

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

ODABRANI TOPLINSKI SEPARACIJSKI PROCESI
ZA PROCESSE PRIJENOSA I SEPARACIJA
(Interna skripta)

Prof. dr. sc. Aleksandra Sander

Zagreb, 2014./2015.

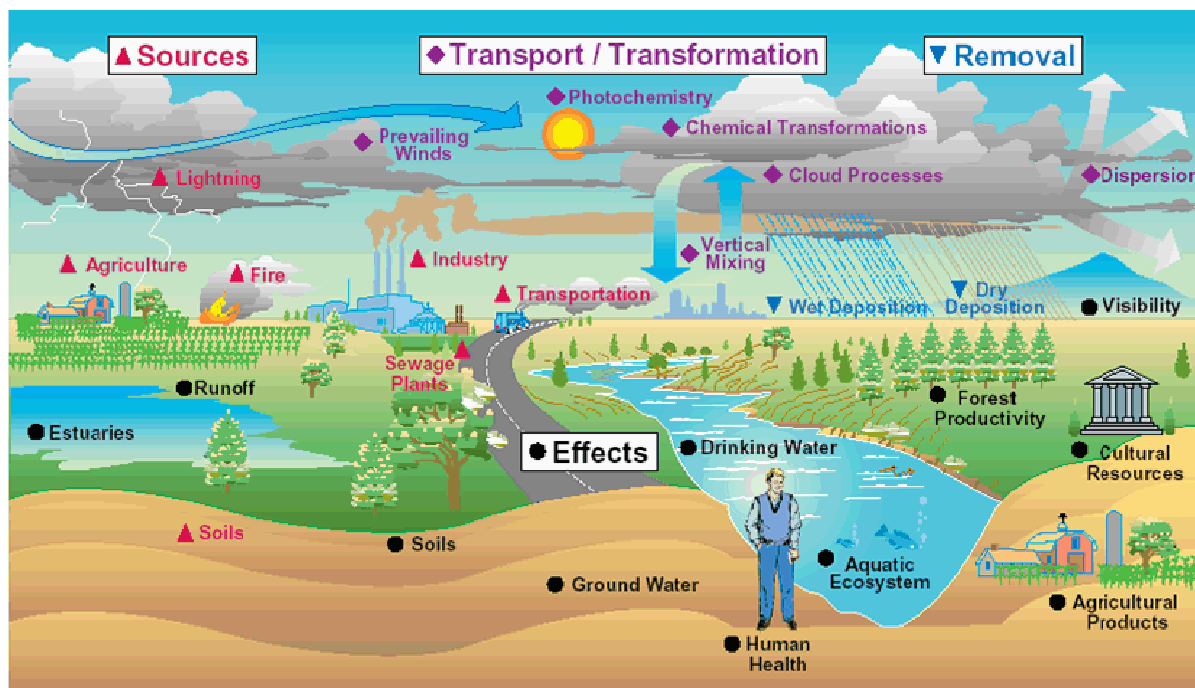
SADRŽAJ

I. UVOD	1
II. TOPLINSKI SEPARACIJSKI PROCESI	3
1. UVOD	3
1.1. Bilance tvari i energije	5
1.2. Fazna ravnoteža	7
1.3. Osnove prijenosa tvari	8
1.3.1. Molekularna difuzija	8
1.3.2. Prijenos tvari konvekcijom	9
1.3.3. Ukupni prijenos tvari	10
2. IZMJENJIVAČI TOPLINE	12
2.1. Uvod	12
2.2. Klasifikacija izmjenjivača topline	14
2.2.1. Cijevni izmjenjivači topline	17
2.2.2. Pločasti izmjenjivači topline	22
2.2.3. Spiralni izmjenjivači topline	23
2.3. Dizjan izmjenjivača topline	24
2.3.1. Odabir mjesta strujanja fluida	24
2.3.2. Toplinska analiza procesa	24
2.3.2.1. Bilancna jednadžba prijenosa topline	25
2.3.2.2. Vodena vrijednost fluida	25
2.3.2.3. Kinetička jednadžba prijenosa topline	25
2.3.2.4. Koeficijent prolaza topline	26
2.3.2.5. Površina izmjene topline,	27
2.3.2.6. Otpori naslaga	29
2.3.2.7. Pokretačka sila procesa	29
2.3.2.8. Broj teoretskih jedinica prijenosa, NTU	31
2.3.2.9. Efikasnost izmjenjivača topline	31
2.3.3. Izmjenjivači topline složene geometrije	34
2.3.4. Izmjenjivači topline s ekspaniranom površinom	35
5. SUŠENJE	36
5.1. Uvod	36
5.2. Vrste vlage u materijalu	37
5.3. Dijagrami vlažnosti	39
5.4. Načini dovođenja topline tijekom sušenja	43
5.4.1. Konvekcija	44
5.4.2. Kondukcija	44
5.4.3. Zračenje	45
5.4.4. Mikrovalno zagrijavanje	46
5.4.5. Sušenje zaleđivanjem (liofilizacija)	47
5.5. Kinetika sušenja	47
5.5.1. Period konstantne brzine sušenja	50
5.5.2. Period padajuće brzine sušenja	52
5.5.3. Proračun zraka za sušenje	57
5.5.4. Utjecaj vanjskih uvjeta na kinetiku sušenja	59
5.6. Ušteda energije kod sušenja	61
5.6.1. Rekuperacija topline	62
5.6.2. Indirektno odvlaživanje	62
5.6.3. Direktno odvlaživanje	63
5.6.4. Parcijalna izmjena zraka	63

5.6.5. Odvlaživanje i rekuperacija.....	64
5.6.6. Upotreba toplinske pumpe	64
5.7. Sušionici	65
6. DESTILACIJA.....	69
6.1. Uvod.....	69
6.2. Tlak para i vrelište.....	70
6.2.1. Dijagram vrelišta.....	70
6.2.2. Relativna hlapivost.....	71
6.3. Ravnoteža para-kapljevina	71
6.4. Destilacijske kolone	76
6.4.1. Izvedba unutrašnjosti kolone.....	79
6.4.1.1. <i>Plitice</i>	81
6.4.1.2. <i>Punila (pakovanja)</i>	85
6.4.1.3. <i>Ostali dijelovi kolona</i>	86
6.5. Kontinuirana kolonska destilacija	90
6.5.1. Bilance tvari i topline	90
6.5.2. Jednadžbe radnih pravaca.....	91
6.5.3. Određivanje broja koncentracijskih (separacijskih) stupnjeva i visine kolone	92
6.5.3.1. <i>McCabe-Thieleova metoda</i>	93
6.5.3.2. <i>Ponchon Savaritova metoda</i>	98
6.5.3.3. <i>Fenske Underwood metoda određivanja R_{min} i NTU_{min}</i>	98
6.5.3.4. <i>Gilliland-ova metoda</i>	99
6.6. Diskontinuirana jednostavna destilacija.....	99
6.7. Kontinuirana jednostavna destilacija	101
6.8. Šaržna adijabatska destilacija.....	102
6.9. Faktori koji utječu na rad kolone.....	103
7. Ekstrakcija.....	107
7.1. Uvod.....	107
7.2. Odabir radnih uvjeta.....	109
7.2.1. Odabir otapala	109
7.3. Fazna ravnoteža.....	110
7.3.1. Koeficijent raspodjele	111
7.3.2. Relativni koeficijent raspodjele.....	111
7.3.3. Ternarni dijagram.....	111
7.5. Načini dovođenja faza u kontakt.....	113
7.5.1. Jednostupnjevita šaržna ekstrakcija	113
7.5.2. Višestupnjevita istostrujna ekstrakcija	115
7.5.3. Višestupnjevita protustrujna ekstrakcija	116
7.5.4. Kontinuirana kolonska ekstrakcija	118
7.5.4.1. <i>Određivanje pokretačke sile kod kolonske ekstrakcije</i>	120
7.5.4.2. <i>Određivanje broja potrebnih koncentracijskih stupnjeva</i>	121
7.5.4.3. <i>Visina jedinice prijenosa, HTU</i>	122
7.6. Ekstraktori	123
7.6.1. Miješalica-separator	123
7.6.2. Kolonski ekstraktori	123
7.6.3. Faktori koji utječu na odabir uređaja.....	129
7.6.4. Optimalan rad ekstraktora	130
POPIS SIMBOLA.....	132
POPIS LITERATURE	135

I. UVOD

U današnje vrijeme sve je veća potreba za razvojem tehnologija koje će u što manjoj mjeri utjecati na okoliš. Proizvodni procesi rezultiraju velikim količinama otpada, koji onečišćuju zrak, vode i tlo. Osim industrijski nastalog otpada, štetan utjecaj na okoliš imaju i otpadi iz kućanstava, prometa, poljoprivrede (slika 1.1.). Pri tome onečišćenje okoliša loše utječe na zdravlje ljudi, životinja i biljaka.



Slika 1.1. Izvori onečišćenja okoliša

Industrijska postrojenja stvaraju velike količine čvrstog, plinovitog i kapljevito otpada. Kako bi se smanjile količine onečišćujućih tvari, prije otpuštanja u okoliš otpadne struje je potrebno obraditi nekom od tehnoloških operacija. Uklanjanje nečistoća uključuje procese pročišćavanja, ispiranja, separaciju, sušenje te u konačnici odlaganje otpada na za to predviđena mjesta (skladišta) sa kojih onda nema emisija u okoliš. Proces i tehnologije pročišćavanja zahtijevaju znanja iz kemijskog inženjerstva, ekoinženjerstva, industrijske opreme (uređaji), kontrole procesa te odgovarajućih analitičkih metoda.

Pročišćavanje otpadnih struja provodi se mehaničkim, toplinskim i kemijskim (otapanje, dodatak površinski aktivnih tvari) procesima. Većina procesa uključuje neku od jediničnih operacija koje se temelje na procesima prijenosa količine gibanja, tvari i/ili topline. Tako se jedinične operacije dijele na mehaničke, toplinske i difuzijske.

MEHANIČKE OPERACIJE

prijenos količine gibanja

usitnjavanje, homogeniziranje, filtracija,...

TOPLINSKE OPERACIJE

prijenos topline

zagrijavanje, destilacija, sušenje,...

DIFUZIJSKE OPERACIJE

prijenos tvari

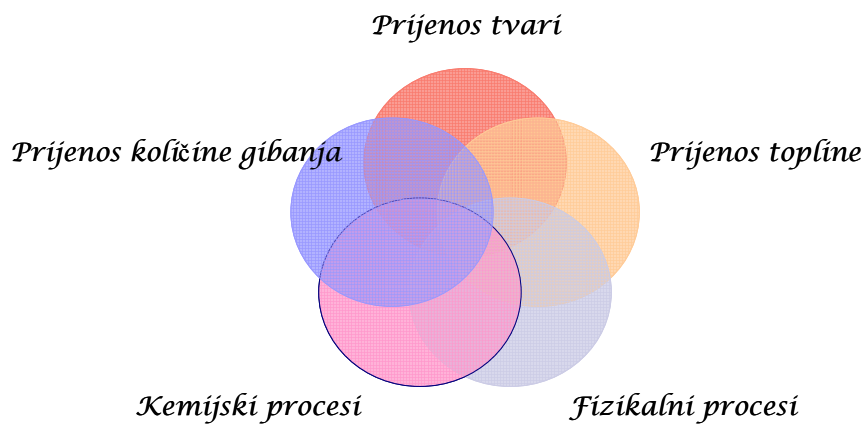
destilacija, ekstrakcija, apsorpcija,...

Na primjer otpadne vode iz proizvodnih procesa mogu sadržavati čvrste čestice. Prije ispuštanja u prirodne tokove (ili vraćanje u proces proizvodnje) čvrste se čestice moraju ukloniti filtracijom, osušiti i na kraju odložiti na odgovarajuća odlagališta otpada. Ukoliko takve vode sadrže otopljene komponente štetne za okoliš (na primjer fenol) takva se komponenta može ukloniti kapljevinskom ekstrakcijom s odgovarajućim (po mogućnosti ekološki pogodnim) selektivnim otapalom. Kako bi se selektivno otapalo moglo ponovno koristiti nastala kapljevita smjesa separira se destilacijom. Moguće je također isparavanjem ukloniti otapalo, a preostale čvrste čestice (kristale) osušiti, eventualno usitniti i deponirati. Pri tome se sekundarna para iz isparivača može koristiti za zagrijavanje (vraćanjem u ogrjevni prostor isparivača) čime se postiže i odgovarajuća ušteda na energiji. U skruberima se uklanjaju čvrste čestice iz plinova, a za uklanjanje plinovitog onečišćenja koristiti se može apsorpcija. Na ovih nekoliko primjera vidi se da su jedinične operacije o kojim će biti govora u ovom kolegiju u velikoj mjeri zastupljene u procesima obrade otpadnih tokova. Kolegij je podijeljen na mehaničke i toplinske separacijske procese.

II. TOPLINSKI SEPARACIJSKI PROCESI

1. UVOD

Toplinski separacijski procesi su procesi prijenosa tvari vođeni molekularnim silama tijekom kojih dolazi do izmjene tvari, a često i topline između barem dvije faze različitih sastava. Dakle pokretačke sile procesa su koncentracijski i temperaturni gradijent. Osim procesa prijenosa tvari i topline, često se istovremeno prenosi i količina gibanja, te su mogući različiti kemijski i fizikalni procesi (slika 1.1.). To sve govori o složenosti toplinskih separacijskih procesa.



Slika 1.1. Složenost toplinskih separacijskih procesa

Separacija smjesa odvija se u sljedećim koracima:



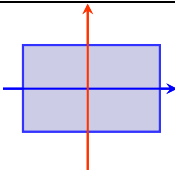
- nastajanje nove faze dovođenjem topline ili pomoćne komponente u sustav
- prijenos tvari i eventualno topline između faza
- razdvajanje faza

Kako se radi o višefaznim sustavima u kojim dolazi do izmjene tvari i topline moguće su kombinacije faza:

- kapljevina-kapljevina → ekstrakcija
- kapljevina-plin → destilacija, apsorpcija
- plin-plin
- kapljevina-krutina → kristalizacija
- plin-krutina-kapljevina → sušenje

Pri tome se faze dovode u kontakt istostrujnim, protustrujnim ili križni tokom (tablica 1.1.). Potrebno je faze dobro miješati, osigurati maksimalno moguću površinu izmjene za prijenos tvari, a time i maksimalni koeficijent prijenosa tvari.

Tablica 1.1. Načini dovodenja faza u kontakt

Istostrujni tok faza	Protustrujni tok faza	Križni tok faza
		
Kroz separacijski uređaj faze između kojih dolazi do izmjene tvari i topline struje u istom smjeru	Faze se kroz uređaj provode u suprotnim smjerovima	Faze između kojih dolazi do izmjene tvari i topline struje okomito jedna na drugu

Energija potrebna za toplinsku separaciju smjese u uređaj se može dovesti u sustav kao toplina, energija strujanja (Δp u uređaju), mehanička energija (dispergiranje, pulzacija, miješanje), rad (za rad kompresora, vakuum pumpi...).

Toplinskih separacijski procesi mogu se provoditi diskontinuirano, kontinuirano ili izmjenično. U tablici 1.2. dana je usporedba šaržnih i kontinuiranih procesa. Može se zaključiti da su prednosti uglavnom na strani kontinuiranih uređaja.

Tablica 1.2. Usporedba šaržnih i kontinuiranih procesa

kriterij za usporedbu	način rada	
	kontinuirani	šaržni
matematički opis i modeliranje	jednostavnije	
investicijski troškovi	manji	
radni troškovi	manji	
rad uređaja	lakši	
automatska kontrola procesa	mooguća	
radno naprezanje uređaja	manje	
štetnost za okoliš; nesreća	manja	
fleksibilnost uređaja u slučaju kvara		bolja
prilagodljivost drugim komponentama		bolja

Diskontinuirani rad uređaja

Kod diskontinuiranih, šaržnih procesa, smjesa koju je potrebno razdvojiti unese se u uređaj. Nakon određenog vremena, dolazi do razdvajanja u obično dvije frakcije različitog sastava, od kojih se jedna kontinuirano odvodi iz uređaja dok druga zaostaje u uređaju. U jednom stupnju, separacija često nije potpuna. Da bi se povećao stupanj separacije moguć je višestupnjevit rad.

Kontinuirani rad uređaja

Kod kontinuiranih procesa, smjesa koja se mora razdvojiti kontinuirano se uvodi u separacijski uređaj. Razdvajanje smjese i odvođenje nastalih frakcija također se odvijaju kontinuirano.

Izmjenični rad

Ukoliko je nakon separacije smjese potrebno regenerirati pomoćnu komponentu koja olakšava separaciju, barem dva uređaja moraju raditi naizmjenice. (npr. adsorpcija: nakon zasićenja adsorbenta (krute tvari koja adsorbira ključnu komponentu iz plinske faze) potrebno ga je regenerirati ispiranjem, sušenjem i hlađenjem prije ponovnog puštanja u pogon).

1.1. Bilance tvari i energije

Pri korak kod projektiranja separacijskog postrojenja je postavljanje bilanci oko pojedinih uređaja i dijelova postrojenja. Bilance tvari i energije daju se povezane sa shematskim prikazom procesa (dijagram toka). U najopćenitijem slučaju:

$$\left\{ \text{ULAZ} \right\} + \left\{ \text{GENERACIJA} \right\} = \left\{ \text{IZLAZ} \right\} + \left\{ \text{AKUMULACIJA} \right\}$$

Bilanca tvari

Postavlja se ukupna bilanca tvari i bilanca tvari ključne komponente, odnosno komponente bitna za istraživani separacijski proces. Tako su ključne komponente pojedinih separacijskih procesa:

- Isparavanje → komponenta čija koncentracija raste tijekom ugušćivanja
- Kristalizacija → komponenta koja kristalizira
- Sušenje → vlaga koja se uklanja iz materijala (uglavnom voda)
- Destilacija → lakše hlapiva komponenta
- Ekstrakcija → otopljena komponenta koja prelazi iz primarnog u sekundarno otapalo
- Apsorpcija → otopljena komponenta koja prelazi iz plinske u kapljevitostu fazu

Ukupna bilanca

$$\sum_i m_{ul,i} = \sum_i m_{iz,i} \quad (2.1.)$$

Bilanca pojedinačne komponente

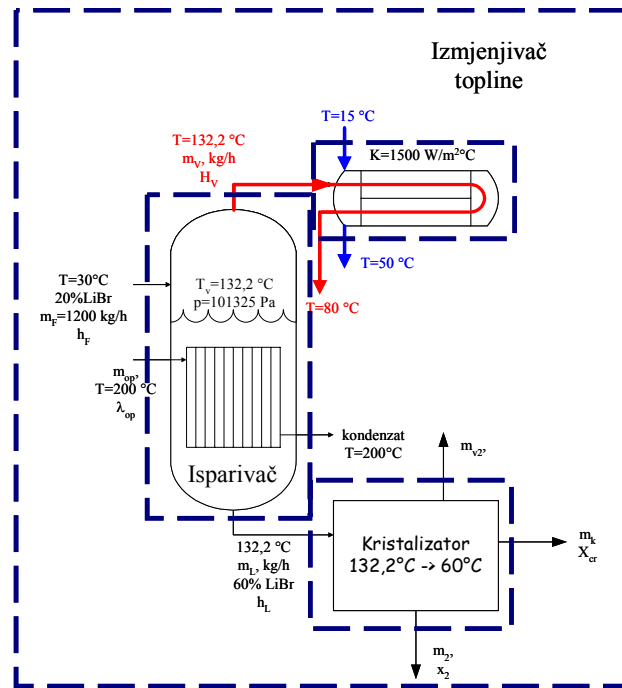
$$\sum_i m_{ul,i} \cdot x_{i,k,ul} = \sum_i m_{iz,i} \cdot x_{i,k,iz} \quad (2.2.)$$

Bilanca topline

Bilanca entalpije:

$$\sum_i m_{ul,i} \cdot h_{i,ul} + Q_{dov} + Q_{izvor} = \sum_i m_{iz,i} \cdot h_{i,iz} + Q_{ponor} + Q_{gubitaka} \quad (2.3.)$$

Za Q_{izvor} i Q_{ponora} odgovorne fazne promjene (egzotermne i endotermne) i kemijska reakcija.



