočtené hodnoty kondenzátorů a chladičů atmosférického provedení

### 7.1.2 Čerpadla

Pro atmosférické uspořádání byla dle specifikace navržena ve spolupráci s firmou SPX Flow Technology s.r.o. tři čerpadla s označením PA 01, PA 02 a PA 03.

Specifikace čerpadel:

- PA 01 Médium - zápara
  - Množství 7500 kg/h
  - Hustota 976 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška 30 m
  - Nátoková výška 2 m
  
- PA 02 Médium - líh
  - Množství 701 kg/h
  - Hustota 785 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška 50 m
  - Nátoková výška 2 m
  
- PA 03 Médium – líh
  - Množství 2041 kg/h
  - Hustota 747 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška 55 m
  - Nátoková výška 2 m



Navržená čerpadla se spotřebami elektrické energie:

Atmosférické provedení - čerpadla				
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Spotřeba el. energie [kW]	Spotřeba el. energie za den [kW/den]
1	PA 01	ČERPADLO ZÁPARY	1,5	36,0
2	PA 02	ČERPADLO NÁSTRÍKU CA 02	0,9	22,3
3	PA 03	ČERPADLO REFLUXU CA 02	2,6	62,4

Tabulka 3 Spotřeby elektrické energie čerpadel v atmosférickém provedení

## 7.2 Různotlaké uspořádání

### 7.2.1 Vařáky, kondenzátory, chladiče

S použitím výše uvedených softwarů a vzorců byly vypočteny výsledky uvedené v následujících tabulkách. Hodnoty v těchto tabulkách vyjadřují množství tepla přepočteného na množství topné páry potřebné pro topení v jednotlivých kolonách a množství chladicí vody potřebné pro kondenzaci a chlazení v jednotlivých kondenzátorech a chladičích.

Označení aparátů odpovídá označení v programu CHEMCAD a označení v celkovém schématu (příloha 2).

Pro různotlaké uspořádání bylo třeba navíc vypočítat dva výměníky předeřevu a stanovit příkon vývěvy. Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v tabulce č. 6 a 7.

Různotlaké provedení - vařáky kolon				
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Potřebné teplo [kJ/h]	Množství páry [kg/h]
1	ER 01	VAŘÁK ZÁPAROVÉ KOLONY	2808000	0
2	ER 02	VAŘÁK REKTIFIKAČNÍ KOLONY	3667000	1758

Tabulka 4 Vypočtené hodnoty vařáků u různotlakého provedení

Různotlaké provedení - kondenzátory a chladiče						
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Přebytek tepla [kJ/h]	Množství chladicí vody [kg/h]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní teplota [°C]
1	ER 03	KONDENZÁTOR ÚKAPU I	1385000	33134	49,4	35,5
2	ER 04	KONDENZÁTOR ZBYTKU PAR PRODUKTU	829000	19833	108,2	105,2
3	ER 05	CHLADIČ PRODUKTU	141478	3385	105,2	25,0
4	ER 06	CHLADIČ ÚKAPU I	350	8	35,5	25,0
5	ER 07	CHLADIČ PŘIBOUDLINY	6479	155	87,8	25,0

Tabulka 5 Vypočtené hodnoty kondenzátorů a chladičů různotlakého provedení

Různotlaké provedení - výměníky přehřevu						
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Potřebné teplo [kJ/h]	Množství topného média [kg/h]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní teplota [°C]
1	ER 08	PŘEDEHŘEV LUTROVOU VODOU	51729	196	53	75
2	ER 09	PŘEDEHŘEV PARNÍM KONDENZÁTEM	71790	1758	75	105

Tabulka 6 Vypočtené hodnoty výměníků přehřevu různotlakého provedení

## 7.2.2 Čerpadla

Pro různotlaké uspořádání byla dle parametrů navržena ve spolupráci s firmou SPX Flow Technology s.r.o. tři čerpadla s označením PR 01, PR 02 a PR 03. Parametry vývěvy JR 01 byly určeny dle katalogu firmy SLOVPUMP-TRADE s.r.o.

