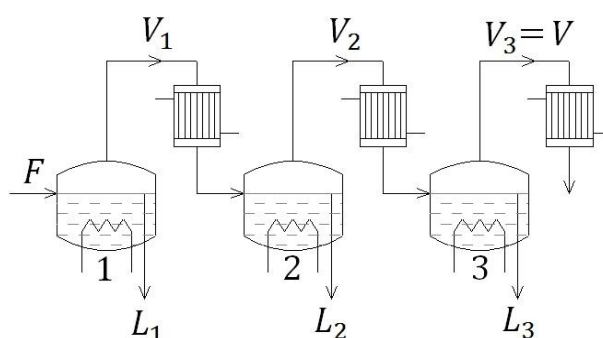


9 REKTIFIKÁCIA

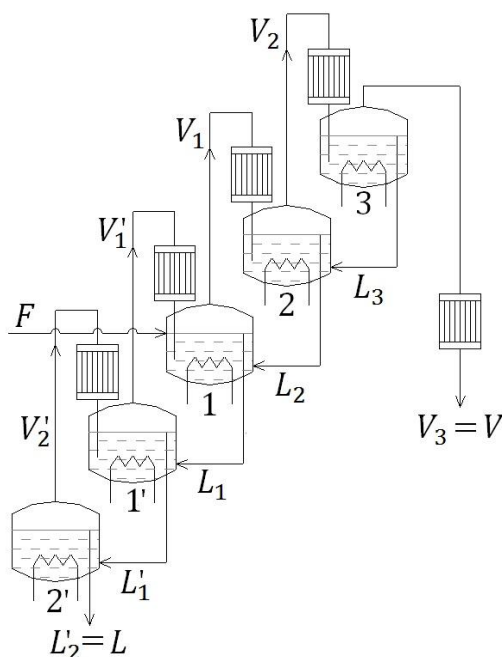
Jednoduchá destilácia je pomerne nedokonalý spôsob rozdeľovania kvapalných zmesí a s úspechom sa môže použiť len pri zmesiach s veľkým rozdielom teploty varu zložiek. Dokonalejšie rozdelenie sa dosiahne opakovanou jednoduchou destiláciou, ktorá sa nazýva rektifikácia a možno ju považovať za viacnásobné čiastočné vyparovanie a kondenzovanie. Je to teda proces viacnásobnej destilácie a kondenzácie pri priamom prestupe tepla z pár do kvapaliny a vzájomnom prestupe látky medzi parou a kvapalinou.

Schéma najjednoduchšieho spôsobu opakovanej nepretržitej destilácie binárnej zmesi je na obrázku 9.1. Surovina F (tzv. nástrek) sa privádza do kotla, kde sa rovnovážne destiluje. Destilát V_1 obsahujúci viac prchavejšej zložky sa vedie do ďalšieho kotla. Destilát z druhého kotla V_2 sa znova destiluje, až sa získa dostatočne koncentrovaný destilát V .



Obr. 9.1. Schéma viacnásobnej nepretržitej destilácie bez využitia zvyškov [6]

Pri takomto postupe, ak sa má získať značne koncentrovaný destilát, vznikne veľké množstvo zvyšku $L_1 + L_2 + L_3$, ktorý obsahuje ešte veľa prchavejšej zložky. Aby bol proces čo najhospodárnejší, je účelné rozdestilovať aj zvyšok. Dosiahne sa to protiprúdovým vedením zvyšku z kotla 3 do kotla 2 a z toho do kotla 1 (obr. 9.2).



Obr. 9.2. Schéma viacnásobnej nepretržitej destilácie s využitím zvyškov [6]

Ak zvyšok z prvého kotla obsahuje ešte veľa prchavejšej zložky, oddestiluje sa táto zložka ešte v jednom alebo viacerých predradených kotloch (1', 2'). Destilát z týchto kotlov sa privedie späť do predchádzajúceho kotla. Výsledkom je destilát V , obsahujúci podľa charakteru východiskovej zmesi prchavejšiu zložku, a zvyšok L , obsahujúci prevažne menej prchavú zložku. Je zrejmé, že rozdelenie zmesi bude tým ostrejšie, čím väčší počet kotlov sa použije.