Slika 2.2. Shematski prikaz procesa

Na slici 2.2. dan je primjer dijela proizvodnog procesa koji uključuje isparivač, izmjenjivač topline i kristalizator. Prilikom rješavanja ovakvih zadataka prvo se postavljaju bilance tvari a zatim i topline. Bilance tvari i topline mogu se postaviti za ukupni proces, te za svaki pojedinačni dio. U sljedećem koraku potrebno je prepoznati uređaj koji je definiran s dovoljnim brojem podataka te od njega započeti rješavanje.

Bilanca tvari

Ukupni proces:

Prati se rijetka otopina koja se prvo ugušćuje u isparivaču a zatim dolazi do kristalizacije u kristalizatoru.

$$m_F = m_v + m_2 + m_k + m_{v2} \quad (i)$$

$$m_F \cdot x_F = m_2 \cdot x_2 + m_k \cdot X_{cr} \quad (ii)$$

Bilanca isparivača:

$$m_F = m_v + m_L \quad (iii)$$

$$m_F \cdot x_F = m_L \cdot x_L \quad (iv)$$

Do sastava koncentrirane otopine dolazi se očitavanjem sa dijagrama toplivosti LiBr pri temperaturi od 132,2 °C.

Bilanca kristalizatora:

Količina isparene vode definirana je zadatkom (npr. 3% od vode prisutne na ulazu u kristalizator), odnosno:

$$m_{v2} = (1 - x_L) \cdot m_L \cdot 0,03 \quad (\text{v})$$

$X_{cr} = 1$ jer LiBr kristalizira u nehidratiziranom obliku.

$$m_L = m_{v2} + m_2 + m_k \quad (\text{vi})$$

$$m_F \cdot x_F = m_2 \cdot x_2 + m_k \cdot X_{cr} \quad (\text{vii})$$

Bilanca topline:

Za isparivač:

$$Q_F + Q_{op} = Q_v + Q_L \quad (\text{viii})$$

$$m_F \cdot h_F + m_{op} \cdot \lambda_{op} = m_L \cdot h_L + m_v \cdot H_V \quad (\text{ix})$$

ili

$$Q_{op} = Q_{zagrijavanja} + Q_{isparavanja} \quad (\text{x})$$

$$m_{op} = m_F \cdot c_{p,F} \cdot (T_v - T_F) + m_v \cdot \lambda_{T_v} \quad (\text{xi})$$

Za kristalizator:

$$Q_L = Q_{v2} + Q_k + Q_2 \quad (\text{xii})$$

$$m_L \cdot h_L = m_{v2} \cdot H_{v2} + m_k \cdot \lambda_k + m_2 \cdot h_2 \quad (\text{xiii})$$

ili količina topline koja se treba odvesti iz sustava:

$$Q = Q_{hladenja} + Q_{kristalizacije} - Q_{isparavanja} \quad (\text{xiv})$$

$$Q = m_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_v - T_2) + m_k \cdot \lambda_k - m_{v2} \cdot \lambda_{v2} \quad (\text{xv})$$

Za izmjenjivač topline:

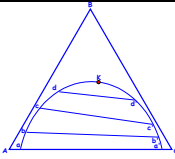
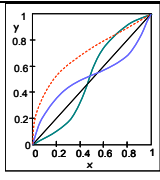
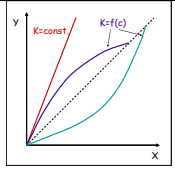
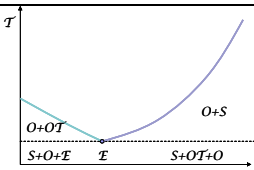
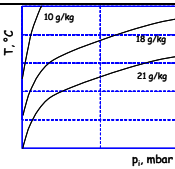
U ovom kondenzatoru para prvo kondenzira a zatim se i hladi do 80°C pa je izmijenjena količina topline:

$$Q_H = m_H \cdot c_{p,H} \cdot (T_{H2} - T_{H1}) = Q_T = m_v \cdot \lambda_{T_v} + m_v \cdot c_{p,v} \cdot (T_v - 80) \quad (\text{xvi})$$

1.2. Fazna ravnoteža

Sustav je u ravnoteži ako, u određenim stalnim vanjskim uvjetima, nema promjene na makro razini u sustavu → ne odvijaju se procesi prijenosa tvari i topline. Proces izmjene tvari i topline odvijaju se na granici faza sve do postizanja ravnotežnog stanja. Ravnoteža je osjetljiva na promjene u okolišu. Za toplinske separacijske procese bitne su ravnoteže prikazane u tablici 1.3. Za kapljevinsku ekstrakciju je potrebno poznavati ravnotežu kapljevina-kapljevina koja se prikazuje ternarnim ili distribucijskim dijagramima (trokomponentni dvofazni sustav). Destilacija zahtijeva poznavanje ravnoteže para-kapljevina i to ovisnost tlaka para, temperatura vrelišta i koncentracije parne faze o sastavu kapljevine. Ravnoteža plin-kapljevina bitna je za apsorpciju. Čvrsta faza uključena je u izluživanje, kristalizaciju i sušenje. Kod sušenja također imamo višekomponentni višefazni sustav (kapljevina, para, plin, čvrsta faza).

Tablica 1.3. Fazne ravnoteže

Faze u ravnoteži	Ravnotežni dijagram	Proces
kapljevina-kapljevina		EKSTRAKCIJA
para-kapljevina		DESTILACIJA
Plin-kapljevina		APSORPCIJA
kapljevina-krutina		KRISTALIZACIJA
plin-krutina-kapljevina		SUŠENJE

1.3. Osnove prijenosa tvari

Do prijenosa tvari dolazi zbog koncentracijskog gradijenta ili pomaka iz fazne ravnoteže. Dva su osnovna mehanizma prijenosa tvari: molekularna difuzija i konvekcija (prirodna, prisilna), i oni su analogni procesima prijenosa topline (difuzija → kondukcija; konvekcija → konvekcija).

1.3.1. Molekularna difuzija

Za opis stacionarnih procesa prijenosa tvari koriste se I Fickov zakon i Stefanov zakon, dok se za opis nestacionarnih procesa koristi II Fickov zakon.

I Fickov zakon (stacionarna ekvimolarna difuzija)

Količina tvari koja se prenese iz područja veće koncentracije u područje manje koncentracije proporcionalna je koncentracijskom gradijentu $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)$. Konstanta proporcionalnosti je difuzijski koeficijent, D [m^2s^{-1}].

Za kapljevine:
$$\dot{n}_{i,x} = -D_i \cdot A \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (2.4.)$$

$$\dot{m}_{i,x} = -D_i \cdot A \cdot M_i \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (2.5.)$$

Za plinove:
$$\dot{n}_{i,x} = -\frac{D_i \cdot A}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial x} \quad (2.6.)$$

$$\dot{m}_{i,x} = -\frac{D_i \cdot A \cdot M_i}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial x} \quad (2.7.)$$

Stefanov zakon – difuzija u jednom smjeru

Za kapljevine:
$$\dot{n}_{i,x} = -D_i \cdot A \cdot \frac{c}{c - c_i} \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (2.8.)$$

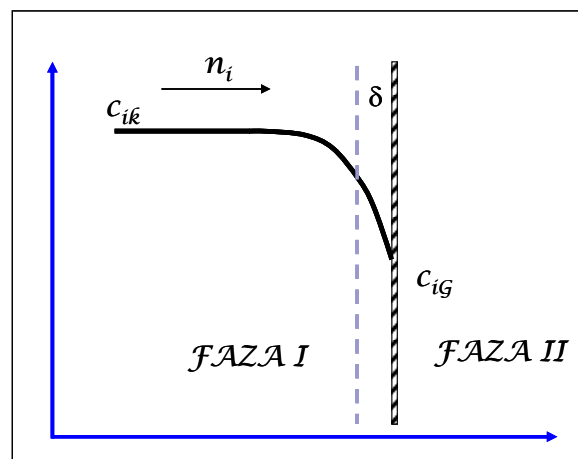
Za plinove:
$$\dot{n}_{i,x} = -\frac{D_i \cdot A}{R \cdot T} \cdot \frac{p}{p - p_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial x} \quad (2.9.)$$

II Fickov zakon

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -D_i \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (2.10.)$$

Difuzijski koeficijent ovisan je o tlaku, temperaturi i koncentraciji.

1.3.2. Prijenos tvari konvekcijom



Slika 2.3. Prijenos tvari do granice faza

Do prijenosa tvari dolazi zbog razlika u koncentracijama. Kada se govori o konveksijskom prijenosu tvari, govori se o prijenosu tvari između granice faza i fluida u gibanju ili između dva fluida u gibanju (ekstrakcija, apsorpcija). Količina prenesene tvari određuje se kinetičkom jednačom. U stacionarnim uvjetima može se pisati:

Za kapljevine:
$$\dot{n}_i = \frac{D_i}{\delta} \cdot A \cdot \Delta c_i = k_i \cdot A \cdot \Delta c_i \quad (2.11.)$$

Za plinove:
$$\dot{n}_i = \frac{D_i}{\delta} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \Delta p_i = \frac{k_i \cdot A}{R \cdot T} \cdot \Delta p_i \quad (2.12.)$$

Obzirom da se debljina graničnog sloja ne može izmjeriti (vrlo je mala) uvodi se u jednadžbu koeficijent prijenosa tvari, k_i . Koeficijent prijenosa tvari ovisi o geometriji sustava, brzini strujanja fluida te o svojstvima fluida.

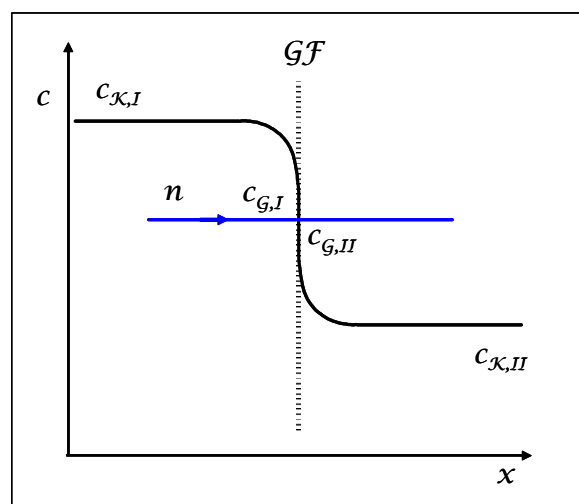
Prisilna konvekcija izazvana je strujanjem fluida. Do prirodne konvekcije dolazi zbog razlika u gustoći izazvane različitim temperaturama ili velikim razlikama u koncentraciji u jednoj fazi.

1.3.3. Ukupni prijenos tvari

Ukupni prijenos tvari iz jedne faze u drugu odvija se preko granice faza. Kod procesa prijenosa topline fluidi su razdvojeni stjenkom, a pojedinačni se otpori mogu eksperimentalno odrediti ($\alpha_1, \lambda, \alpha_2$). Kod procesa prijenosa tvari fluidi su u direktnom kontaktu (Granica Faza). Glavna je pretpostavka da su na granici faza faze u ravnoteži. Ukupni se otpor prijenosu može odrediti eksperimentalno. Pojedinačni koeficijenti prijenosa tvari procjenjuju se korištenjem odgovarajućih korelacijskih jednadžbi.

Teorija dva 'filma'

Prema teoriji dva filma (slika 2.4.) glavni otporu prijenosu nalaze se u graničnim slojevima s obje strane granice faza. Granica faza ne pruža otpor, faze su u ravnoteži. U masi faze tvar se prenosi konvektivskim mehanizmom.



Slika 2.4. Teorija dva filma

Molni protok iz I→II

$$\dot{n} = k_I \cdot A \cdot (c_{K,I} - c_{G,I}) \quad (2.13.)$$

Molni protok u II

$$\dot{n} = k_{II} \cdot A \cdot (c_{GK,II} - c_{K,II}) \quad (2.14.)$$

Uz pretpostavku ravnoteže na granici faza:

$$c_{G,I} = K^* \cdot c_{G,II} \quad (2.15.)$$

koncentracijski gradijent u fazi I

$$c_{K,I} - c_{G,I} = \frac{\dot{n}}{k_I \cdot A} \quad (2.16.)$$

koncentracijski gradijent u fazi II

$$c_{G,II} - c_{K,II} = \frac{\dot{n}}{k_{II} \cdot A} \quad (2.17.)$$

Uz pretpostavku da su koncentracije u masi povezane sa ravnotežnom koncentracijom prema:

$$c_{K,I} = K^* \cdot c_{II}^* \quad (2.18.)$$

$$c_{K,II} = \frac{1}{K^*} \cdot c_I^* \quad (2.19.)$$

Dobiva se:

$$K^* \cdot c_{II}^* - K^* \cdot c_{G,II} = \frac{\dot{n}}{k_I \cdot A} \quad (2.20.)$$

$$c_{II}^* - c_{G,II} = \frac{\dot{n}}{K^* \cdot k_I \cdot A} \quad (2.21.)$$

$$c_{II}^* - c_{G,II} = \frac{\dot{n}}{A} \cdot \left(\frac{1}{k_{II}} + \frac{1}{K^* \cdot k_I} \right) \quad (2.22.)$$

Ukupni koeficijent prijenosa tvari u fazi II:

$$\frac{1}{K_{II}} = \frac{1}{k_{II}} + \frac{1}{K^* \cdot k_I} \quad (2.23.)$$

protok:

$$n = K_{II} \cdot A \cdot (c_{II}^* - c_{K,II}) \quad (2.24.)$$

Analogno je za fazu I:

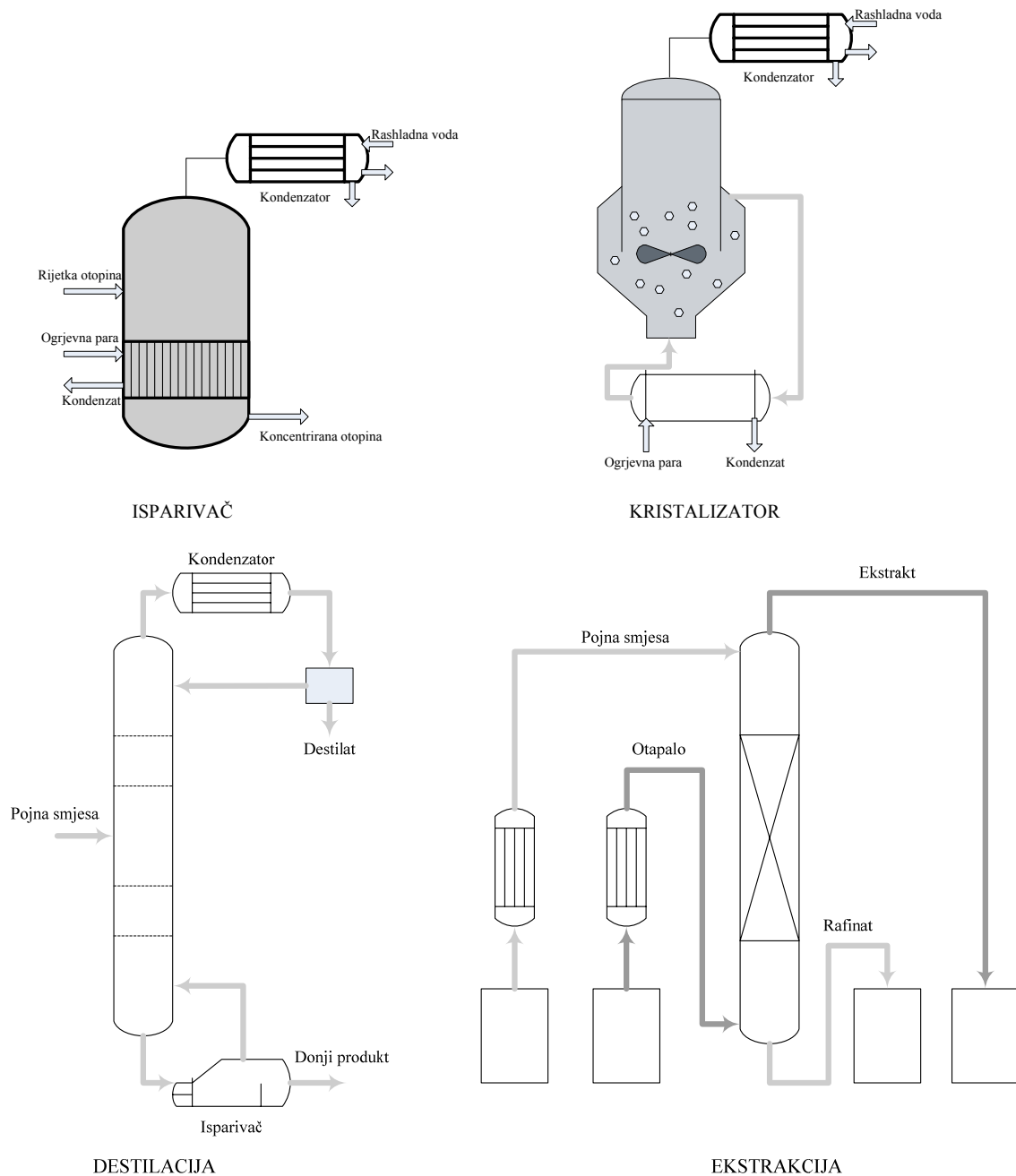
$$\frac{1}{K_I} = \frac{1}{k_I} + \frac{K^*}{k_{II}} \quad (2.25.)$$

$$\dot{n} = K_I \cdot A \cdot (c_{K,I} - c_I^*) \quad (2.26.)$$

2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

2.1. Uvod

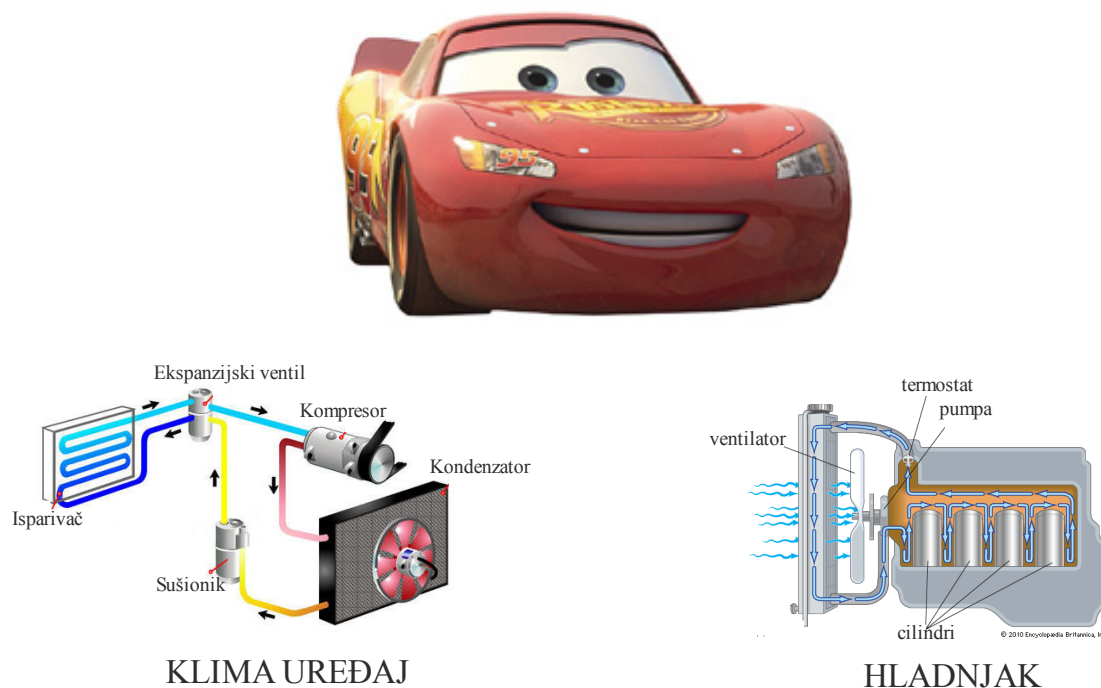
U ovom poglavlju biti će govora o izmjenjivačima topline, obzirom da gotovo i nema separacijskog procesa kod kojeg se procesne struje prije kontakta ili nakon separacije faza ne trebaju zagrijati ili ohladiti na određenu temperaturu. Izmjenjivači topline su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi sa jednog fluida na drugi bez međusobnog miješanja ta dva fluida.



