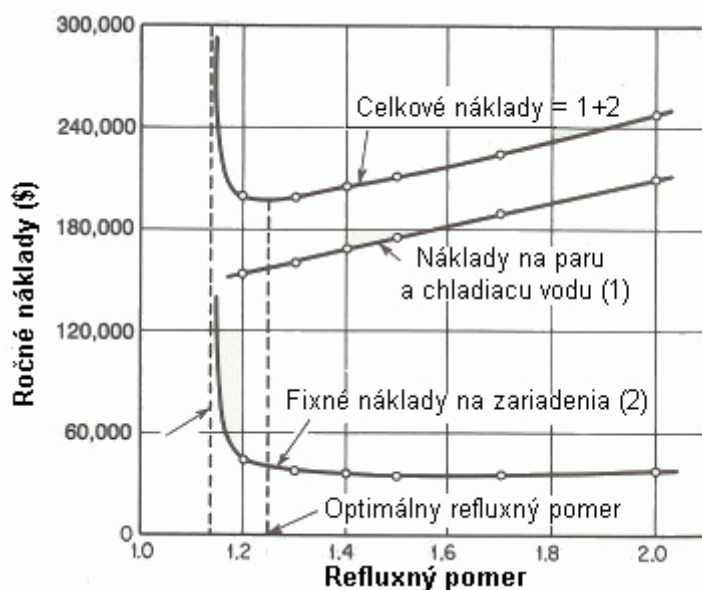


## Optimálny refluxný pomer

Pri návrhovom výpočte, v porovnaní s prevádzkovým, sú neznámymi pri zadanom stave, zložení, prietoku nástreku a refluxnom pomere nielen zloženia a prietoky destilátu a zvyšku, ale aj počet etáží (teoretických stupňov) a poloha nástrekovej etáže. Keďže sme zadefinovali ďalšie dve naznámky, musíme zadať ďalšie dve známe premenné na dodefinovanie systému. Väčšinou sa zadáva požiadavka na stupeň separácie (mólové zlomky v destiláte a zvyšku).

S rastom refluxného pomeru rastie aj teplo spotrebované vo varáku a dodané v kondenzátore, teda rastú aj požiadavky na veľkosť teplovýmennnej plochy vo varáku a v kondenzátore, resp. požiadavky na zabezpečenie transportu požadovaného tepla. S rastom refluxného pomeru však naopak klesá počet teoretických stupňov potrebných na separáciu (klesá počet etáží kolóny), ale vplyvom väčšieho množstva pár v kolóne rastie priemer kolóny, keďže pary sa môžu v kolóne z konštrukčných dôvodov pohybovať len určitou obmedzenou rýchlosťou.

Optimálny refluxný pomer je taký refluxný pomer, pri ktorom je suma prevádzkových (spotreba tepelných médií vo varáku a v kondenzátore; väčšinou sa vypočítajú pre rok prevádzky) a investičných nákladov (nákup kolóny, teda aký varák, resp. kondenzátor je potrebný, aký priemer má mať kolóna a koľko má mať etáží; väčšinou sa prepočítavajú na jeden rok prevádzky) minimálna.



Pri výpočte optimálneho refluxného pomeru sa ako prvé vypočíta minimálny refluxný pomer (princíp výpočtu je uvedený v predchádzajúcej hodine). Určí sa v akom rozsahu násobku refluxného pomeru bude kolóna pracovať (v praxi sa hodnota optimálneho refluxného pomeru nachádza v rozmedzí násobkov 1,05 - 1,3).

Ďalším krokom je výpočet minimálneho počtu teoretických stupňov. Za predpokladu ideálneho správania sa rovnováhy kvapalina - para (konštantná relatívna prchavosť) ho môžeme vypočítať z:

$$N_{\min} = \frac{\ln \frac{x_D(1-x_W)}{x_W(1-x_D)}}{\ln \alpha}$$

Pomocou  $N_{\min}$  môžeme vypočítať skutočný počet etáží  $N$ , pre zadaný refluxný pomer, pomocou nasledujúcich rovníc:

$$h = 100 \frac{R - R_{\min}}{R + 1}$$

$$j = 10^{1,8416 + 0,22252 \log h - 0,91145(\log h)^2 + 0,91477(\log h)^3 - 0,33269(\log h)^4}$$

$$N = \frac{(-100N_{\min} - j)}{(j - 100)\mu_{ETÁŽ}}$$

Pomer teoretických stupňov v obohacovacej k ochudobňovacej časti možno vypočítať z Kirkbridovej empirickej rovnice:

$$\frac{N_n}{N_m} = \left[ \left( \frac{x_{F,B}}{x_{F,A}} \right) \left( \frac{x_{W,A}}{x_{D,B}} \right)^2 \frac{\dot{n}_W}{\dot{n}_D} \right]$$