Teória rektifikácie sa zakladá na predstave existencie teoretickej etáže. Je to etáž, ktorá pracuje tak, že pary z nej odchádzajúce sú v rovnováhe s kvapalinou z nej stekajúcou. Zavedenie tohto pojmu je dôležité z hľadiska zjednodušenia výpočtu rektifikačnej kolóny.

Nástreková etáž rozdeľuje kolónu na dve časti:

- **obohacovacia časť**
 - nachádza sa nad nástrekovou etážou a slúži na obohatenie pár destilátu prchavejšou zložkou,
- **ochudobňovacia časť**
 - nachádza sa pod nástrekovou etážou a slúži na odstránenie prchavejšej zložky zo zvyšku.

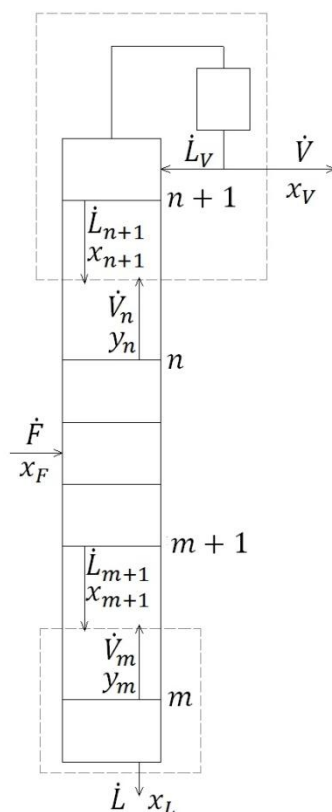
Etáže v kolóne sa vždy číslujú zhora nadol:

- **všeobecná obohacovacia etáž**,
 - označuje sa ako n -tá etáž od nástrekovej etáže,
 - prietok pár odchádzajúcich je \dot{V}_n ,
 - prietok kvapaliny (vnútorný spätný tok) \dot{L}_n ,
- **všeobecná ochudobňovacia etáž**,
 - označuje sa ako m -tá etáž od dna kolóny,

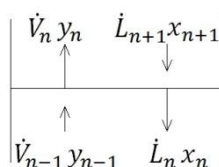
a označenie ďalších veličín je nasledovné:

- **prietok destilátu** (\dot{V}),
- **nástrek** (\dot{F}),
- **destilačný zvyšok** (\dot{L}),
- **vonkajší spätný tok** (\dot{L}_D).

Pri výpočte sa všetky mólové zlomky vzťahujú na prchavejšiu zložku, teda A , a pre zjednodušenie označovania sa tento index neuvádza.



Obr. 9.3. Základná schéma pre odvodenie rovníc nepretržitej rektifikácie [6]



Obr. 9.4. Prúdová schéma n-tej rektifikačnej etáže [6]

Na n -tú etáž v obohacovacej časti (obr. 9.4) prichádza z nižšej etáže \dot{V}_{n-1} ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$) pary s mólovým zlomkom prchavejšej zložky y_{n-1} a z $n + 1$ etáže \dot{L}_{n+1} ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$) kvapaliny zloženia x_{n+1} . Z etáže odchádza \dot{V}_n pary a \dot{L}_n kvapaliny rovnovážneho zloženia y_n a x_n . Celková bilancia etáže je:

$$\dot{V}_{n-1} + \dot{L}_{n+1} = \dot{V}_n + \dot{L}_n \quad (9.1)$$

resp. pre prchavejšiu zložku:

$$\dot{V}_{n-1} y_{n-1} + \dot{L}_{n+1} x_{n+1} = \dot{V}_n y_n + \dot{L}_n x_n \quad (9.2)$$

Podobne možno napísať materiálovú bilanciu pre obohacovaciu časť kolóny, ktorá je na obrázku 9.3 zobrazená v hornej časti kolóny v úseku označenom čiarkovane. Do tejto prichádza \dot{V}_n ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$) pár, odchádza z nej \dot{V} ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$) destilátu a \dot{L}_{n+1} ($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$) vnútorného spätného toku. Potom je celková materiálová bilancia:

$$\dot{V}_n = \dot{L}_{n+1} + \dot{V} \quad (9.3)$$

resp. pre prchavejšiu zložku:

$$\dot{V}_n y_n = \dot{L}_{n+1} x_{n+1} + \dot{V} x_V \quad (9.4)$$

Ak sa zavedie pojem reflux a zadefinuje sa rovnicou:

$$R = \frac{\dot{L}_{n+1}}{\dot{V}} = \frac{\dot{L}_V}{\dot{V}} \quad (9.5)$$

Úpravou týchto rovníc sa získa tvar:

$$y_n = \frac{R}{R+1} x_{n+1} + \frac{1}{R+1} x_V \quad (9.6)$$

Podobne pre ochudobňovaciu časť kolóny, ktorá je na obrázku 9.3 označená čiarkovane a je v jej spodnej časti sa môžu napísať nasledovné rovnice:

$$\dot{L}_{m+1} = \dot{V}_m + \dot{L} \quad (9.7)$$

resp. pre prchavejšiu zložku:

$$\dot{L}_{m+1} x_{m+1} = \dot{V}_m y_m + \dot{L} x_L \quad (9.8)$$

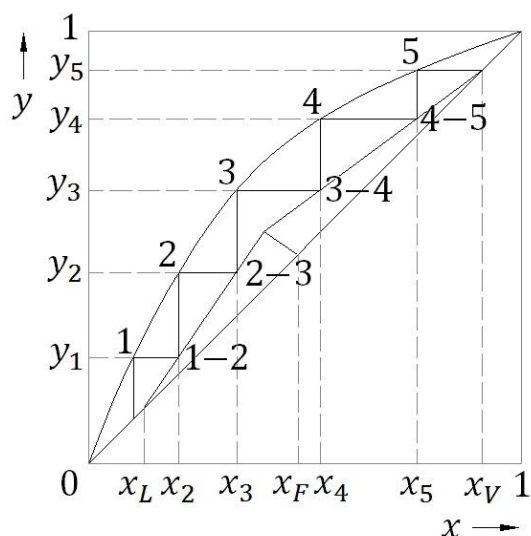
Vzájomným dosadením rovníc a ich úpravou sa získa tvar:

$$y_m = \frac{\dot{L}_{m+1}}{\dot{L}_{m+1} - \dot{L}} x_{m+1} + \frac{\dot{L}}{\dot{L}_{m+1} - \dot{L}} x_L \quad (9.9)$$

Rovnice (9.6) a (9.9) udávajú závislosť zloženia kvapaliny stekajúcej na etáž a pary stúpajúcej z etáže v obohacovacej, respektívne ochudobňovacej časti kolóny. Ich grafické znázornenie na diagrame $x - y$ nazývame pracovné čiary kolóny, pretože charakterizujú pracovné podmienky v určitej časti kolóny.

GRAFICKÝ VÝPOČET POČTU TEORETICKÝCH ETÁŽÍ

Keďže kvapalina je na teoretickej etáži v rovnováhe s parami, vzťah medzi zložením pary a kvapaliny odchádzajúcej z etáže je daný jednotlivými bodmi rovnovážnej krivky. Vzťah medzi zložením pary odchádzajúcej z etáže a spätného toku prichádzajúceho na etáž je zasa daný pracovnou čiarou pre príslušnú časť rektifikačnej kolóny. Na základe týchto vzťahov je odvodený grafický výpočet počtu teoretických etáží podľa McCabe – Thiele.



Obr. 9.5. Grafický výpočet počtu teoretických etáží podľa McCabe – Thiele [6]

- priesečník obohacovacej priamky a uhlopriečky udáva mólový zlomok prchavejšej zložky v spätnom toku x_V a mólový zlomok prchavejšej zložky v parách stúpajúcich z vrchnej etáže $y_5 = x_V$,
- s parou stúpajúcou z etáže je v rovnováhe kvapalina odtekajúca z etáže s mólovým zlomkom prchavejšej zložky x_5 , ktorý určuje bod 5 na rovnovážnej krivke, hodnote x_5 zodpovedá mólový zlomok prchavejšej zložky v parách z nižšej etáže y_4 (bod 4 – 5 na obohacovacej krivke),
- táto para je v rovnováhe s kvapalinou odtekajúcou zo štvrtej etáže s mólovým zlomkom prchavejšej zložky x_4 , čomu zodpovedá bod 4 na rovnovážnej krivke, hodnote x_4 zodpovedá mólový zlomok prchavejšej zložky v parách z ďalšej, nižšej etáže y_3 (bod 3 – 4 na obohacovacej priamke),
- atď.