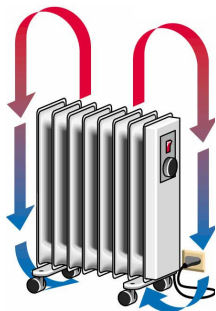
Slika 2.1. Primjeri upotrebe izmjenjivača topline

Kod isparivača i kristalizatora izmjenjivači topline su dio separatora kao unutarnja ili vanjska jedinica. U svrhu uštede energije kod sušenja, odvlaživači, hladnjaci, rekuperatori ili toplinska pumpa također su izmjenjivači topline. Svaka destilacijska kolona opremljena je sa barem dva izmjenjivača topline (isparivač i kondenzator). Kod separacijskih procesa kod kojih nije potrebno dovesti toplinu da bi došlo do prijenosa tvari (apsorpcija i ekstrakcija) dvije faze koje dolaze u kontakt u separatoru često dolaze iz nekog prethodnog separacijskog procesa, te se nalaze na različitim temperaturama. Te se procesne struje po potrebi griju ili hlade u izmjenjivačima topline.

U svakodnevnom životu, okruženi smo izmjenjivačima topline, iako o njima ne razmišljamo na taj način. Na slikama 2.2. i 2.3. prikazane su neke primjene izmjenjivača topline iz svakodnevnog života.



Slika 2.2. Primjena izmjenjivača topline u automobilima i računalima



Radijator



Klima uređaj



Bojler

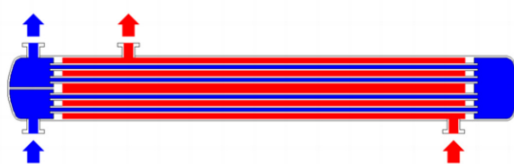


Hladnjak

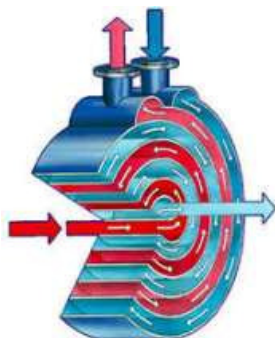
Slika 2.3. Primjena izmjenjivača topline u kućanstvu

2.2. Klasifikacija izmjenjivača topline

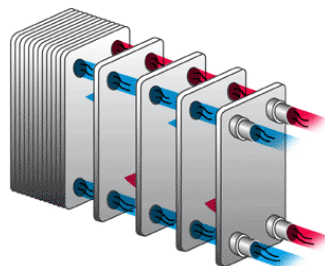
Obzirom na široku primjenu postoji velik broj različitih izmjenjivača topline, koji se onda mogu klasificirati na više načina. Tako se izmjenjivači topline mogu klasificirati obzirom na konstrukciju, smjer strujanja fluida, mehanizam prijenosa topline te način dovođenja fluida u kontakt.



Cijevni izmjenjivač topline



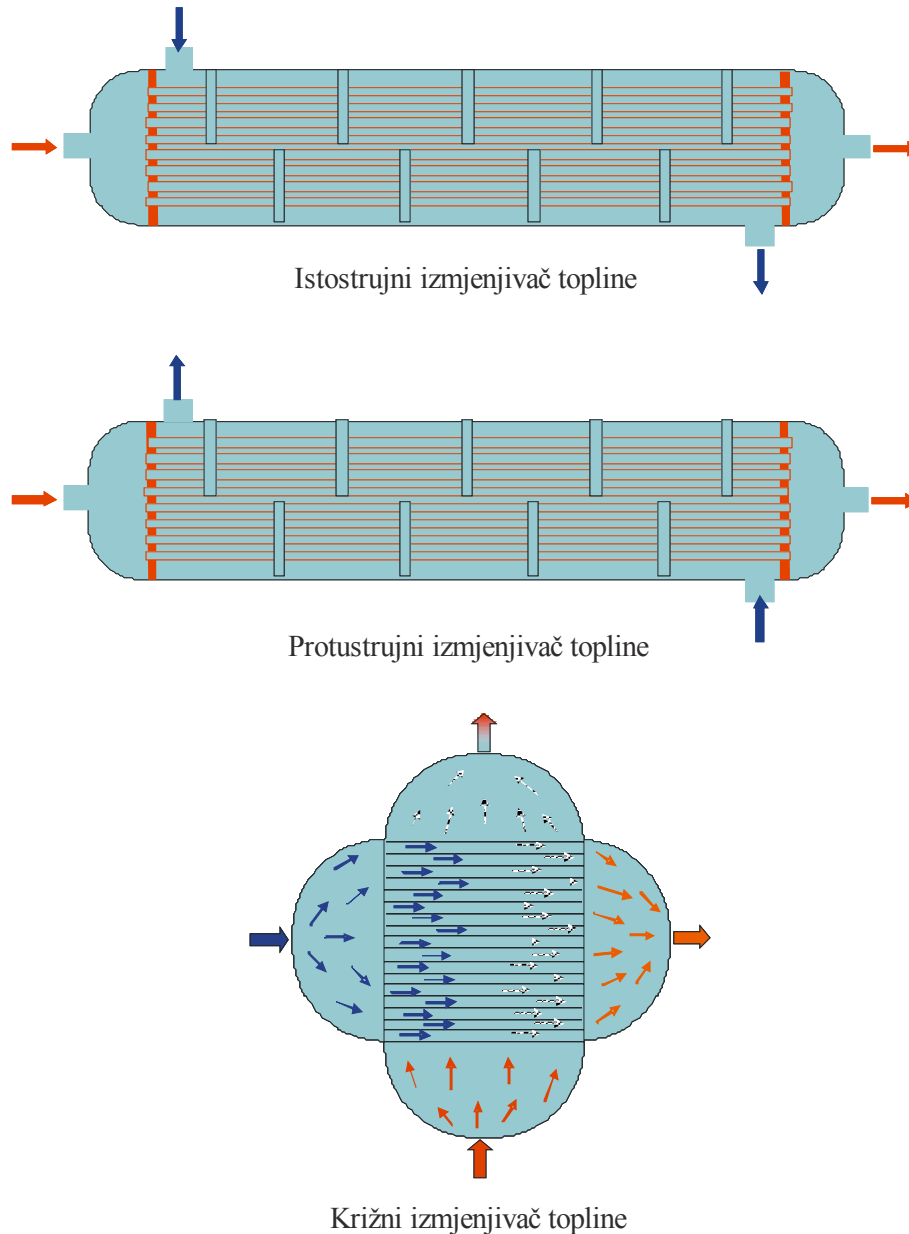
Spiralni izmjenjivač topline



Pločasti izmjenjivač topline

Slika 2.4. Vrste izmjenjivača topline obzirom na konstrukciju

Tri su osnovne konstrukcijske izvedbe izmjenjivača topline: cijevni, pločasti i spiralni izmjenjivači topline (slika 2.4.). Cijevni izmjenjivači topline imaju najširu industrijsku primjenu, iako spiralni i pločasti imaju veliku prednost što se tiče prostora koji zauzimaju u odnosu na cijevni izmjenjivač topline iste površine izmjene. O ostalim prednostima i nedostacima pojedine vrste izmjenjivača topline biti će govora kasnije.



Slika 2.5. Podjela izmjenjivača topline obzirom na smjer strujanja fluida

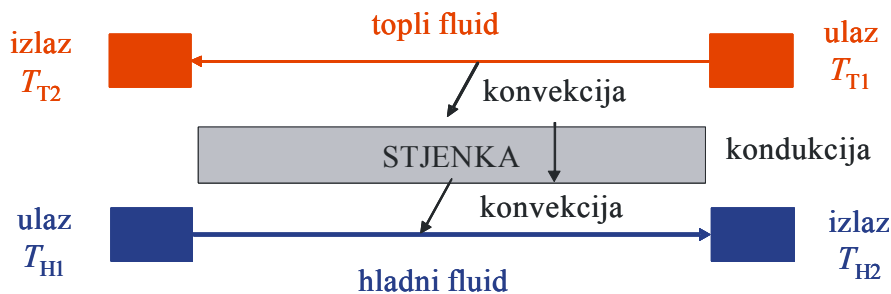
Sljedeća značajna podjela je obzirom na smjer strujanja fluida (slika 2.5.), tako da postoje istostrujni, protustrujni i križni izmjenjivači topline. Kod istostrujnih izmjenjivača topline topli i hladni fluid ulaze u uređaj na istoj strani, kod protustrujnih na suprotnim stranama, dok kod križnih ulaze okomito jedan na drugi. Za razliku od istostrujnih izmjenjivača topline kod kojih se lokalna pokretačka sila mijenja

znatno duž cijevi (najveća je na ulazu a najmanja na izlazu oba fluida), za protustrujne izmjenjivače topline karakteristično je da je pokretačka sila gotovo konstantna duž cijevi. Dakle, kada fluidi struje u suprotnim smjerovima manja je opasnost od oštećenje uređaja zbog velikih temperaturnih razlika na različitim krajevima uređaja. Osim toga ujednačena je brzina izmjene topline duž cijelog izmjenjivača topline. Kako se toplina izmjenjuje kod križnih izmjenjivača topline ovisi o tome da li su oba ili samo jedan fluid s nemiješanim tokom. Naime, kod križnih izmjenjivača topline jedan fluid struji kroz cijevi (i to nemiješanim tokom), a drugi kroz plašt (miješanim tokom). Ako se na vanjskoj strani cijevi postave lamele koje usmjeravaju fluid kroz plašt, tada i taj fluid struji nemiješanim tokom, što rezultira potpuno drugačijim brzinama izmjene topline od onog ostvarenog kada je jedan fluid miješani.

Za opis procesa prijenosa topline u izmjenjivaču topline potrebno je poznavanje principa prijenosa topline konvekcijom, kondukcijom te ponekad i radijacijom. Uglavnom se toplina kroz fluide prenosi konvektivskim mehanizmom, a kroz stjenku preko koje dolazi do izmjene topline kondukcijom (slika 2.6.). Koji će od mehanizama biti kontrolirajući ovisi o odgovarajućim otporima prijenosu topline: konveksijski otpor, R_f , na strani fluida, te konduksijski otpor, R_s , koji pruža sama površina prijenosa topline.

$$R_f = \frac{1}{\alpha} \quad (2.1.)$$

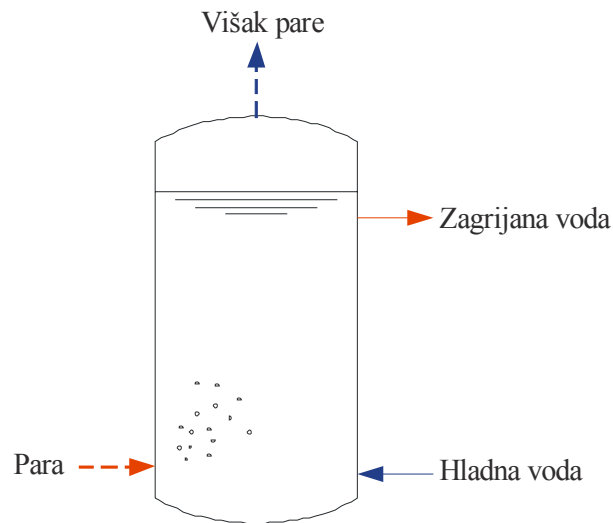
$$R_s = \frac{\ell}{\lambda} \quad (2.2.)$$



Slika 2.6. Mehanizmi prijenosa topline

- Ovdje su :
- α - koeficijent prijenosa (prijelaza) topline, $W m^{-2} K^{-1}$
 - λ - koeficijent toplinske vodljivosti, $W m^{-1} K^{-1}$
 - ℓ - debljina stjenke preko koje se prenosi toplina, m
 - T_{T1} i T_{T2} – temperatura toplog fluida na ulazu i izlazu, K
 - T_{H1} i T_{H2} – temperatura hladnog fluida na ulazu i izlazu, K

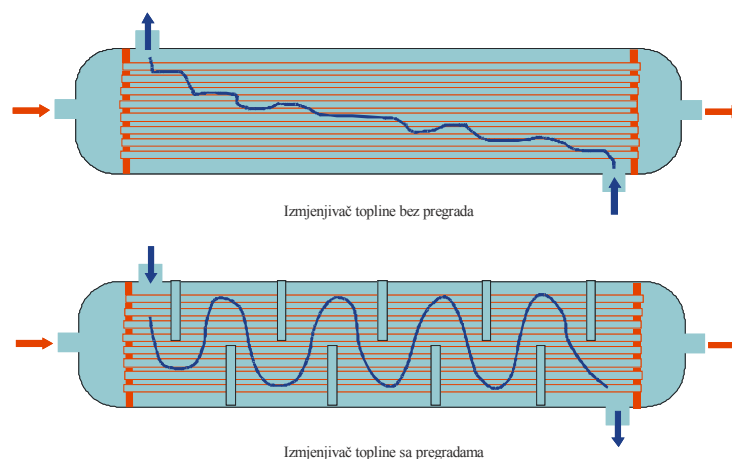
Na kraju, obzirom na način kontaktiranja fluida, postoje direktni i indirektni izmjenjivači topline. Izmjenjivači topline su uglavnom indirektni, odnosno toplina se prenosi između dva fluida preko površine izmjene bez njihovog međusobnog kontakta. Primjer direktnog kontakta dva fluida, kod kojeg se vruća para koristi za zagrijavanje hladne vode, prikazan je na slici 2.7.



Slika 2.7. Direktni izmjenjivač topline

2.2.1. Cijevni izmjenjivači topline

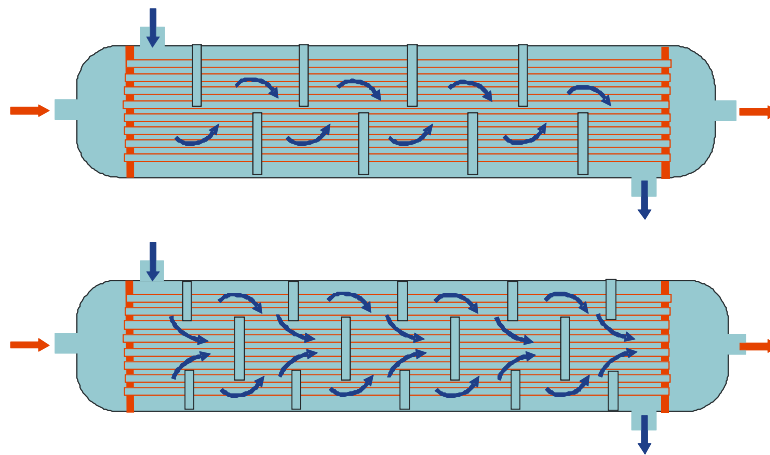
Cijevni izmjenjivači topline najčešće se koriste u industriji. Mogu prenositi velike količine topline, osigurati veliku površinu izmjene i uglavnom su jednostavni za čišćenje. Sastoje se od snopa cijevi, kroz koji struji jedan fluid, koji je smješten u plašt kroz koji struji drugi fluid, pri čemu su cijevi mehanički povezane sa plaštem. Cijevi moraju biti u potpunosti ispunjene fluidom kako ne bi postojala mjesta ispunjena zrakom. Naime zrak ima nisku toplinsku vodljivost što rezultira smanjenjem količine prenesene topline, odnosno smanjenjem efikasnosti. Osim toga mogu se stvoriti vruća mjesta gdje može doći do oštećenja cijevi ako se ne hlade ispravno. Plašt iz istih razloga mora biti u potpunosti ispunjen fluidom. Ukoliko dođe do stvaranja zračnih džepova, zrak se može ispustiti van preko ugrađenih ventila.