Specifikace čerpadel:

- PR 01      Médium - zápara
  - Množství                      7500 kg/h
  - Hustota                        976 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška              15 m
  - Nátoková výška              2 m
  
- PR 02      Médium - líh
  - Množství                      751 kg/h
  - Hustota                        769 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška              80 m
  - Nátoková výška              2 m
  
- PR 03      Médium – líh
  - Množství                      3612 kg/h
  - Hustota                        716 kg/m<sup>3</sup>
  - Výtlačná výška              85 m
  - Nátoková výška              2 m

Navržená čerpadla a vývěva se spotřebami elektrické energie:

Různotlaké provedení - čerpadla a vývěva				
Položka	Označení zařízení	Popis zařízení	Spotřeba el. energie [kW]	Spotřeba el. energie za den [kW/den]
1	PR 01	ČERPADLO ZÁPARY	0,7	16,8
2	PR 02	ČERPADLO NÁSTŘIKU CR 02	2,2	52,8
3	PR 03	ČERPADLO REFLUXU CR 02	6,8	163,2
4	JR 01	VÝVĚVA	4,9	117,6

Tabulka 7 Spotřeba elektrické energie čerpadel a vývěvy v různotlakém provedení

Při porovnání výsledků spotřeby páry vařáků je dle tab. 1 a 4 zřejmé, že při atmosférické destilaci je spotřeba výrazně vyšší než u různotlaké destilace. Obdobně je dle tabulek 2 a 5 vyšší spotřeba chladicí vody pro atmosférickou destilaci oproti destilaci různotlaké.

Podstata celé úspory spotřeby páry je ve využití tepla obsaženého v hlavovém produktu rektifikační kolony CR 02. Toto teplo je zúžitkováno ve vařáku ER 01 pro ohřátí zápany ve spodku kolony CR 01.

Nižší spotřeba chladicí vody u různotlakého uspořádání je zapříčiněna kondenzací většiny par hlavového produktu kolony CR 02 ve vařáku ER 01 kolony CR 01.

Jediným porovnávaným parametrem ve prospěch atmosférické destilace je spotřeba elektrické energie. Tento rozdíl je způsoben spotřebou vývěvy JR 01 a přetlakem v rektifikační koloně, který vyžaduje vyšší výkon čerpadel PR 02 a PR 03.

## 8 ZÁVĚR

Za použití výše uvedených vzorců a výsledků byla vypočítána spotřeba páry, chladicí vody a rámcově stanovena spotřeba elektrické energie pro obě řešené varianty zapojení.

Pro atmosférické uspořádání je spotřeba páry na 1 m<sup>3</sup> produkovaného technického lihu:

$$4\ 065\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Spotřeba chladicí vody je ve stejném poměru k produkci lihu:

$$128\ 504\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Spotřeba elektrické energie je pro atmosférické uspořádání:

$$120\ \text{kW/den.}$$

Pro různotlaké uspořádání je spotřeba páry na 1 m<sup>3</sup> produkovaného technického lihu:

$$2\ 439\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Spotřeba chladicí vody je ve stejném poměru k produkci lihu:

$$78\ 419\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Spotřeba elektrické energie je pro různotlaké uspořádání:

$$350\ \text{kW/den.}$$

Z výše uvedených výsledků je patrné, že různotlaké uspořádání má o 40% nižší spotřebu páry, o 39% nižší spotřebu chladicí vody, naopak však o 66% vyšší spotřebu elektrické energie.

Tyto výsledky dále zvýhodňují různotlaké uspořádání z hlediska nižších investičních nároků na zdroj topné páry (kotelnu) a zdroj chladicí vody (chladicí věž, zdroj a úpravna vody).

Oproti atmosférickému uspořádání nevznikají u různotlaké destilace inkrusty uvnitř vařáku záparové kolony, což má za následek menší nároky na čištění a údržbu zařízení kolony a vařáku během provozu. Tím je zajištěn plynulejší provoz zařízení.