Takýmto spôsobom sa získajú hodnoty mólových zlomkov prchavejšej zložky v parách a v kvapaline na jednotlivých etážach.

Takýmto spôsobom možno zistiť počet teoretických etáží, keďže jeden pravouhlý krok znamená prechod z jednej etáže na druhú, a teda počet týchto krokov udáva počet teoretických etáží. Pravouhlý krok nad priesečníkom pracovných čiar znamená prechod z obohacovacej do ochudobňovacej časti kolóny, a teda udáva nástrekovú etáž.

Ďalej sa postupuje po ochudobňovacej priamke. Posledný krok sa končí v priesečníku ochudobňovacej priamky s uhlopriečkou, čiže pri mólovom zlomku x_w a udáva pomery na dne kolóny.

Potom kolóna podľa obrázku 9.5 má počet teoretických etáží $PTE = 5 - 1$ (dno kolóny) = 4.

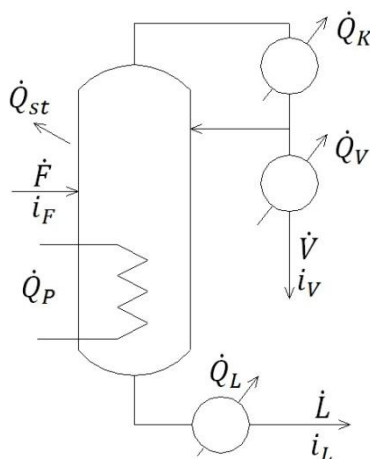
ENTALPICKÁ BILANCIA REKTIFIKAČNEJ KOLÓNY

Tepelná schéma nepretržite pracujúcej rektifikačnej kolóny je na obrázku 9.6. Entalpická bilancia zostavená podľa tejto schémy má potom tvar:

$$\dot{F} i_F + \dot{Q}_P = \dot{Q}_K + \dot{Q}_V + \dot{D} i_V + \dot{Q}_L + \dot{W} i_L + \dot{Q}_{st} \quad (9.10)$$

kde

i_F	– entalpia nástreku	(J. mol ⁻¹)
i_V	– entalpia destilátu	(J. mol ⁻¹)
i_L	– entalpia destilačného zvyšku	(J. mol ⁻¹)
\dot{Q}_P	– teplo pre odparenie kvapaliny na dne kolóny	(W)
\dot{Q}_K	– teplo odovzdané parami v kondenzátore	(W)
\dot{Q}_V	– teplo odovzdané v chladiči destilátu	(W)
\dot{Q}_L	– teplo odovzdané v chladiči destilačného zvyšku	(W)
\dot{Q}_{st}	– tepelné straty	(W)

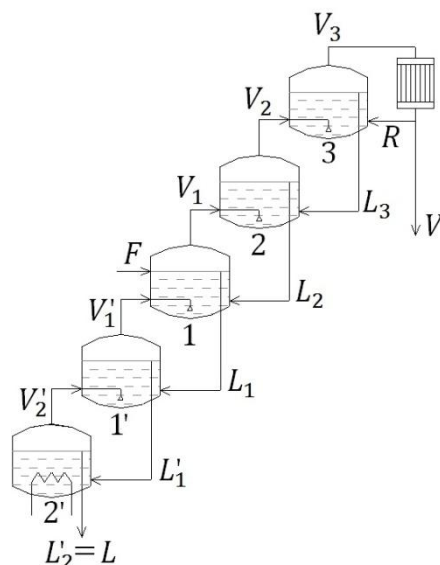


Obr. 9.6. Schéma tepelnej bilancie rektifikačnej kolóny [6]

APARÁTY

Usporiadanie kotlov, tak ako je to na obrázku 9.2 je však energeticky veľmi nevýhodné, lebo každý kotol potrebuje osobitné ohrevanie a kondenzáciu, čo zvyšuje prevádzkové náklady na teplo a chladiacu vodu.

Keďže v kotloch sa smerom nahor postupne teplota znižuje (lebo destilát z predchádzajúceho stupňa obsahuje viac prchavejšej zložky), môže sa teplo uvoľnené kondenzáciou pár využiť na ohrevanie kvapaliny vo vyššie položenom kotle. Robí sa to tak, že sa pary privádzajú rozptyľovacími zariadeniami priamo kvapaline v nasledujúcom kotle.