Slika 2.8. Strujanje fluida kroz plašt izmjenjivača topline bez i sa pregradama

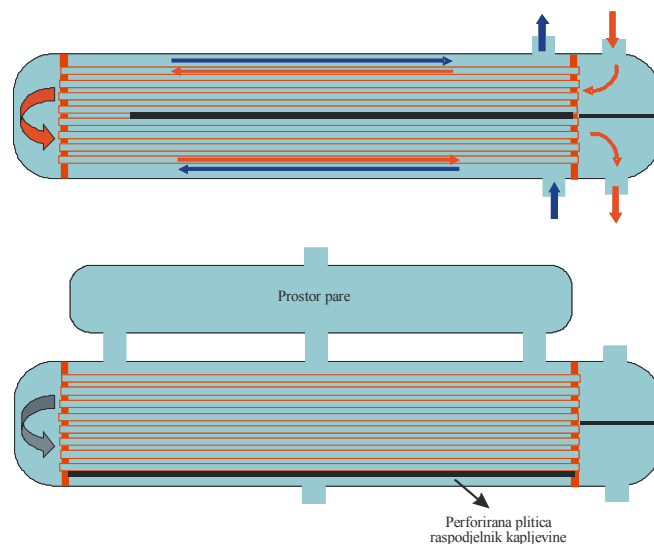
Osim snopa cijevi i plašta unutar izmjenjivača topline nalaze se i pregrade. Pregrade se koriste da se poveća brzina strujanja fluida kroz plašt. Osiguravaju da fluid ne struji kraćim putem između ulaza i izlaza zbog čega bi došlo do nastajanja mjesta gdje je fluid stacionaran a prijenos topline slab (slika 2.8.). U navedenom slučaju efikasnost izmjene topline bila bi znatno manja, jer nije iskorištena raspoloživa površina izmjene topline. Dakle pregrade imaju višestruku ulogu. Osim što su cijevi na njih fiksirane, pomažu pri smanjivanju vibracija zbog vrtloga nastalih strujanjem i usmjeravaju fluid poprečno. Kada fluid nastruji na pregradu (prepreku) dolazi do stvaranja vrtloga (turbulencije) čime se smanjuju otpori prijenosu količine gibanja i topline. Pregrade mogu biti poprečne i uzdužne. Poprečne pregrade mogu se slagati na dva osnovna načina, ovisno o načinu na koji usmjeravaju fluid unutar plašta (slika 2.9.):

- jedan segment → popreko svih cijevi i onda mijenjaju smjer; veliki pad tlaka
- dva segmenta → bolji prijenos topline i manji pad tlaka; smanjuje se utjecaj velikog broja promjene smjerova



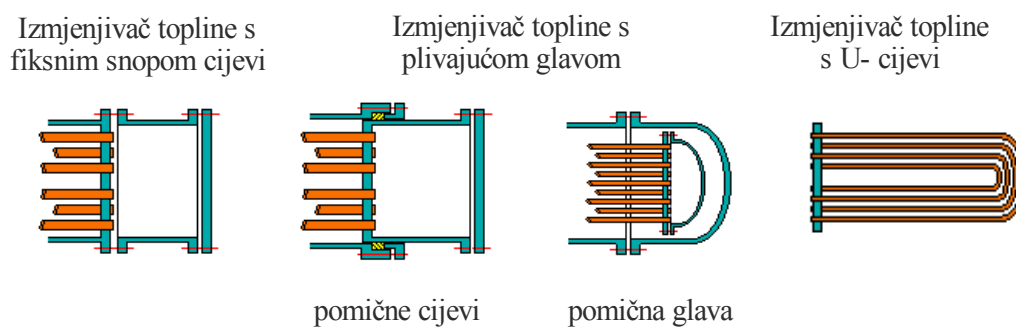
Slika 2.9. Način slaganja poprečnih prepreka

Uzdužne prepreke služe za usmjeravanje fluida koji struji kroz plašt, tako da kroz jedan plašt, fluid prođe dva puta (IT 2-2), (slika 2.10.).



Slika 2.10. Izmjenjivač topline s uzdužnom preprekom

Cijevi se na različite načine slažu unutar plašta, te mogu biti izmjenjivači topline sa fiksnim snopom cijevi, sa plivajućom glavom ili U-cijevi (slika 2.11.). Kroz izmjenjivač topline struje fluidi različitih temperatura, protoka i toplinskih svojstava. Zbog velikih razlika u temperaturama fluida koji struje kroz plašt i cijevi može doći do deformacije plašta i cijevi, što može rezultirati pucanjem cijevi ili izbacivanjem cijevi iz snopa. Plašt i cijevi su uglavnom izrađeni iz različitih materijala, tako da je opasnost od loma velika. Pri istim temperaturnim razlikama različiti metali se rastežu u drugačijim omjerima. Osim toga isti se materijal drugačije rasteže pri različitim temperaturama. Kako prilikom prolaska fluida kroz izmjenjivač topline dolazi do izmjene topline između toplog i hladnog fluida, temperature cijevi i plašta mijenjaju se po njegovoj duljini. Zbog svega navedenog izmjenjivači topline sa fiksnim snopom cijevi koriste se samo kada su razlike u temperaturama toplog i hladnog fluida male. U svim ostalim slučajevima koriste se izmjenjivači topline s plivajućom glavom ili sa U-cijevi. Kod izmjenjivača topline s fiksnim snopom cijevi, snop cijevi je učvršćen za plašt te je nemoguće uklanjanje snopa cijevi zbog čišćenja. Kod izmjenjivača topline s plivajućom glavom ili sa U-cijevi, cijevi su samo s jedne strane fiksirane za plašt, dok im je druga strana slobodna, čime se omogućava rastezanje i skupljanje cijevi pri povišenim, odnosno sniženim temperaturama. Plašt i cijevi mogu ekspanzirati neovisno jedno o drugome.



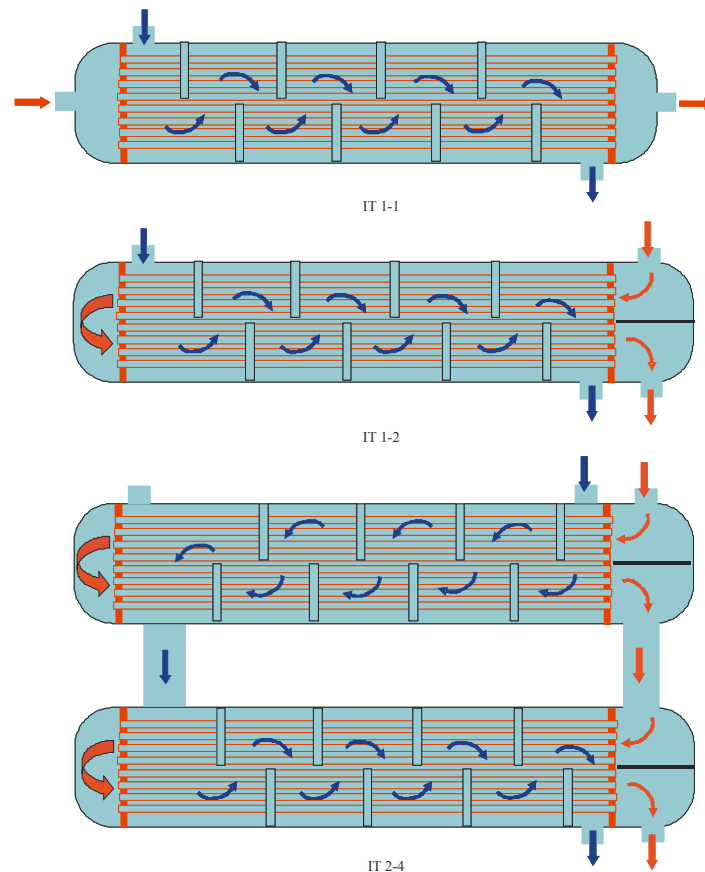
Slika 2.11. Slaganje cijevi u snop

U izmjenjivač topline s U-cijevi, smješten je snop savnutih cijevi različitih duljina tako da je plašt maksimalno ispunjen cijevima, čime se osigurava velika površina izmjene topline. Svaka se cijev rasteže neovisno o drugim cijevima. Sve cijevi imaju dovoljno prostora za rastezanje i skupljanje. Osim toga cijevi se izvana mogu lagano očistiti. Glavni nedostatak je da je zbog oblika cijevi jako otežano čišćenje cijevi iznutra, te se takvi izmjenjivači topline koriste samo kada je moguće kemijsko čišćenje cijevi. Što se tiče izmjenjivača topline s plivajućom glavom, dvije su osnovne izvedbe plivajućih glava. Jedan način je taj da na kraju izmjenjivača topline gdje su cijevi pomične postoji prostor u koji cijevi tijekom rastezanja mogu ući. Cijevi se gibaju kroz perforiranu ploču. Drugi način izvedbe takvih izmjenjivača topline s pomičnom plivajućom glavom, gdje su cijevi pričvršćene za plivajuću glavu. Snop cijevi u takvom izmjenjivaču topline može se čistiti iznutra i izvana, pa se mogu koristiti za nečiste fluide.

Obzirom na broj prolaza fluida kroz cijevi i plašt, grupiraju se u izmjenjivače topline jednostavne i složene geometrije, te se nazivaju na sljedeći način:

IT broj prolaza kroz plašt-broj prolaza kroz cijevi

Tako da na primjer IT 1-2 znači da se radi o izmjenjivaču topline kod kojeg fluid kroz plašt prolazi jedan puta, a kroz cijevi dva puta.



Slika 2.12. Neke izvedbe cijevnih izmjenjivača topline

Ovisno o tome da li dolazi do promjene agregatnog stanja fluida izmjenjivači topline mogu biti jednofazni (grijanje ili hlađenje kapljevine ili plina) ili dvofazni (kondenzacija ili isparavanje), pa se mogu grupirati u četiri osnovne skupine:

- ✓ Jednofazni – u cijevi i plaštu ne dolazi do promjene agregatnog stanja fluida
- ✓ Kondenzirajući – s jedne strane površine izmjene topline dolazi do kondenzacije fluida, a drugi fluid ne mijenja agregatno stanje
- ✓ Isparavajući - s jedne strane površine izmjene topline dolazi do isparavanja fluida, a drugi fluid ne mijenja agregatno stanje
- ✓ Kondenzirajući/isparavajući – jedan fluid kondenzira a drugi isparava.

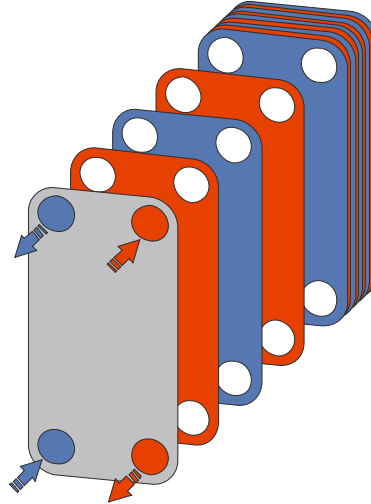
Obzirom na navedeno koristi se sljedeća nomenklatura:

- ✓ **Izmjenjivač topline** → niti jedan fluid ne mijenja agregatno stanje (jednofazni); oba fluida su procesni tokovi
- ✓ **Hladnjak** → jedan fluid je procesni tok, a drugi rashladna voda ili zrak
- ✓ **Grijač** → jedan fluid je procesni tok, a drugi ogrjevni medij (para ili ulje)
- ✓ **Kondenzator** → koristi se za hlađenje para i kondenzaciju
- ✓ **Zamrzivač** → jedan fluid kondenzira pri niskim temperaturama

- ✓ **Kotlasti isparivač (*reboiler*)** → jedan fluid je donji produkt destilacijske kolone, a drugi je ogrjevni medij (para ili ulje) ili procesni tok.

2.2.2. Pločasti izmjenjivači topline

Kod pločastih izmjenjivača topline toplina se između dva fluida izmjenjuje preko metalnih ploča razvijene površine, koje su na određenom razmaku (1,3 do 1,5 mm) umetnute u okvir.



Slika 2.13. Pločasti izmjenjivač topline

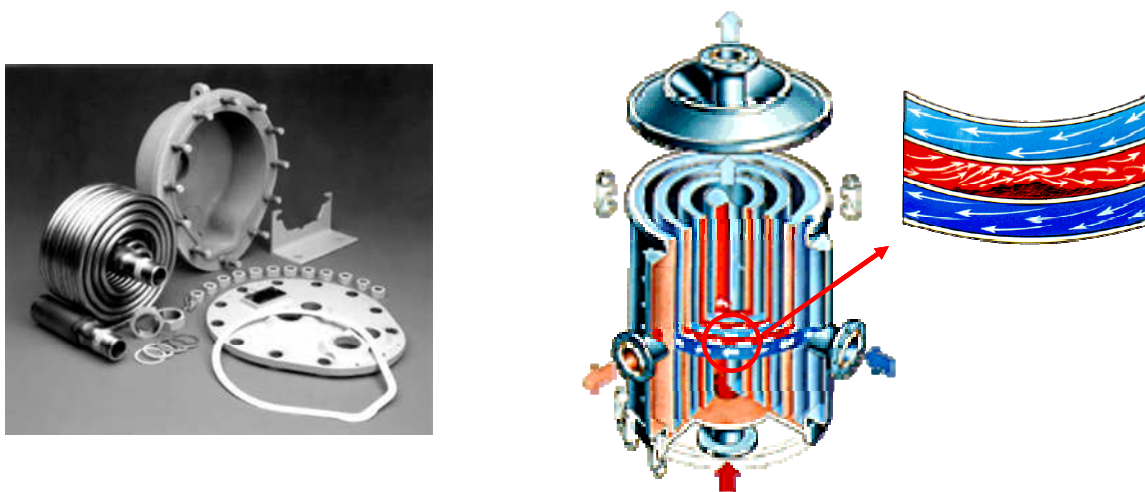
Ploče su povezane brtvama, zavarene ili zalemljene. Svaka ploča ima otvore za topli i hladni fluid koji su spojeni tako da sa jedne strane ploče struji hladni a sa druge topli fluid, bez međusobnog miješanja. Ploče su naborane tako da se s povećá površina izmjene topline i druge strane povećá turbulencija a time i brzina prijenosa topline sa toplog na hladni fluid. Pločasti izmjenjivači topline odlikuju se mnogim prednostima ali i nekim nedostacima. Ako ih usporedimo sa cijevnim izmjenjivačima topline, onda pločasti uz istu površinu izmjene topline zauzimaju znatno manji volumen (50 do 80 % manje prostora zauzimaju). Čak 3 do 5 puta je većá brzina prijenosa topline u odnosu na cijevne izmjenjivače topline. Nadalje, mogu se koristiti za širok raspon fluida i radnih uvjeta, zbog svoje fleksibilnosti. Broj i vrsta ploča se vrlo jednostavno može promijeniti ovisno o potrebama. Naime jedan kraj pločastih izmjenjivača topline je fiksán dok se na drugom kraju ploče mogu mijenjati, dodavati ili oduzimati. Na taj je način omogućeno i jednostavno čišćenje, odnosno servisiranje izmjenjivača topline. Pločasti izmjenjivači topline mogu raditi uz vrlo male razlike u temperaturama toplog i hladnog fluida. Još jedna od prednosti je da je u pločastim izmjenjivačima topline ostvaren stvarni protustrujni tok toplog i hladnog fluida, pa nije potrebno korigirati pokretačku silu procesa prijenosa topline. Osnovni nedostatak pločastih izmjenjivača topline kod kojih su ploče povezane brtvama je duljina tih brtvi. Kod njih postoji i opasnost od curenja fluida u okoliš ali se to lako uočava. Obzirom da dolazi do velikog pada tlaka, veliki su radni i kapitalni troškovi pumpi. I na kraju, u osnovi se ne mogu koristiti za fluide koji sadrže nečistoće (čestice) jer se zbog malih razmaka između ploča lagano mogu zaštopati.



Slika 2.14. Vrste pločastih izmjenjivača topline

2.2.3. Spiralni izmjenjivači topline

Spiralni izmjenjivači topline postoje u dvije osnovne izvedbe: spiralni pločasti i spiralni cijevni (slika 2.15.).



Slika 2.15. Spiralni cijevni i spiralni pločasti izmjenjivač topline

Kod spiralnog pločastog izmjenjivača topline dvije su paralelne ploče savinute u spiralu čime nastaju dva dugačka pravokutna prolaza. Spiralni cijevni izmjenjivači topline sastoje se od savijene spiralne cijevi smještene u plašt izmjenjivača topline. Kao i kod pločastih izmjenjivača topline osiguran je stvarni protustrujni tok fluida.

Zbog zakrivljenog toka stvara se turbulencija čime se poboljšava prijenos topline, te nema problema povezanih sa toplinskom ekspanzijom. Pojačana turbulencija olakšava samočišćenje, pa su spiralni izmjenjivači topline pogodni za fluide sklone stvaranju naslaga i muljeve. Zbog samočišćenja su im niski troškovi održavanja. Često se koriste kao isparivač i kondenzator. Kompaktnog su dizajna,

odnosno u malom volumenu osiguravaju veliku površinu izmjene topline pa štede prostor. Čak do 3 puta im je efikasnost izmjene topline veća od cijevnih izmjenjivača topline.

2.3. Dizajn izmjenjivača topline

Dizajn izmjenjivača topline uključuje:

- toplinsku analizu procesa
- procjenu snage pumpe
- procjenu veličine i težine uređaja
- pad tlaka
- odabir fluida u cijevi i u plaštu
- ekonomski aspekt

Obzirom na sadržaj kolegija u ovom će se poglavlju govoriti o toplinskoj analizi procesa, koja uključuje i površinu izmjene topline te odabiru mjesta strujanja fluida.

2.3.1. Odabir mjesta strujanja fluida

Mjesto strujanja fluida (cijev ili plašt) ima značajan utjecaj na izvedbu, ekonomski aspekt i održavanje izmjenjivača topline. Odabir se temelji na sklonosti stvaranja naslaga, korozivnosti fluida, viskoznosti fluida i protocima, radnom tlaku te agregatnom stanju fluida. Fluidi skloni stvaranju naslaga te korozivni fluidi smještaju se u cijevi. Naime, mnogo je jednostavnije čišćenje jer je brzina strujanja fluida u cijevima veća, što rezultira otkidanjem naslaga. Fluidi veće viskoznosti smještaju se u plašt jer se u plaštu zbog nastrijavanja fluida na pregrade povećava turbulencija. Potrebni su veliki koeficijenti prijenosa topline, a koeficijent prijelaza topline, α , ima veće vrijednosti ako je strujanje turbulentno. Ako je brzina strujanja fluida takva da su vrijednosti Reynoldsovih značajki manje od 200, smješta se u cijevi. Fluid koji je pri višem tlaku trebao bi strujati kroz cijevi, zbog jeftinije izvedbe i manje opasnosti od pucanja na spojnim mjestima. Naime kada bi se takav fluid smjesti u plašt, plašt bi morao biti dovoljno velike debljine i načinjen od skupljeg materijala. Obzirom da para zauzima veći volumen, potrebno ju je smjestiti u plašt.

2.3.2. Toplinska analiza procesa

Za toplinsku analizu procesa potrebno je poznavanje:

- vrste fluida
- protoka oba fluida
- ulaznih i izlaznih temperatura oba fluida
- specifičnih toplinskih kapaciteta toplog i hladnog fluida
- gustoće, viskoznosti
- količine topline koja se mora izmijeniti

- koeficijent prijenosa topline, α , i koeficijenta toplinske vodljivosti stjenke, λ
- materijal
- ODABIR KONFIGURACIJE IT-a

2.3.2.1. Bilancna jednadžba prijenosa topline

U izmjenjivaču topline topli fluid preda količinu topline jednaku:

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T \quad (2.3.)$$

a hladni fluid primi:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H \quad (2.4.)$$

gdje je: \dot{Q} - toplinski tok, W

\dot{m} - maseni protok fluida, kg/s

c_p - specifični toplinski kapacitet, J/kgK

$\Delta T = T_2 - T_1$ - ostvarena promjena temperature fluida, K

2.3.2.2. Vodena vrijednost fluida

Vodena vrijednost fluida, odnosno vodeni ekvivalent ili kapacitivnu brzinu jednaka je umnošku masenog protoka fluida i njegovog specifičnog toplinskog kapaciteta:

$$C = \dot{m} \cdot c_p \quad (2.5.)$$

C, vodena vrijednost, J s⁻¹ K⁻¹.