Pomocou tohto pomeru môžeme vypočítať polohu nástrekovej etáže :

$$N_F = \frac{(N - 2)}{\left( \frac{N_n}{N_m} + 2 \right)} + 2$$

Ďalším krokom je výpočet teplovýmenných plôch varáka a kondenzátora pomocou tepla potrebného na vyparenie, resp. skondenzovanie pár v ochudobňovacej, resp. obohacovacej časti.

$$Q_{VARÁK} = \dot{n}_{Vm} \Delta_v h_W = [n_D (R + 1) - n_F (1 - q)] \Delta_v h_W$$

$$\dot{m}_{PARA} = \frac{Q_{VARÁK}}{\Delta_v h_{VODA}}$$

$$A_{VARÁK} = \frac{Q_{VARÁK}}{\Delta T_{LSVARÁK} U_{VARÁK}}$$

$$Q_{\text{KONDENZÁTOR}} = \dot{n}_{\text{Vn}} \Delta_V h_D = [n_D (R+1)] \Delta_V h_D$$

$$\dot{m}_{\text{VODA}} = \frac{Q_{\text{KONDENZÁTOR}}}{C_{\text{PVODA}} \Delta T_{\text{VODA}}}$$

$$A_{\text{KONDENZÁTOR}} = \frac{Q_{\text{KONDENZÁTOR}}}{\Delta T_{\text{LS KONDENZÁTOR}} U_{\text{KONDENZÁTOR}}}$$

Priemer kolóny možno počítať pomocou maximálnej povolenej rýchlosti prúdenia pár v kolóne podľa nasledujúcich rovníc:

$$\dot{V}_{gnMAX} = \frac{\dot{n}_D (R+1) 8,314 T_{nMAX}}{P}$$

$T_{nMAX}$  – teplota na nástrekovej etáži

$$\dot{V}_{gmMAX} = \frac{[\dot{n}_D (R+1) - \dot{n}_F (1-q)] 8,314 T_{mMAX}}{P}$$

$T_{mMAX}$  – teplota vo varáku

$\dot{V}_g$  = väčšia hodnota z  $\dot{V}_{gnMAX}$   $\dot{V}_{gmMAX}$

$$d = \left( \frac{4 \dot{V}_g}{\pi w_{MAX}} \right)^{0,5}$$

Investičné náklady sa väčšinou zadávajú tabuľkovo alebo funkciou, pre kolónu ako cena za etáž v závislosti od priemeru kolóny, pre varák a kondenzátor ako funkcia teplovýmenných plôch. Prevádzkové náklady väčšinou závisia od spotreby médií pre fungovanie kolóny (v našom prípade spotreba teplotonosičov).

## Vysvetlivky

$\dot{n}$  – tok látkového množstva [ $\text{mol s}^{-1}$ ]

$\dot{m}$  – hmotnostný prietok [ $\text{kg s}^{-1}$ ]

$x$  – mólový zlomok

$N$  – počet etáží kolóny

$N_F$  – poloha nástrekovej etáže

$R$  – refluxný pomer

$T_W$  – teplota varu vo varáku [K]

$T_{nMAX}$  – teplota na nástrekovej etáži [K]

$P$  – tlak v kolóne [Pa]

$A$  – teplovýmenná plocha [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta_V h_W$  – špecifická výparná entalpia zvyšku [ $\text{J mol}^{-1}$ ]

$\Delta_V h_D$  – špecifická výparná entalpia destilátu [ $\text{J mol}^{-1}$ ]

$C_{PVODA}$  – tepelná kapacita vody [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

$U_{KONDEZATOR}$  – úhrnný koeficient prestupu tepla v kondenzátore [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

$U_{VARAK}$  – úhrnný koeficient prestupu tepla vo varáku [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T_{VODA}$  – rozdiel teplôt chladiacej vody na vstupe a na výstupe [K]

$\Delta T_{LS KONDEZATOR}$  – logaritmickej stred teplôt medzi teplotou destilátu a teplotou chladiaceho média [K]

$\Delta T_{LSVARAK}$  – logaritmickej stred teplôt medzi teplotou zvyšku a teplotou ohrevného média [K]