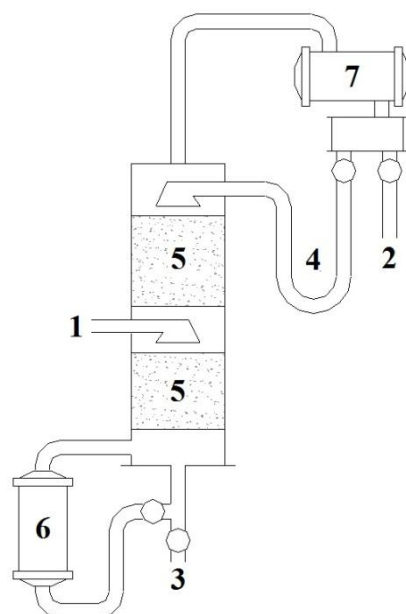
Obr. 9.7. Princíp rektifikácie [6]

Z pár kondenzuje taká časť menej prchavej zložky, aby sa teplota pary vyrovnala s teplotou kvapaliny v kotle (nastaví sa rovnováha). Uvoľneným kondenzačným teplom sa súčasne vyparí časť prchavejšej zložky kvapaliny v kotle. Ide tu o kombinovanie prestupu tepla s prestupom látky. Aby sa v prvom kotle udržala hladina kvapaliny a jej koncentrácia, musí sa časť destilátu privádzať naspäť (R na obr. 9.7). Táto časť destilátu sa nazýva spätný tok (reflux). Bez neho by celý proces prestal účinkovať, pretože po odparení určitej prchavejšej zložky by sa v prvom kotle vyrovnala teplota privádzanej pary a kvapaliny, takže koncentrácia prchavejšej zložky by bola už pred stykom pary a kvapaliny rovnovážna, čím by sa znemožnil prestup látky.

Princíp rektifikácie vo viacerých kotloch si však vyžaduje zbytočne zložité zariadenie. Ten istý efekt sa dosiahne v tzv. rektifikačnej kolóne. V nej sú nahradené kotle etážami, umiestnenými nad sebou do valcového telesa. Každá etáž predstavuje jeden kotol. Nástrek sa privádza potrubím na tzv. nástrekovú etáž, a to zvyčajne ako zmes kvapaliny a pary. Cez otvory na etáži vystupuje para nahor a na vrchu kolóny (hlavy kolóny) vychádza rúrkou do kondenzátora. Odtiaľ sa jedna časť kondenzátu vracia do veže ako spätný tok a druhá časť sa odoberá ako destilát. Spätný tok aj s pridanou kvapalnou časťou nástreku steká na dno veže. Tu sa časť vyparí a časť odteká ako destilačný zvyšok. Dno kolóny nahrádza jednu etáž a zodpovedá poslednému kotlu. Pary vystupujúce z dna kolóny sú klobúčikmi na otvoroch etáží usmernené tak, aby prebublávali cez kvapalinu na etážach, ktorá je v dôsledku spätného toku bohatšia na prchavejšiu zložku, ako zodpovedá rovnováhe medzi kvapalinou a parou. Rozdiel teplôt medzi vystupujúcou parou bohatšou na menej prchavú zložku a kvapalinou na etáži, bohatšou na prchavejšiu zložku vyvolá výmenu tepla a látky medzi oboma prúdmi. Nadbytok kvapaliny z etáží preteká cez prepadovú rúru, ktorá tvorí súčasne hydraulický uzáver nižšej etáže.

NÁPLŇOVÉ KOLÓNY

Sú to telesá valcového tvaru (obr. 9.8) vyplnené telieskami rôznych druhov (obr. 9.9a). Telieska sú nasýpané na roštoch. Tieto výplňové telieska môžu byť nahradené kompaktnou výplňou (obr. 9.9b). V medzere medzi ochudobňovacou a obohacovacou časťou je zariadenie na rozvádzanie nástreku.