Uz pretpostavku da nema gubitaka topline može se napisati:

$$\dot{m}_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T \quad (2.6.)$$

odnosno:

$$\frac{C_H}{C_T} = \frac{\Delta T_T}{\Delta T_H} \quad (2.7.)$$

Za proračun broja jedinica prijenosa i efikasnosti izmjenjivača topline značajna je minimalna vodena vrijednost, odnosno vodena vrijednost fluida koji je ostvario veću promjenu temperature. Tako na primjer, ako je topli fluid ostvario veću promjenu temperature, topli fluid ima minimalnu vodenu vrijednost, što proizlazi iz bilance topline.

$$\Delta T_T > \Delta T_H \quad \Rightarrow \quad C_T < C_H \quad \Rightarrow \quad C_T = C_{\min}$$

2.3.2.3. Kinetička jednadžba prijenosa topline

Količina topline koja se izmjeni između toplog i hladnog fluida može se izračunati i korištenjem kinetičke jednadžbe:

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (2.8.)$$

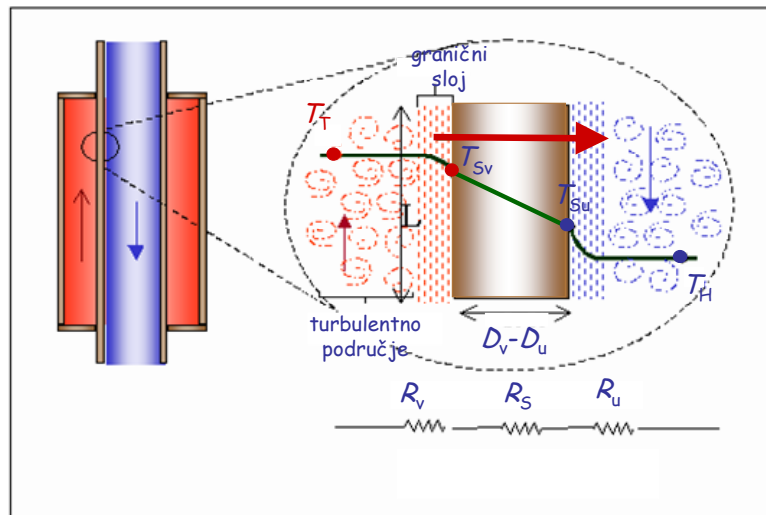
gdje su:

K	- koeficijent prolaza topline, W/m^2K
A	- površina izmjene topline, m^2
ΔT_{LM}	- pokretačka sila procesa, K

2.3.2.4. Koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline, K , definira se kao recipročna vrijednost sume svih otpora prijenosu topline prisutnih u danom sustavu (konvekcija, kondukcija, naslage):

$$K = \frac{1}{\sum_i R_i} = \frac{1}{\sum_j R_{konvekcijski,j} + \sum_k R_{kondukcijski,k} + \sum_l R_{f,l}} \quad (2.9.)$$



Slika 2.16. Otpori prolazu topline kod izmjenjivača topline

Ovdje su:

T_{sv} i T_{su}	- temperatura vanjske i unutrašnje strane stjenke, K
D_v i D_u	- vanjski i unutrašnji promjer stjenke, m
R_v , R_s i R_u	- vanjski otpor, otpor stjenke i unutrašnji otpor prolazu topline, m^2KW^{-1}

Otpor konvekcijском prijenosu topline:

$$R_{konvekcijski} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.10.)$$

Otpor kondukcijskom prijenosu topline:

$$R_{kondukcijski} = \frac{\ell}{\lambda} \quad (2.11.)$$

Otpor naslaga naziva se još i Fouling faktor, R_f .

gdje je: α - koeficijent prijelaza topline, W/m^2K

λ - koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK

d – linearna dimenzija (debljina stjenke cijevi), m

Kod realnog izmjenjivača topline uzima se da je koeficijent prolaza topline u funkciji duljine cijevi, $K=f(L)$, jer se njegova vrijednost mijenja po duljini izmjenjivača. Za preliminarni se proračun uzima da je $K=const$. Koeficijent prijelaza topline, α , ovisi o vodljivosti fluida i debljini toplinskog graničnog sloja, dok debljina sloja ovisi o režimu strujanja ($Re=f(v, d, \rho, \eta)$), pri čemu su ρ (gustoća) i η (viskoznost) podložni temperaturnoj promjeni.

Prilikom procjene koeficijenta prolaza topline uzimaju se u obzir sljedeće pretpostavke:

- $m_H=const, m_T=const$
- $c_{pH}=const, c_{pT}=const$
- $K=const$
- nema gubitaka topline
- nema kondukcije u aksijalnom smjeru (duž cijevi).

2.3.2.5. Površina izmjene topline,

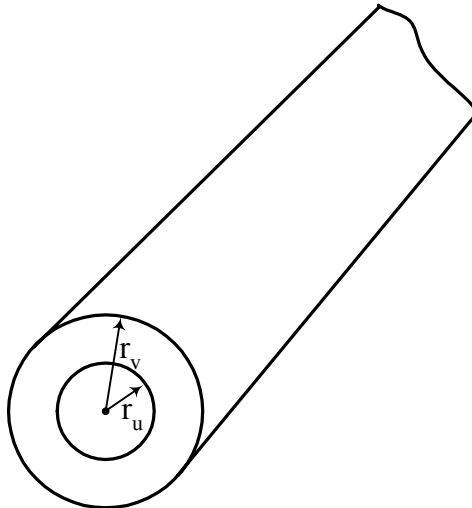
Površina izmjene topline, A , kod cijevnog izmjenjivača odgovara površini plašta cijevi:

$$A_{cijevi} = d \cdot \pi \cdot L \quad (2.12.)$$

Za izmjenu topline preko ravne stjenke koeficijent prolaza topline računa se prema:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u} + \sum_l R_{f,l}} \quad (2.13.)$$

Kod cijevnog izmjenjivača topline površine izmjene topline na strani toplog i hladnog fluida nisu jednake, obzirom da stjenka ima određenu debljinu:



Slika 2.17. Površina izmjene topline

Za procjenu koeficijenta prolaza topline kod cijevnog izmjenjivača topline, u kinetičku je jednadžbu potrebno uvrstiti površinu uz koju se nalazi najveći otpor prijenosu topline.

$$\text{Vanjska površina cijevi} \quad A_v = D_v \cdot \pi \cdot L \quad (2.14.)$$

$$\text{Unutarnja površina cijevi} \quad A_u = D_u \cdot \pi \cdot L \quad (2.15.)$$

$$\text{Srednja površina:} \quad A_{im} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_v - r_u) \cdot L}{\ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right)} \quad (2.16.)$$

Ovdje je r polumjer cijevi, m, a L , duljina cijevi, m.

Koeficijent prolaza topline obzirom na vanjsku površinu cijevi:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{D_v}{D_u}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_u} + R_{f,u}\right) + \frac{D_v}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + R_{f,v} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (2.17.)$$

Koeficijent prolaza topline obzirom na unutarnju površinu cijevi:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + R_{f,u} + \frac{D_u}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + \left(\frac{D_u}{D_v}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_v} + R_{f,v}\right)} \quad (2.18.)$$

Poznavanjem koeficijenta prolaza topline računatog obzirom na jednu površinu izloženu konvekcijskom prijenosu topline može se iz sljedeće jednakosti izračunati koeficijent prolaza topline obzirom na drugu površinu:

$$Q = K_v \cdot A_v \cdot \Delta T_{LM} = K_u \cdot A_u \cdot \Delta T_{LM} \quad (2.19.)$$

Za snop od n cijevi, kod višecjevnih izmjenjivača topline, potrebno je površinu plašta jedne cijevi pomnožiti sa brojem cijevi, n , kako bi se dobila ukupna površina izmjene topline:

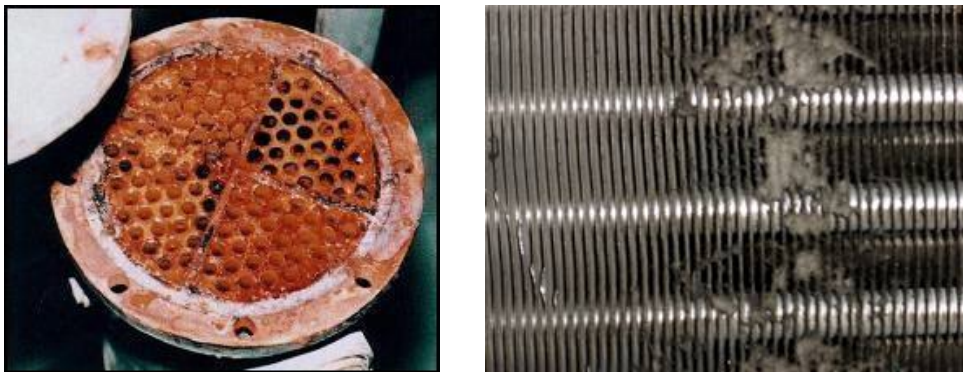
$$A_{uk} = n \cdot A_{cijevi} \quad (2.20.)$$

2.3.2.6. Otpori naslaga

Fouling faktor, R_f - bilo koja promjena na stijenci izmjenjivača topline, posljedica koje je smanjen prijenos topline:

- korozija - manja vodljivost
- biofouling - prisutni organizmi se primaju, rastu i razmnožavaju na grijanoj površini
- čestični - čestice u suspenziji
- zbog kemijskih reakcija
- zbog taloženja
- zbog hlađenja.

Rad izmjenjivača topline ovisi o površini izmjene topline koja mora biti čista i nekorodirana. Otpori naslaga povećavaju otpore prijenosu topline i Δp , što rezultira smanjenjem djelotvornosti uređaja. Fouling faktor određuje se ekperimentalno testirajući izmjenjivač topline sa i bez naslaga. Vrijednosti otpora naslaga obično su u intervalu: $10^{-5} < R_f < 10^{-4}$ (m^2KW^{-1}).



Slika 2.18. Naslage u cijevima i plaštu izmjenjivača topline

Naslage se sa površine izmjene topline uklanjaju mehanički (struganje, četkanje), kemijski (otapalo ili kemijska reakcija) ili ispiranjem (pri velikim brzinama strujanja fluida neke se naslage mogu otrgnuti).

2.3.2.7. Pokretačka sila procesa

Količina izmijenjene topline između toplog i hladnog fluida može se izračunati korištenjem bilančne i kinetičke jednadžbe za toplinski tok. Ako izjednačimo te dvije jednadžbe, dobiva se izraz koji je osnova za izvod jednadžbe za srednju logaritamsku razliku temperatura, odnosno srednju pokretačku silu procesa.

$$dQ = K \cdot (T_T - T_H) \cdot dA = m \cdot c_p \cdot dT \quad (2.21.)$$

Razlika ostvarene temperaturne razlike između toplog i hladnog fluida:

$$dT_T - dT_H = d(\Delta T) = -dQ \left(\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_H} \right) = -K \cdot \Delta T \cdot dA \cdot \left(\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_H} \right) \quad (2.22.)$$

Separacijom varijabli i integriranjem, dobiva se:

$$\int \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -K \cdot \left(\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_H} \right) \cdot \int dA \quad (2.23.)$$

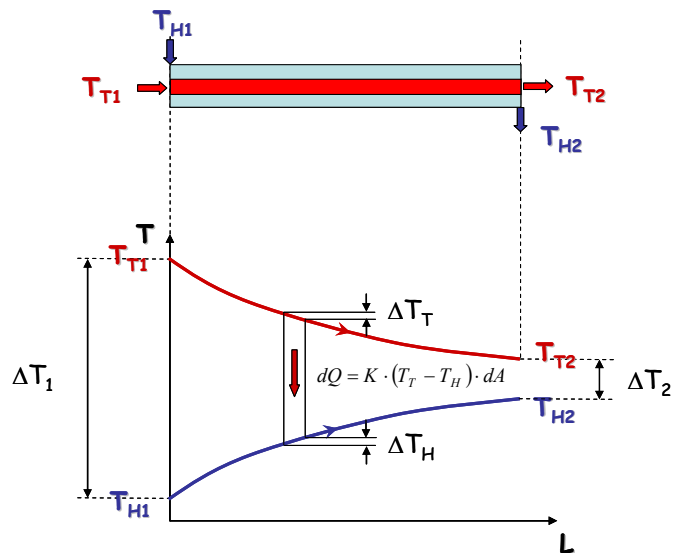
$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -K \cdot \left(\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_H} \right) \cdot A = -K \cdot A \cdot \frac{\Delta T_H - \Delta T_T}{Q} \quad (2.24.)$$

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} = K \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (2.25.)$$

Pokretačka sila se računa kao srednja logaritamska vrijednost dvije krajnje lokalne pokretačke sile. Da bi se ispravno izračunala pokretačka sila potrebno je znati da li fluidi struje u istom smjeru ili u suprotnim smjerovima kroz izmjenjivač topline. Kada se ucrtaju odgovarajuće ulazne i izlazne temperature u tzv. T - L dijagram postaje očito o kojim se lokalnim razlikama temperature radi.

Za istosmjerni tok hladnog i toplog fluida (slika 2.19.):

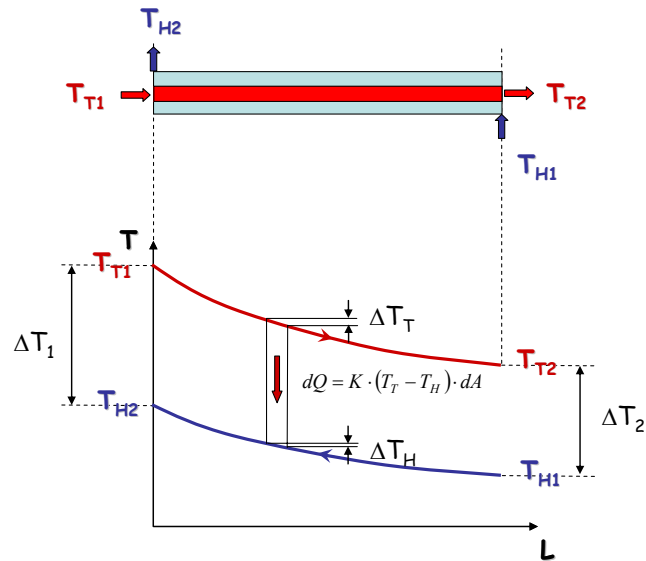
$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{T1} - T_{H1}) - (T_{T2} - T_{H2})}{\ln \left(\frac{T_{T1} - T_{H1}}{T_{T2} - T_{H2}} \right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (2.26.)$$



Slika 2.19. Shema i T - L dijagram istosmjernog jednostrukog izmjenjivača topline

Za protustrujni tok hladnog i toplog fluida (slika 2.20.):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{T1} - T_{H2}) - (T_{T2} - T_{H1})}{\ln \left(\frac{T_{T1} - T_{H2}}{T_{T2} - T_{H1}} \right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (2.27.)$$

Slika 2.20.. Shema i T - L dijagram protustrujnog jednostrukog izmjenjivača topline

2.3.2.8. Broj teoretskih jedinica prijenosa, NTU

Broj teoretskih jedinica prijenosa predstavlja mjeru veličine izmjenjivača topline, koja je u direktnoj funkciji površine izmjene topline odnosno geometrijskih karakteristika izmjenjivača. S druge strane hidrodinamičke karakteristike utječu na koeficijent prolaza topline, K , i minimalnu vodenu vrijednost fluida, C_{\min} . Izmjenjivač topline koji po jedinici volumena ima najveću površinu → **DOBAR IT**.

Izjednačavanjem bilancne i kinetičke jednadžbe prijenosa topline dobiva se izraz za broj teoretskih jedinica prijenosa, NTU :

$$c_{\min} \cdot \Delta T = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (2.28.)$$

$$NTU = \frac{\Delta T}{\Delta T_{LM}} = \frac{K \cdot A}{c_{\min}} \quad (2.29.)$$

Dakle broj jedinica prijenosa jednak je omjeru ostvarene razlike temperatura fluida koji ima minimalnu vodenu vrijednost i pokretačke sile procesa izmjene topline.

Kasnije će se pokazati da se analogni izrazi za broj jedinica prijenosa ili broj koncentracijskih stupnjeva koriste i kod procesa prijenosa tvari (ekstrakcija, apsorpcija).

2.3.2.9. Efikasnost izmjenjivača topline

Prema definiciji, efikasnost izmjenjivača topline jednaka je omjeru stvarno prenesene i maksimalno moguće topline, a računa se za fluid s minimalnom vodenom vrijednošću:

$$\varepsilon = \frac{Q_{st\ varna}}{Q_{max}} \quad (2.30.)$$

$$\varepsilon = \frac{c_{\min} \cdot \Delta T}{c_{\min} \cdot \Delta T_{max}}, \quad (2.31.)$$

gdje je maksimalno moguća promjena temperature jednaka razlici ulaznih temperatura toplog i hladnog fluida:

$$\Delta T_{\max} = T_{T1} - T_{H1} \quad (2.32.)$$

Efikasnost izmjenjivača topline može se odrediti i grafički, pri čemu je potrebno poznavati omjer minimalne i maksimalne vodene vrijednosti, C i broj teoretskih jedinica prijenosa, NTU (jednadžba 29). Postoje dijagrami za svaku vrstu izmjenjivača (slika 2.21.).

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.33.)$$

Efikasnost izmjenjivača topline može se izračunati:

jednostruki istosmjerni IT:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(NTU \cdot (1+C))}}{1 + C} \quad (2.34.)$$

jednostruki protustrujni IT:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(NTU \cdot (1-C))}}{1 - C \cdot e^{-(NTU \cdot (1-C))}} \quad (2.35.)$$

IT 1-2 (jedan prolaz kroz plašt, dva prolaza kroz cijev):

$$\varepsilon = 2 \cdot \left[1 + C + \frac{1 + e^{-(NTU \cdot \sqrt{1+C^2})}}{1 - e^{-(NTU \cdot \sqrt{1+C^2})}} \cdot \sqrt{1 + C^2} \right]^{-1} \quad (2.36.)$$

IT 2-4:

$$\varepsilon_n = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C \right]^{-1} \quad (2.37.)$$

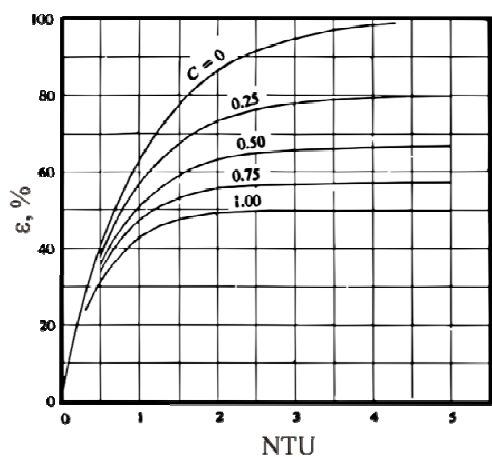
križni IT nemiješani tok:

fluid sa c_{\min} je nemiješani $\varepsilon = \frac{1}{C} \cdot \{1 - \exp[-C \cdot (1 - \exp(-N))]\}$ (2.38.)