$\Delta_V h_{VODA}$  – špecifická výparná entalpia vody [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

$\dot{Q}$  – tok tepla [W]

$\alpha$  – relatívna prchavosť

$w_{MAX}$  – maximálna povolená rýchlosť pár v kolóne [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$\dot{V}$  – Objemový prietok pár [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]

$d$  – priemer kolóny [m]

$\mu_{ETÁŽ}$  – účinnosť etáže

$\tau_{PREVADZKY}$  – čas trvania výroby počas jedného roka [h]

## Index :

$f$  – nástrek

$D$  – destilát

$W$  – zvyšok

$V, g$  – plynná fáza

$n$  – obohacovacia časť

$m$  – ochudobňovacia časť

min – minimálny

MAX – maximálny

**Zadanie úlohy:**

Priemer etáže [m]	Cena [€]
1,52	2400
1,78	3000
2,03	3700
2,29	4500
2,54	5400

Teplovýmenná plocha kondenzátora [m <sup>2</sup> ]	Cena [€]
74,3	19 500
92,9	22 500
111,5	25 200
130,1	27 600
148,6	29 700

Teplovýmenná plocha varáka [m <sup>2</sup> ]	Cena [€]
92,9	34 500
130,1	42 300
167,2	49 200
204,4	55 500
241,5	60 600

Prevádzkové náklady	
Médium	Cena [€/1000kg]
para	3,31
chladiaca voda	0,238

Vypočítajte optimálny refluxný pomer, ak potrebujeme rozdeliť zmes hexánu a toluénu ( $100 \text{ mol s}^{-1}$ ;  $x_{\text{hexán}} = 0,5$ ;  $q = 0,5$ ). Požadované zloženie destilátu je  $x_{\text{hexán}} = 0,95$  a zvyšku  $x_{\text{hexán}} = 0,1$ . Ďalšie potrebné údaje k výpočtu sú:

$$T_W = 373,96 \text{ K}$$

$$T_{nMAX} = 360,15 \text{ K}$$

$$P = 101325 \text{ Pa}$$

$$\Delta_V h_W = 32700 \text{ Jmol}^{-1}$$

$$\Delta_V h_D = 29115 \text{ Jmol}^{-1}$$

$$C_{PVODA} = 4200 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta T_{VODA} = 60 \text{ K}$$

$$U_{KONDEZATOR} = 500 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$U_{VARAK} = 500 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta T_{LS KONDEZATOR} = 40 \text{ K}$$

$$\Delta T_{LSVARAK} = 20 \text{ K}$$

$$\Delta_V h_{VODA} = 2202900 \text{ Jkg}^{-1}$$

$$\alpha = 3,935$$

$$w_{MAX} = 0,76 \text{ ms}^{-1}$$

$$\mu_{ETAŽ} = 0,4$$

$$\tau_{PREVADZKY} = 8500 \text{ h}$$

## Výsledky v Matlabe

### Hlavný program

```
clear all
close all
clc
global N NF nf xf q xd xw R y x alfa
%molovy tok suroviny
nf=100;
%molovy zlomok hexanu v surovine
xf=0.5;
%molovy pomer kvapaliny a pary v surovine
q=0.5;
%stredna relativna prchavost
alfa=3.935;
%pozadovane zlozenie destilatu
xd=0.95;
%teplota na nastrekovej etazi pri q=0.5
Tf=87+273.15;
%pozadovane zlozenie destilacneho zvyšku
xw=0.1;
%teplota varu vo varaku pri tomto zlozeni
Tw=100.81+273.15;
%tlak v kolone
```

```
P=101325;
%vyparna entalpia zvytku
hvw=32700;
%vyparna entalpia destilatu
hvd=29115;

%kapacita chladiacej vody
Cp=4200;
%rozdiel teplot chladiacej vody na vystupe a vstupe
dTvoda=60;

%uhrnny koeficient prestupu tepla v kondenzatore
Ukon=500;
%uhrnny koeficient prestupu tepla vo varaku
Uvar=500;

%hnacia sila prestupu tepla v kondenzatore
%teda rozdiel teplot chladiacej vody a teploty kondenzacie v
%kondenzatore
dTkon=40;
%hnacia sila prestupu tepla vo varaku
%teda rozdiel teplot ohrevnej pary a teploty pary vo varaku
dTvar=20;

%vyparna entalpia vody zkondenzovanej z ohrevnej pary vo varaku
hvvodavar=2202900;

%maximalna povolená rychlost pary v kolone
wmax=0.76;
%ucinnost etaze
```