Cíle projektu byly splněny a celý záměr technologicky diskutován. Základním přínosem této práce je doložení technologického záměru navrhnout různotlaké uspořádání obou kolon, které beze sporu přináší kromě úspory primární energie i další procesní výhody, jako jsou minimalizace tvorby inkrustací a s tím spojené přímé náklady na údržbu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KASATKIN, Andrej Georgijevič. Základní pochody a přístroje chemické technologie. Vyd. 1. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1952, s. 86-100.
- [2] DYR, Josef. *Lihovarství 1*. [Vyd. 1.]. Praha: Státní nakl. technické literatury, 1955, 1 v. s. 42-66.
- [3] DYR, Josef. *Lihovarství 2*. [Vyd. 1.]. Praha: Státní nakl. technické literatury, 1963, 1 v.
- [4] HÁLA, Eduard. *Fyzikální chemie 1*. 2. vyd. Praha: Academia, 1971, 428 s.
- [5] PERRY, Robert H. *Chemical Engineer's Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1973.
- [6] EXNAR, Petr, et al. *Praktická lihovarnická příručka*. Praha: Agrospoj Těšnov, 1998. Technologie výroby lihu,
- [7] KADLEC, Pavel, et al. *Technologie potravin I*. Praha: VŠCHT, 2008. Technologie sacharidů, 300 s. ISBN 978-80-7080-509-1
- [8] KADLEC, Pavel. *Technologie potravin II*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2002, 236 s. ISBN 80-708-0510-2.
- [9] STEHLÍK, Petr. *Termofyzikální vlastnosti. Tepelné pochody: Teoretické základy oboru*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 69 s. ISBN 80-214-0428-0.
- [10] ŠESTÁK J., BUKOVSKÝ J., HOUŠKA M.: Tepelné pochody - transportní a termodynamická data. Vydavatelství ČVUT, Praha 1993.
- [11] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac. / . Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [12] HROMÁDKO, Jan, et al. Výroba bioetanolu. *Listy cukrovarnické a řepařské*. 2010, 7-8, s. 5.
- [13] ŠULÁK, Martin; ŠMOGROVIČOVÁ, Daniela. BIOETHANOL: SOUČASNÉ TRENDY VE VÝZKUMU A PRAXI. *Chemické listy*. 2008, 102.
- [14] BALAT, Mustafa; BALAT, Havva; Oz, Cahide. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008, 34.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$c$	měrná tepelná kapacita
$c_v$	měrná tepelná kapacita vody
$^{\circ}\text{C}$	stupně Celsia
$G_{E96\%}$	množství produkovaného technického lihu
$G_m$	tok
$G_{m\text{Chv}}$	množství chladicí vody
$h$	hodina
$\text{kg}$	kilogram
$\text{kJ}$	kilojoule
$\text{kW}$	kilowatt
$l_v$	výparné teplo
$\text{m}^3$	metr krychlový
$\text{mm}$	milimetr
$Q$	teplo
$\Delta t$	změna teploty
$\Delta t_{\text{Chv}}$	oteplení chladicí vody
$\rho_{E96\%}$	měrná hustota produkovaného technického lihu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1	Atmosférické uspořádání (model CHEMCAD)
obr. 2	Různotlaké uspořádání (model CHEMCAD)

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Vypočtené hodnoty vařáků atmosférického provedení
Tabulka 2	Vypočtené hodnoty kondenzátorů a chladičů atmosférického provedení
Tabulka 3	Spotřeby elektrické energie čerpadel v atmosférickém provedení
Tabulka 4	Vypočtené hodnoty vařáků u různotlakého provedení
Tabulka 5	Vypočtené hodnoty kondenzátorů a chladičů různotlakého provedení
Tabulka 6	Vypočtené hodnoty výměníků předehřevu různotlakého provedení
Tabulka 7	Tabulka 7 Spotřeby elektrické energie čerpadel a vývěvy v různotlakém provedení



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Skutečné schéma atmosférického zapojení

Příloha 2 Skutečné schéma různotlakého zapojení