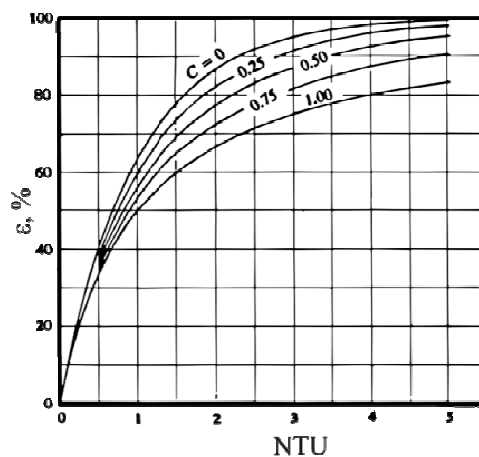
fluid sa c_{\max} je nemiješani $\varepsilon = 1 - \exp\left[-\frac{1}{C} \cdot (1 - \exp(-N \cdot C))\right]$ (2.39.)

križni IT miješani tok:

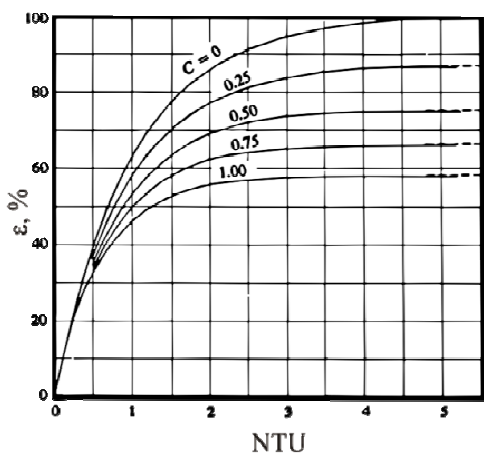
$$\varepsilon = 1 - e^{\left\{ C \cdot NTU^{0,22} \cdot e^{-[C \cdot NTU^{0,78}] - 1} \right\}} \quad (2.40.)$$



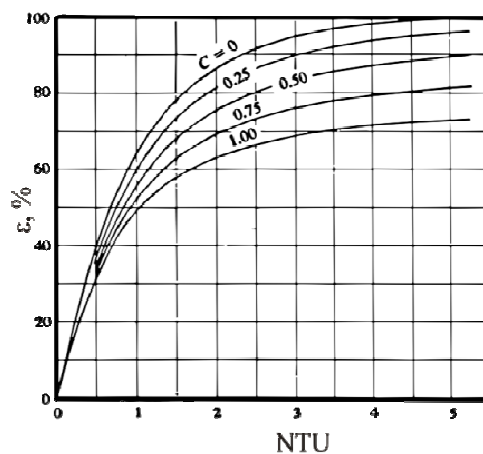
jednostruki istostrujni



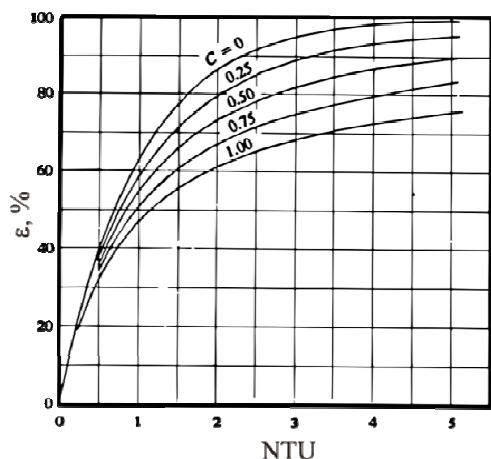
jednostruki protustrujni



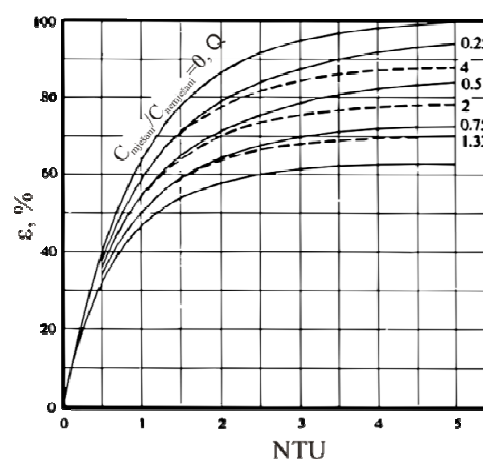
IT 1-2



IT 2-4



križni izmjenjivač sa oba nemješana fluida



križni izmjenjivač sa jednim mješanim fluidom

C_{\min} - nemješani
 C_{\max} - nemješani

Slika 2.21. Efikasnost izmjenjivača topline

2.3.3. Izmjenjivači topline složene geometrije

U izmjenjivaču topline složene geometrije izmjenjuje se veća količina topline između toplog i hladnog fluida. Ako je površina izmjene topline ista, za jednaku količinu izmjenjene topline, izmjenjivač složene geometrije može se smjestiti na manjem prostoru.

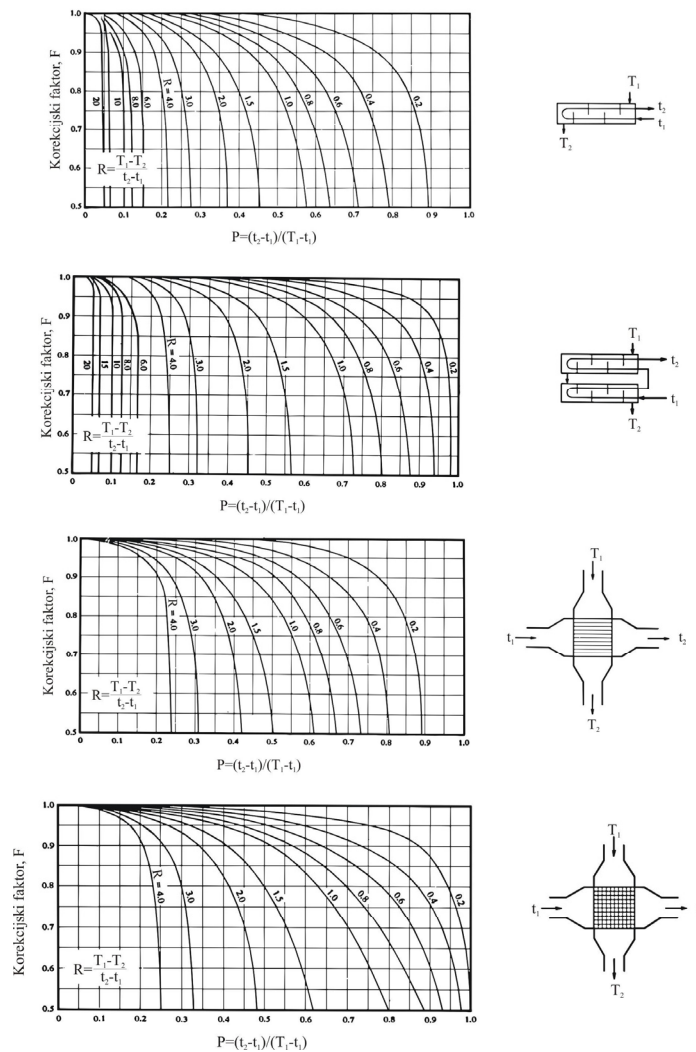
Količina topline koja se izmjenjuje između toplog i hladnog fluida u izmjenjivaču topline:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \cdot F$$

Dakle za izmjenjivač topline složene geometrije, potrebno je korigirati pokretačku silu procesa pomoću korekcijskog faktora F, i tada se za proračun koriste isti izrazi kao za protustrujni jednostruki izmjenjivač topline. To znači da se svaki izmjenjivač složene geometrije svodi na jednostruki protustrujni. Parametri koje je potrebno izračunati su:

$$P = \frac{\Delta T_{cijev}}{T_{T1} - T_{H1}} \tag{2.41.}$$

$$R = \frac{\Delta T_{plajt}}{\Delta T_{cijev}} \tag{2.42.}$$



Slika 2.22. Dijagrami za određivanje korekcijskog faktora pokretačke sile

Za svaki tip izmjenjivača topline, postoje odgovarajući dijagrami iz kojih se onda poznavajući parametre P i R očitava faktor F. Drugim riječima, korekcijski je faktor u funkciji temperatura oba fluida i geometrije izmjenjivača topline.

Korekcijski faktor, F, može se izračunati korištenjem sljedećeg izraza:

$$F = \frac{B \cdot \ln \left[\frac{1-P}{1-R \cdot P} \right]}{(R-1) \cdot \ln \left[\frac{2-P(R+1-B)}{2-P \cdot (R+1+B)} \right]} \quad (2.43.)$$

pri čemu je:

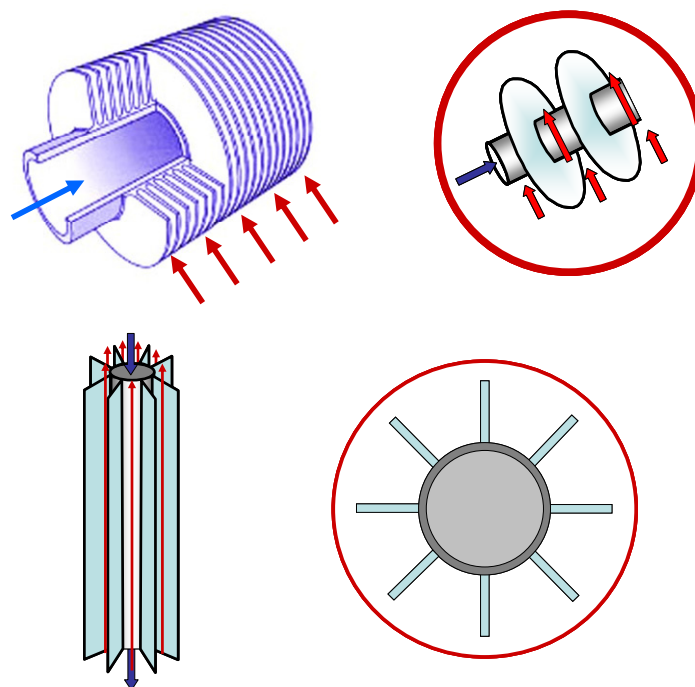
$$B = (1 + R^2)^{1/2} \quad (2.44.)$$

Kod fazne promjene, isparavanja ili kondenzacije, korekcijski faktor iznosi 1.

Ukoliko je $F < 0,75$ izmjenjivač topline nije pogodan za dani proces izmjene topline.

2.3.4. Izmjenjivači topline s ekspaniranom površinom

Brzina izmjene topline proporcionalna je površini izmjene topline. Ukoliko se koriste narebrene cijevi povećava se površina izmjene topline. Veličina rebara i njihov razmak definiraju izvedbu izmjenjivača topline. Rebra moraju biti čista kako se ne bi smanjila efikasnost izmjenjivača topline. Koriste se za fluide niskih koeficijenata prijelaza topline (npr. zrak i viskozni fluidi). Orebranja mogu biti aksijalna i radijalna.

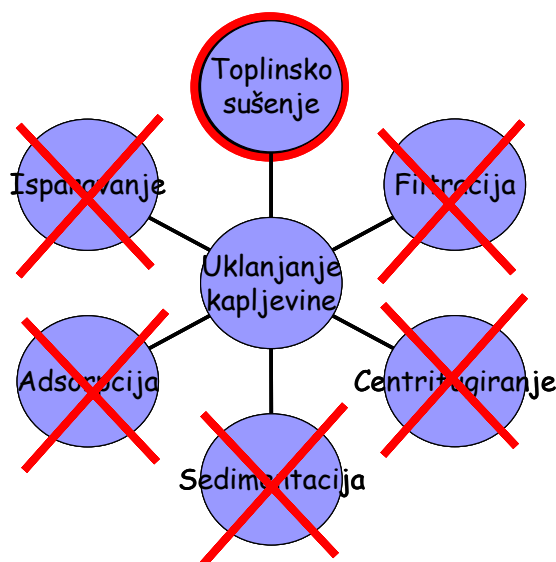


Slika 2.23. Radijalna i aksijalna orebranja

5. SUŠENJE

5.1. Uvod

Sušenje je proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala u svrhu dobivanja suhog čvrstog proizvoda. Sušenje je veoma složeni proces koji se pojavljuje u mnogim industrijskim granama (kemijska, prehrambena, papirna, tekstilna, farmaceutska, drvena,...). Može se reći da danas gotovo i nema proizvoda koji na svom putu od sirovine do gotovog proizvoda barem jednom nije sušen. Pri tome materijali mogu sadržavati znatne količine vlage, koju je u što je moguće većoj mjeri potrebno prije sušenja, ukloniti mehaničkim metodama (filtracija, taloženje, centrifugiranje). Iako se vlaga iz materijala može uklanjati mehaničkim i kemijskim metodama, kada se govori o sušenju govori se o toplinskom procesu, pri kojem se vlaga uklanja dovođenjem topline materijalu (slika 5.1.). Toplina se materijalu može dovoditi konvekcijom, kondukcijom i radijacijom, te postavljanjem vlažnog materijala u visokofrekventno elektromagnetsko polje prilikom mikrovalnog i infracrvenog sušenja. O načinima dovođenja topline vlažnom materijalu biti će govora nešto kasnije.



Slika 4.1. Metode uklanjanje vlage iz materijala

Da bi se dobio željeni suhi proizvod, potrebno je iz vlažnog materijala ukloniti određenu količinu vlage iz višefaznog sustava koji se sastoji od krutine, u pravilu veoma kompleksne unutrašnje strukture i vlage. Kako tijekom sušenja dolazi do istovremenog prijenosa tvari, topline i količine gibanja, uz faznu promjenu vlage, unutar složene krutine, sasvim su očiti problemi na koje moraju nailaziti znanstvenici koji proučavaju sušenje. Zbog svega toga istraživanja se i dalje u velikoj mjeri osnivaju na eksperimentalnim rezultatima, a dobiveni parametri odgovarajućih matematičkih modela odnose se na točno određeni materijal.

Materijal koji je potrebno osušiti može se podijeliti u tri osnovne skupine prikazane u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Vrste materijala koji se suše

KRUTINE	PASTE	KAPLJEVINE
prašci krutine različitih oblika i veličina plohe	različitih viskoznosti koje mogu ili ne mogu cirkulirati kroz sušionik	otopine koloidne otopine suspenzije muljevi

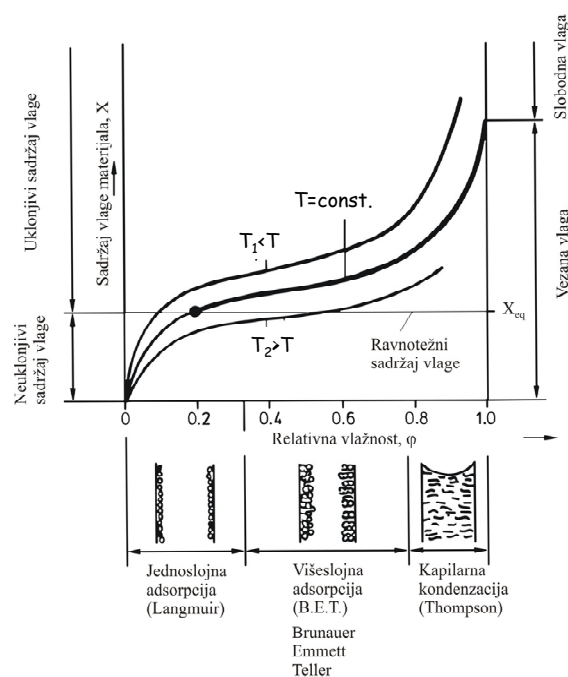
Ako se uz različite vrste materijala koji se suše uzmu u obzir i ostale značajke procesa sušenja (veličina proizvoda (od mm do desetaka cm); poroznost materijala (0-99.9 %); vrijeme sušenja (od 0.25 s do 5 mjeseci); kapacitet proizvodnje (od 0.1 kg/h do 100 t/h); brzina strujanja (od 0-2000 m/s); temperatura (od ispod trojne točke do iznad kritične točke kapljevine); tlak (od mbara do 25 atm); načini dovođenja topline) očito je da danas postoji velik broj sušionika različitih izvedbi.

5.2. Vrste vlage u materijalu

Materijal sadrži vlagu koja može biti prisutna kao slobodna vlaga (kapljevina i para koja ispunjava pore u uzorku ili slobodni volumen međuprostora između čestica), mehanički vezana vlaga (polumjer pora manji od 0,1 mm), te kemijski vezana vlaga (kada je vlaga dio strukture krutine). Tijek i vrijeme trajanja procesa sušenja ovise o uvjetima sušenja, profilima temperature i vlage koji se razvijaju tijekom sušenja, te iznad svega o mehanizmu kretanja vlage kroz materijal. Način prijenosa vlage kroz materijal kontroliran je svojstvima, oblikom i dimenzijama uzorka, te vrsti veze vlage i materijala. Obzirom na različite veze vlage i materijala, mehanizmi prijenosa vlage kroz unutrašnju strukturu poroznog materijala prilikom sušenja mogu također biti različiti. Slobodna se vlaga može kretati pod utjecajem gradijenta tlaka koji se razvija zbog izlaganja materijala povišenoj temperaturi ili kapilarnim tokom. Vodena para prisutna u šuplinama poroznog materijala prenositi će se difuzijom zbog gradijenta tlaka ili koncentracije. Vezana vlaga će se kretati difuzijskim mehanizmom. Također, kapilarni tok slobodne vlage te difuzija vezane vlage i vodene pare mogu biti kontrolirani, osim gradijentom tlaka ili koncentracije, i temperaturnim gradijentom. Iz svega navedenog vidi se da je, pogotovo ako je materijal heterogene strukture kao što su biološki materijali, potrebno poznavanje velikog broja parametara kako bi se proces sušenja u potpunosti opisao. Tu su najznačajniji, osim sadržaja vlage i temperature materijala, udio slobodnog volumena koji se može ispuniti vodom i vodenom parom, brzina strujanja kapljevite i parne faze, lokalna brzina isparavanja, parcijalni tlakovi zraka i vodene pare, gustoće svih prisutnih faza. Naravno tu su još i uvjeti sušenja kao što su svojstva zraka kod konvekcijskog sušenja (temperatura, tlak (vakuum), relativna vlažnost, brzina strujanja), te geometrija materijala, vrsta sušionika i na kraju način na koji se toplina dovodi vlažnom materijalu. Potrebno je naglasiti da je u većini slučajeva vlaga koja se uklanja voda.