Obr. 9.8. Schéma náplňovej kolóny [6]:
 1 – nástrek, 2 – destilát, 3 – destilačný zvyšok, 4 – reflux,
 5 – náplň, 6 – varák, 7 – kondenzátor



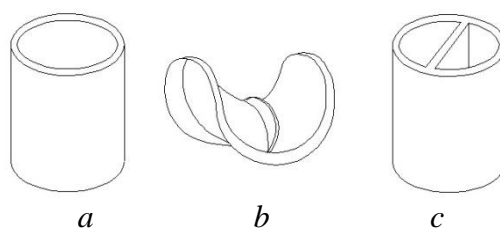
a



b

Obr. 9.9. Telieska a kompaktné výplne rektifikačných kolón [9]:
 a – výplňové telieska, b – kompaktná výplň

Princíp náplňovej kolóny spočíva na povrchovom styku kvapaliny a pary. Po povrchu náplne steká po tenkej vrstve spätný tok. Proti spätnému toku postupujú z dna pary destilovanej kvapaliny. Pri styku pár s kvapalinou postupne kondenzuje z pár menej prchavá zložka a súčasne sa pary obohacujú o prchavejšiu zložku, vyparenú zo spätného toku vplyvom uvoľneného kondenzačného tepla. V náplňových kolónach sa teda pary obohacujú plynulo. Náplňové telieska majú rôzny tvar a vyrábajú sa z plastu, keramiky alebo kovu. Najčastejšie sa používajú Raschigove krúžky, Berlove sedielka a Lessingove krúžky (obr. 9.10).



Obr. 9.10. Rôzne tvary náplní kolón [9]:

a – Raschigove krúžky, *b* – Berlove sedielka, *c* – Lessingove krúžky

Výhodou takýchto kolón je ich jednoduchá konštrukcia a malé tlakové straty.

Nevýhodou je, hlavne pri malých prietokoch kvapaliny, zlé rozdelenie kvapaliny po výške výplne, tým sa znižuje kontakt kvapaliny a pary a znižuje sa účinnosť kolóny.

ETÁŽOVÉ KOLÓNY

Používajú sa najčastejšie, a to najmä pre dobrú účinnosť v širokom rozsahu rýchlosti pár a veľký výkon na jednotkový prierez.

Podľa tvaru a funkcie možno kolóny rozdeliť podľa etáží na:

- klobúčiková etáž,
- sitová etáž,
- ventilová etáž,
- tunelová etáž.

ZOZNAM SYMBOLOV

i_F	– entalpia nástreku	(J. mol ⁻¹)
i_L	– entalpia destilačného zvyšku	(J. mol ⁻¹)
i_V	– entalpia destilátu	(J. mol ⁻¹)
m	– označenie ochudobňovacej etáže	(1)
n	– označenie obohacovacej etáže	(1)
x	– mólový zlomok v kvapalnom stave	(1)
x_F	– mólový zlomok prchavejšej zložky v roztoku v kvapalnom stave	(1)
x_L	– mólový zlomok prchavejšej zložky v destilačnom zvyšku v kvapalnom stave	(1)
x_V	– mólový zlomok prchavejšej zložky v destiláte v kvapalnom stave	(1)
y	– mólový zlomok v plynnom stave	(1)
F	– množstvo roztoku (nástrek)	(mol)
\dot{F}	– mólový tok roztoku (nástrek)	(mol. s ⁻¹)
L	– množstvo destilačného zvyšku	(mol)
\dot{L}	– mólový tok destilačného zvyšku	(mol. s ⁻¹)
L_i	– destilačný zvyšok z <i>i</i> -teho kotla	(mol)
\dot{L}_n	– mólový prietok kvapaliny	(mol. s ⁻¹)
\dot{L}_V	– vonkajší spätný tok	(mol. s ⁻¹)
\dot{Q}_{st}	– tepelné straty	(W)
\dot{Q}_K	– teplo odovzdané parami v kondenzátore	(W)

\dot{Q}_L	– teplo odovzdané v chladiči destilačnému zvyšku	(W)
\dot{Q}_P	– teplo pre odparenie kvapaliny na dne kolóny	(W)
\dot{Q}_V	– teplo odovzdané v chladiči destilátu	(W)
R	– reflux	(1)
V	– množstvo destilátu	(mol)
\dot{V}	– množstvo destilátu	(mol. s ⁻¹)
V_i	– destilát z i -teho kotla	(mol)
\dot{V}_n	– mólový prietok pár	(mol. s ⁻¹)