Kako je sušenje u osnovi proces prijenosa tvari izazvan dovođenjem topline, potrebno je poznavati ravnotežne podatke istraživanih sustava. Naime, sušenjem se neće (osim pri sušenju nehigroskopnih

materijala) ukloniti sva vlaga prisutna u materijalu. Proces prijenosa tvari, u definiranim uvjetima tlaka i temperature, odvijati će se samo do postizanja ravnoteže. Ravnoteža se prikazuje sorpcijskim izotermama. Na slici 5.2. prikazane su sorpcijske izoterme tipičnih higroskopskih materijala. Može se vidjeti da porastom temperature i smanjenjem relativne vlažnosti zraka opada ravnotežni sadržaj vlage. Ovim su dijagramom osim ravnotežnog sadržaja vlage materijala, definirane i ostale vrste vlage prisutne u materijalu.



RAVNOTEŽNI SADRŽAJ VLAGE TIPIČNOG HIGROSKOPNOG MATERIJALA
(Prema Poersch, Babcock-BSH AG, Krefeld)

Slika 5.2. Sorpcijske izoterme

Vezana vlaga, X_B

Ravnotežni sadržaj vlage materijala kod $\varphi=100\%$

Nevezana vlaga, X_{NB}

Ako materijal ima ukupni sadržaj vlage veći od X_B , količina vlage u suvišku odgovara nevezanoj vlazi:

$$X_{NB} = X_T - X_B \quad (5.1)$$

Slobodna vlaga

Sadržaj vlage materijala veći od ravnotežnog koji se može ukloniti sušenjem:

$$X = X_0 - X_{eq} \quad (5.2)$$

Ovdje su:

X_0 : početni sadržaj vlage materijala, kg kg^{-1}

X_{eq} : ravnotežni sadržaj vlage materijala, kg kg^{-1}

5.3. Dijagrami vlažnosti

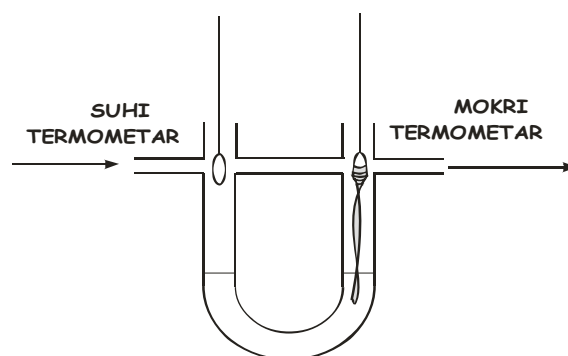
Vlaga koja mora ispariti iz vlažnog materijala mora se prvo zagrijati do temperature kod koje će tlak para vlage doseći tlak para vlage prisutne u zraku. U zatvorenom sustavu u koje se vlaga ne odvodi iz sušionika, parcijalni tlak vlage približava se ukupnom tlaku a temperatura isparavanja temperaturi vrelišta pri radnom tlaku, dokle god je vlaga prisutna na površini materijala. Kako se razina vlage u unutrašnjosti materijala smanjuje potrebna je sve veća temperatura ($T > T_v$). Kod konvekcijskih sušionika u kojima zrak služi kao donosilac topline te odnosilac ispareme vlage iz sušionika, temperatura isparavanja ovisi o vlažnosti zraka kojim se suši. Ako je parcijalni tlak para u smjesi para-plin manji od tlaka para kapljevine na istoj temperaturi, smjesa para-plin je nezasićena. Već je rečeno da se tijekom procesa sušenja istovremeno odvijaju dva procesa, prijenos topline (za isparavanje površinske vlage i zagrijavanje materijala) i prijenos tvari do površine materijala i isparavanje u okolinu), te se proračun stvarnih količina potrebnog zraka za uklanjanje vlage oslobođenje isparavanjem, osniva na psihometriji i dijagramima vlažnosti. Prije objašnjenja samih dijagrama potrebno je definirati značajne veličine.

Temperatura suhog termometra je stvarna temperatura smjese zraka i vlage, T_{ST} .

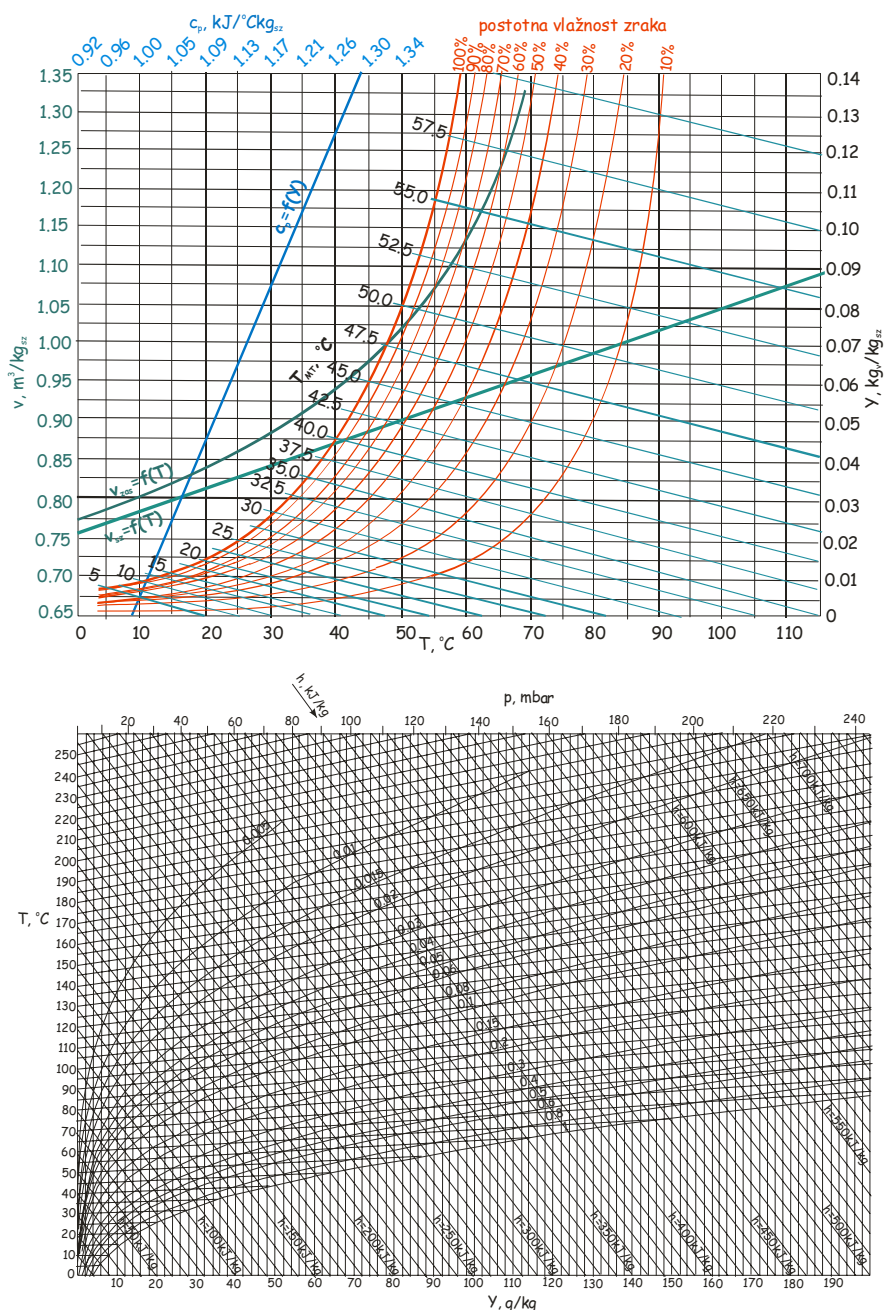
Temperatura mokrog termometra je temperatura koju bi imao zrak u danim uvjetima T i p kada bi bio zasićen vodenom parom, T_{MT} . Temperatura mokrog termometra mjeri se pomoću psihometra (slika 5.3.). To je U-cijev djelomično ispunjena vodom čiji su krakovi spojeni horizontalnom cjevčicom kroz koju struji zrak ($v=2 \text{ ms}^{-1}$). Mokri se termometar dobiva tako da se spremnik žive omota „čarapicom“ uronjenom u vodu kako bi se osiguralo da čarapica oko spremnika žive mokra. Kada zrak prijeđe preko mokre čarapice, sa nje će ishlapiti određena količina vode sve dok se zrak u okolišu termometra ne zasiti vodenom parom. To će rezultirati padom temperature (efekt hlađenja tijekom isparavanja).

Temperatura adijabatskog zasićenja je ravnotežna temperatura koju je zrak postigao u kontaktu sa kapljevinom koja isparava/ishlapljuje u adijabatskim uvjetima, T_{az} . Za sustav voda-zrak linije adijabatskog zasićenja i temperature mokrog termometra se poklapaju.

Temperatura rosišta je temperatura kod koje nezasićena smjesa zraka i vode postaje zasićena hlađenjem uz $Y=\text{const}$, T_R .



Slika 5.3. Psihrometar



Slika 5.4. Dijagrami vlažnosti

Apsolutna vlažnost zraka definira se kao količina vodene pare prisutna u jediničnoj masi suhog zraka, Y , kg kg^{-1} .

$$Y = \frac{m_v}{m_{sz}} \quad (5.3.)$$

$$Y = \frac{p_V}{P - p_V} \cdot \frac{M_V}{M_{sz}} = 0,622 \cdot \frac{p_V}{P - p_V} \quad (5.4.)$$

Relativna vlažnost zraka definira se kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi sa zrakom i ravnotežnog tlaka para pri istoj temperaturi, φ .

$$\varphi = \frac{p_V}{p_V^*} \quad (5.5.)$$

Postotna vlažnost zraka je omjer stvarne apsolutne vlažnosti zraka i apsolutne vlažnosti u stanju zasićenja (ravnotežni).

$$Y\% = \frac{Y}{Y^*} \quad (5.6.)$$

Specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka definira se kao toplina potrebna da se 1 kg vlažnog zraka povisi temperatura za 1 stupanj (K, °C).

$$c_{p,vz} = c_{p,sz} + Y \cdot c_{p,v} \quad (5.7.)$$

Specifični volumen vlažnog zraka jednak je ukupni volumen suhog zraka i odgovarajuće količine vlage.

$$v_{vz} = v_{sz} + (v^* - v_{sz}) \cdot Y \quad (5.8.)$$

Pri čemu su:

- v_{sz} , m³/kg suhog zraka, volumen koji zauzima suhi zrak kod temperature suhog termometra i ukupnog tlaka (Specifični volumen suhog zraka)
- v^* , suma volumena jedinične mase suhog zraka i volumena vlage koji je potreban da se plina zasiti vodenom parom, pri temperaturi suhog termometra i P (Specifični volumen vlažnog zraka u stanju zasićenja).

Da bi se definiralo stanje zraka u dijagramu vlažnosti (slika 5.4.), potrebno je poznavati dva podatka. Najjednostavnije se mjere temperatura suhog termometra i relativna vlažnost zraka. Uz poznata dva podatka može se ucrtati točka u dijagramu vlažnosti te očitati preostale podatke sa dijagrama (p , c_p , v_{sz} , v^* , h , Y , T_{MT}). Na primjeru će se pokazati korištenje dijagrama vlažnosti.

Y-T dijagram (slika 5.5.a)

Neka je stanje zraka definirano temperaturom od 66 °C i postotnom vlažnošću od 19%. Sa dijagrama vlažnosti potrebno je očitati ostale podatke.

1. Apsolutna vlažnost zraka
 - očitava se na desnoj ordinati, $Y = 0,038$ kg/kg.
2. Temperatura mokrog termometra
 - od definirane početne točke (66°C i 19%) po liniji mokrog termometra ide se do stanja zasićenja zraka ($Y\% = 100\%$) i očitava $T_{MT} = 42,5$ °C.
3. Temperatura rosišta

- kao i kod samog zagrijavanja zraka u predgrijaču, tijekom hlađenja do temperature kod koje dolazi do kondenzacije ne mijenja se apsolutna vlažnost zraka, pa se po liniji $Y = const.$ ide do stanja zasićenja zraka i očita $T_R = 37,5^\circ\text{C}$.

4. Specifični toplinski kapacitet zraka

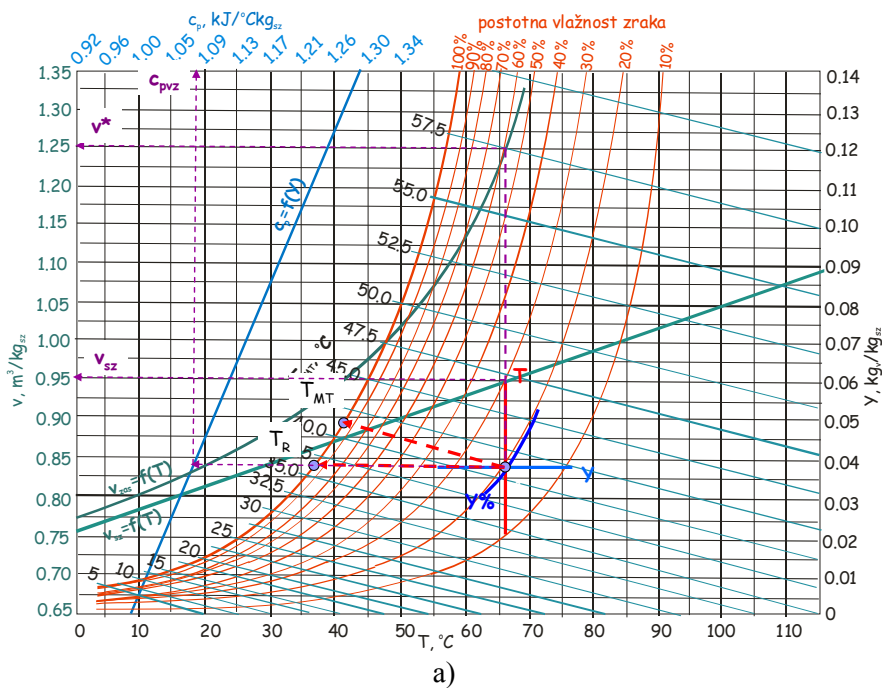
– obzirom da ovisi o apsolutnoj vlažnosti zraka, od početne se točke po $Y = const.$ ide do pravca $c_p = f(Y)$ i na gornjoj se apscisi očita $c_p = 1,08 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

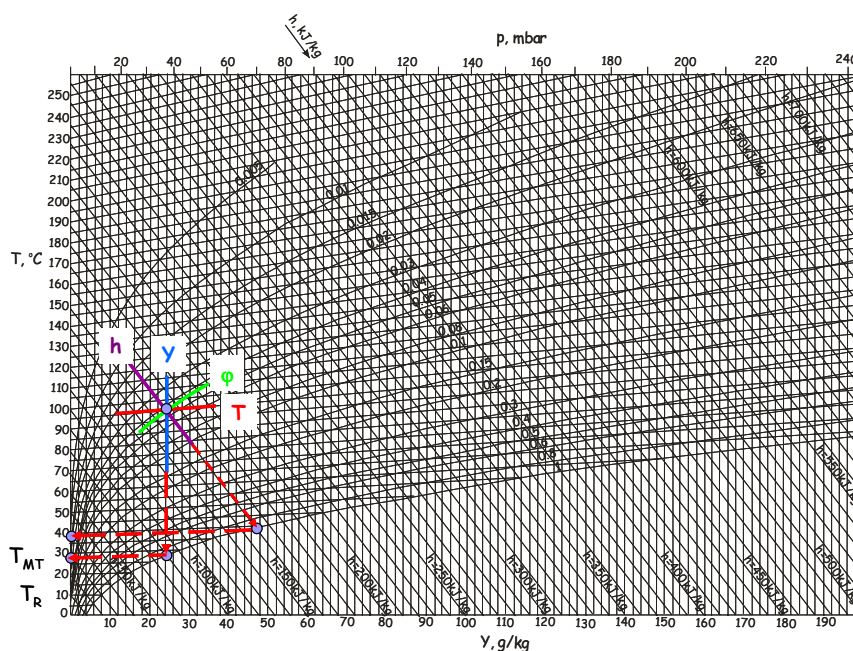
5. Specifični volumen suhog zraka

– obzirom da ovisi o temperaturi zraka, od početne se točke, po $T = const.$ ide do krivulje $v_{sz} = f(T)$ i na lijevoj apscisi očita $v_{sz} = 0,95 \text{ m}^3/\text{kg}$.

6. Specifični volumen zasićenog zraka

– također ovisi o temperaturi, pa se uz $T = const.$ ide do krivulje $v^* = f(T)$ i na lijevoj apscisi očita $v^* = 1,25 \text{ m}^3/\text{kg}$.





b)

Slika 5.5. Korištenje dijagrama vlažnosti

h-Y dijagram (slika 5.5.b)

Neka je stanje zraka definirano temperaturom od 95 °C i relativnom vlažnošću od 5,6%. Sa dijagrama vlažnosti potrebno je očitati ostale podatke.

1. Apsolutna vlažnost zraka
 - za definirano stanje zraka očita se na apscisi, $Y = 0,024 \text{ kg/kg}$.
2. Entalpija zraka
 - sa linije mokrog termometra ($h = \text{const.}$) očita se $h = 160 \text{ kJ/kg}$
3. Temperatura mokrog termometra
 - od definirane početne točke (95°C i 5,6%) po liniji $h = \text{const.}$ ide se do stanja zasićenja zraka ($\varphi = 100\%$) te se za izotermu koja siječe zasićeni zrak očita $T_{MT} = 38,5 \text{ °C}$.
4. Temperatura rosišta
 - po liniji $Y = \text{const.}$ ide se do stanja zasićenja zraka te se za izotermu koja siječe zasićeni zrak očita $T_R = 27,5 \text{ °C}$.
5. Parcijalni tlak vodene pare
 - obzirom da ovisi o apsolutnoj vlažnosti zraka, od početne se točke za $Y = \text{const.}$ na gornjoj apscisi očita $p = 37,5 \text{ mbar}$.

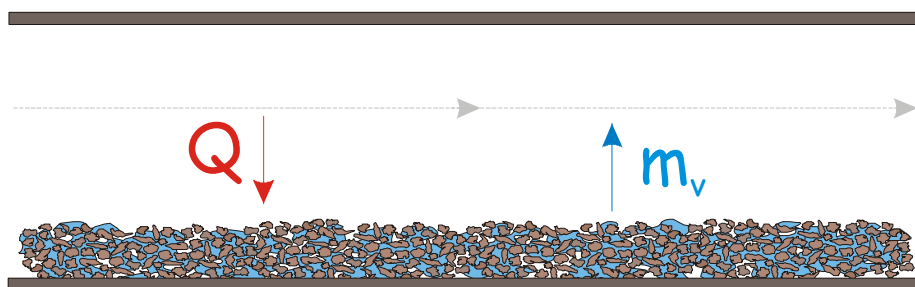
5.4. Načini dovođenja topline tijekom sušenja

Već je rečeno da se prilikom toplinskog sušenja, vlažni materijal može zagrijavati konvekcijski, kondukcijski i radijacijski pri čemu se toplina dovodi do površine materijala, ili visokofrekventnim elektromagnetskim poljem, pri čemu se dovedena energija u unutrašnjosti materijala pretvara u

toplinu. Keey kao jedan od tri osnovna faktora koji klasificiraju sušionike navodi upravo mahanizam zagrijavanja materijala.

5.4.1. Konvekcija

Konvekcija je najčešći način dovođenja potrebne topline za sušenje različitih vrsta materijala (čvrsta tijela, paste). Toplina se vlažnom materijalu dovodi strujanjem toplog zraka ili nekog drugog inertnog plina iznad njegove površine (slika 5.6).



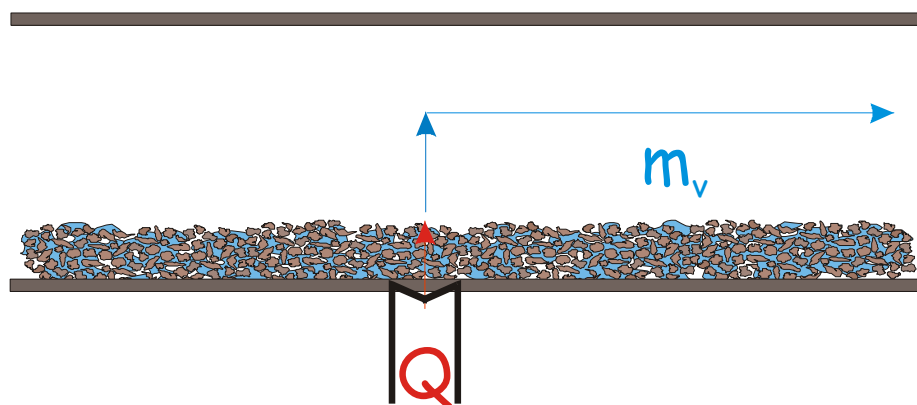
Slika 5.6. Konveksijsko sušenje

Toplina potrebna za isparavanje (ili ishlapljivanje) konveksijski se predaje izloženoj površini materijala, a isparena vlaga zatim odvodi pomoću medija za sušenje (uglavnom zrak, ali može biti i dušik za uklanjanje organskih otapala, plinovi izgaranja ili pregrijana para). Procesi prijenosa tvari i topline odvijaju se u suprotnim smjerovima. Takvi se sušionici obično nazivaju direktni sušionici.

U periodu konstantne brzine sušenja vlažna površina materijala ima temperaturu koja odgovara temperaturi mokrog termometra zraka kojim se suši, dok se u periodu padajuće brzine sušenja temperatura materijala približava temperaturi suhog termometra sušnog medija. O tome se mora voditi računa kada se suše materijali osjetljivi na povišene temperature. Periodi sušenja biti će pojašnjeni u poglavlju koje govori o kinetici sušenja.

5.4.2. Kondukcija

Konduksijski ili indirektni sušionici mnogo su pogodniji za sušenje tankih ili jako vlažnih materijala. Toplina potrebna za isparavanje dovodi se preko ogrjevne površine (mirujuće ili pokretne). Isparena se vlaga odvodi iz sušionika vakuumom ili zračnom strujom, koja u ovom slučaju služi samo kao nosioc vlage. Što se tiče toplinske djelotvornosti, konduksijski su sušionici povoljniji od konveksijskih.



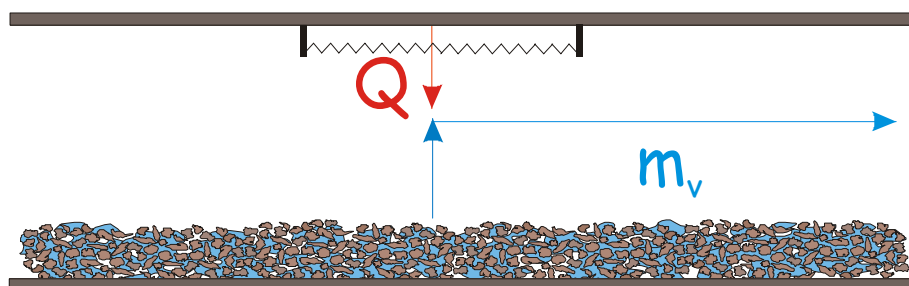
Slika 5.7. Kondukcijsko sušenje

Djelotvornost sušionika može se u velikoj mjeri povećati ako se koristi kombinirani konveksijski i kondukcijski način zagrijavanja materijala. Tako na primjer postoje sušionici koji mogu raditi kao direktni (konveksijski), indirektni (kondukcijski) ili u kombinaciji ova dva mehanizma zagrijavanja.

Vakuumsušenje, kao jedna od kondukcijskih metoda, je proces koji se preporuča za sušenje materijala osjetljivih na temperaturu, iako se većina procesa odvija na tlakovima bliskim atmosferskom. Međutim to je vrlo skupa operacija, i primjenjuje se, osim za navedeni slučaj, kada je materijal podložan oksidaciji.

5.4.3. Zračenje

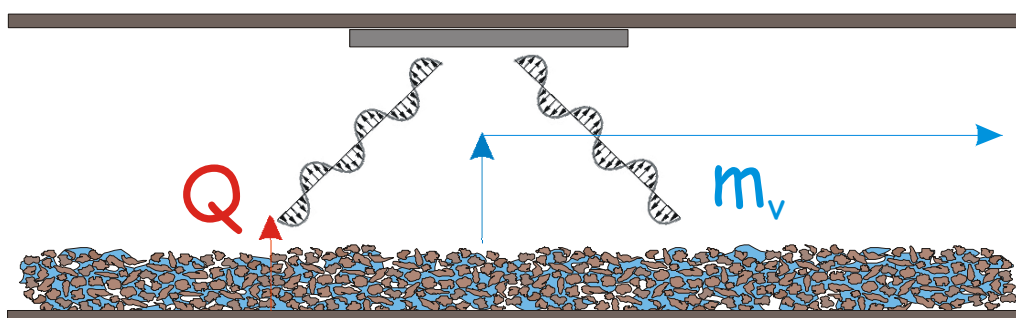
Za zagrijavanje se koriste izvori elektromagnetskog zračenja valnih duljina od solarnog do mikrovalnog spektra (0,2 m do 0,2 μm). Solarno zračenje vrlo slabo prodire ispod površine materijala, koji apsorbira samo dio ulaznog zračenja ovisno o njegovoj valnoj duljini i upadnom kutu, te stupnju crnoće i površini tijela izloženog zračenju. Infracrveno zračenje se koristi za sušenje premaza, tankih listova i filmova. Iako većina vlažnih materijala slabo vodi struju frekvencije od 50-60 Hz, otpor samoindukcijski znatno opada u području radiofrekvencija. Zračenje takvim frekvencijama može se upotrijebiti za volumetrijsko zagrijavanje materijala, čime se znatno smanjuje unutrašnji otpor prijenosu topline. Obzirom da molekule vode selektivno apsorbiraju energiju, kako se materijal suši koristi se sve manje energije. Kako su ukupni i operacijski troškovi takovog procesa izrazito visoki, metoda se upotrebljava samo za sušenje visokovrijednih produkata ili kada je potrebna korekcija konačnog profila sadržaja vlažnosti u materijalu. Ukoliko se infracrveno ili mikrovalno zagrijavanje kombinira sa konveksijskim metodama sušenja, proces postaje komercijalno isplativ.



Slika 5.8. Dovođenje topline zračenjem

Dio energije koju emitira izvor zračenja apsorbira se na površini materijala i na taj način zagrijava vlažni materijal i dolazi do isparavanja vlage. Isparena vlaga odvodi se pomoću inertnog plina.

5.4.4. Mikrovalno zagrijavanje



Slika 5.9. Mikrovalno zagrijavanje

Zagrijavanje i sušenje pomoću mikrovalova bitno je različito nego kod konvencionalnih metoda. Dok konvencionalne metode ovise o polaganom kretanju topline od površine materijala do njegove unutrašnjosti definiranom razlikom temperatura zagrijanog okoliša i hladnog materijala, zagrijavanje mikrovalnom energijom je volumetrijsko, pri čemu elektromagnetsko polje zagrijava cijeli materijal istovremeno. Do grijanja dolazi gotovo trenutačno i može biti veoma brzo. Naime, toplina se generira unutar materijala zbog interakcije elektromagnetskih valova i vode. Posljedica takvog načina zagrijavanja je da su vlažniji dijelovi materijala na višoj temperaturi od dijelova koji su manje vlažni, odnosno temperatura je veća u unutrašnjosti nego na površini uzorka (temperaturni je gradijent suprotan od onog koji se susreće kod konvencionalnih metoda zagrijavanja). Sam je proces ubrzan prvenstveno stoga jer se procesi prijenosa tvari i topline odvijaju u istome smjeru (slika 5.9.).

Upravo taj način grijanja rezultira brojnim prednostima pred ostalim metodama. Prednosti:

- Veća brzina sušenja
- Jednoliko zagrijavanje materijala (izbjegnute veliki temperaturni gradijenti)
- Efikasna ušteda energije (energija reagira direktno sa materijalom, ne troši se za zagrijavanje okolišnog zraka, uređaja; uređaj nije zagrijan pa se ne mora hladiti)

- Bolja i brža kontrola zagrijavanja (trenutačno paljenje i gašenje grijanja, te mogućnost promjene stupnja zagrijavanja kontroliranjem izlazne snage)
- Selektivno zagrijavanje (elektromagnetsko polje reagira sa vlagom a ne materijalom, pa se zagrijava i uklanja samo vlaga, dok se nosač i materijal zagrijavaju primarno kondukcijom; ne zagrijava se ništa drugo)
- Može se poboljšati kvaliteta produkta (kako se ne razvijaju visoke temperature površine materijala, pregrijavanje površine i oštećenja materijala su izbjegnuta pa je manje škarta)
- Rezultira željenim kemijskim i fizikalnim efektima; mnoge su reakcije ubrzane unutrašnjim zagrijavanjem.

Osnovni nedostatak, osim što se radi o relativno skupom uređaju, je taj da raspodjela elektromagnetskog polja unutar sušionika nije jednolika, već postoje vruća i hladna mjesta.

5.4.5. Sušenje zaleđivanjem (liofilizacija)

Kod ove metode sušenja, vlaga se u materijalu prvo zaledi hlađenjem materijala, a zatim sublimira kondukcijskim, konvekcijskim ili radijacijskim zagrijavanjem. Zagrijavanje je kontrolirano kako bi se izbjeglo taljenje vlage ili razgradnja materijala. Koristi se za sušenje bioloških i farmaceutskih materijala, te prehrambenih proizvoda. Materijal ostaje porozan, odnosno ne dolazi do skupljanja, pa se dobivaju kvalitetni proizvodi.

5.5. Kinetika sušenja

Tijekom toplinskog sušenja, kada se toplina dovodi vlažnom materijalu dva se procesa odvijaju istovremeno:

- prijenos energije (uglavnom topline) iz okoline kako bi se isparila (ishlapila) površinska vlaga
- prijenos unutarnje vlage do površine materijala i njeno isparavanje zbog procesa prijenosa topline.

Brzina kojom će se materijal sušiti ovisi o brzinama kojima se ta dva procesa odvijaju, odnosno o onome koji kontrolira proces sušenja. Bilo koji od ova dva procesa može biti ograničavajući faktor odgovoran za brzinu sušenja, iako se oba odvijaju istovremeno tijekom sušenja. Toplina se do površine vlažnog materijala može dovesti iz okoline konvekcijom, kondukcijom, radijacijom ili kombinacijom tih metoda. Kroz poroznu se strukturu materijal dalje zagrijava kondukcijski. S druge strane, kod dielektričnog, radiofrekventnog ili mikrovalnog sušenja dovedena energija se unutar materijala pretvara u toplinu te onda iz unutrašnjosti prenosi prema površini uzorka.

Kinetika sušenja može se pratiti gravimetrijskom ili psihometrijskom metodom. Gravimetrijskom metodom prati se promjena mase vlažnog materijala tijekom sušenja, dok se psihometrijskom metodom prati stanje zraka mjerenjem dvije veličine (temperatura i relativna vlažnost zraka). Masa vlage koju materijal izgubi tijekom sušenja jednaka je masi vlage koju je zrak primio, pa se može pisati:

$$m_v = m_{vm1} - m_{vm2} = m_{sm} \cdot (X_1 - X_2) = m_{z1} - m_{z2} = m_{sz} \cdot (Y_2 - Y_1) \quad (5.9.)$$

Ovdje su:

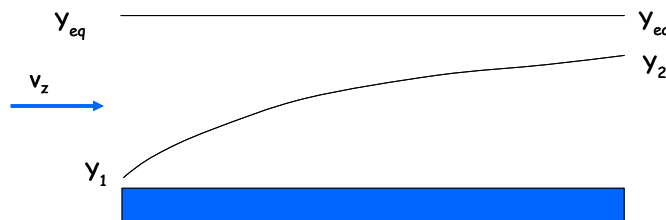
- m_v - masa vlage, kg ili kg/s
- m_{vm} - masa vlažnog materijala, kg ili kg/s
- m_z - masa vlažnog zraka, kg ili kg/s
- m_{sm} - masa suhog materijala, kg ili kg/s
- m_{sz} - masa suhog zraka, kg ili kg/s
- X - sadržaj vlage materijala, kg/kg
- Y - apsolutna vlažnost zraka, kg/kg

Toplina potrebna za isparavanje vlage računa se prema:

$$Q = m_v \cdot \lambda = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.10.)$$

Ovdje su:

- Q - potrebna toplina, W
- λ - latentna toplina isparavanja, kJ/kg
- α - koeficijent prijelaza topline, W/m²K
- A - površina isparavanja, m²
- ΔT - pokretačka sila prijenosa topline, K



Slika 5.10. Određivanje pokretačke sile

Pokretačka sila procesa prijenosa tvari (slika 5.10.) može se izraziti preko apsolutne vlažnosti zraka, parcijalnog tlaka.

Kako zagrijani zrak struji iznad površine materijala preuzima na sebe isparenu vlagu a lokalna se pokretačka sila smanjuje. Srednja se pokretačka sila izražava kao srednja logaritmska vrijednost:

$$\Delta Y_{lm} = \frac{(Y_{eq} - Y_1) - (Y_{eq} - Y_2)}{\ln\left(\frac{Y_{eq} - Y_1}{Y_{eq} - Y_2}\right)} = \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{\ln\left(\frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}\right)} \quad (5.11.)$$

$$\Delta p_{lm} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\ln\left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}\right)} \quad (5.12.)$$

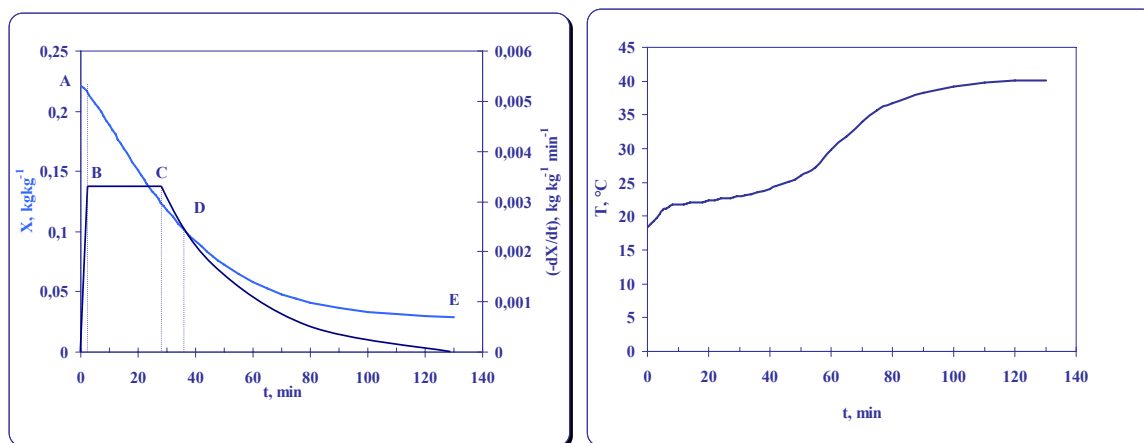
Masa isparene vode može se izračunati preko količine dovedene topline koja se onda može izjednačiti sa osnovnom kinetičkom jednačbom za process prijenosa tvari:

$$m_v = \frac{\alpha \cdot A \cdot \Delta T}{\lambda} = k_p \cdot A \cdot \Delta p = k_Y \cdot A \cdot \Delta Y \quad (5.13.)$$

Koeficijenti prijenosa tvari, k_p i k_Y imaju drugačije vrijednosti i odgovarajuće jedinice, ovisno o tome na koji je način izražena pokretačka sila procesa.

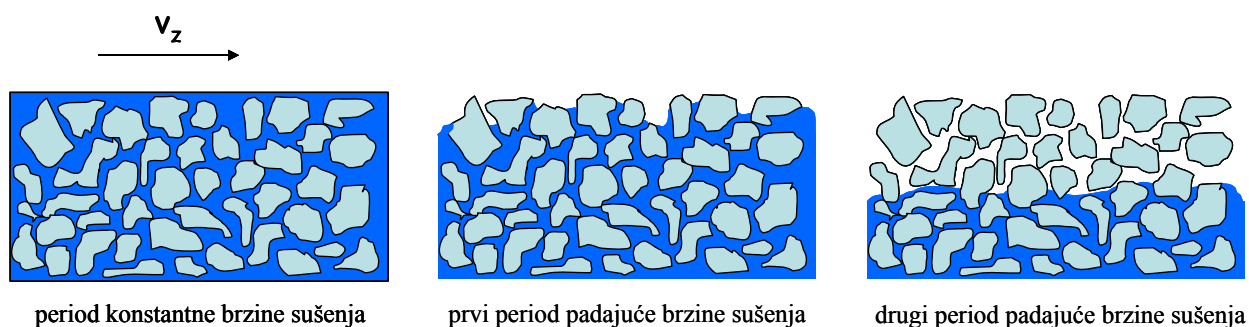
Kinetika sušenja opisuje promjenu sadržaja vlage i temperature materijala tijekom sušenja. Tijek sušenja definiran je vrstom i svojstvima materijala, vrsti prisutne vlage (slobodna, vezana), odabranim načinom i uvjetima sušenja. Kinetičke krivulje sušenja prikazane su na slici 5.11. Osim prikazanih krivulja, često se još kinetika opisuje i promjenom brzine sušenja sa sadržajem vlage materijala.

Na krivuljama sušenja mogu se uočiti tri osnovna perioda sušenja: period stabilizacije, period konstantne brzine sušenja i period padajuće brzine sušenja. Stanja materijala tijekom pojedinog perioda sušenja prikazano je na slici 5.12.



Slika 5.11. Kinetičke krivulje sušenja

U prvom periodu (A-B) zagrijavanja, periodu stabilizacije, ishlapljuje mala količina površinske vlage a temperatura površine materijala (tankog sloja vlage koja prekriva cijelu izloženu površinu) dostiže temperaturu mokrog termometra zraka. Nakon toga nastupa period konstantne brzine sušenja (B-C) kada se sadržaj vlage materijala linearno smanjuje. Taj period traje dokle god je brzina dovodenja vlage iz unutrašnjosti materijala do njegove površine dovoljno velika da se osigura potpuno mokra vanjska površina (odnosno tanki sloj vlage). Točka C odgovara kritičnom sadržaju vlage, nakon kojeg započinje period padajuće brzine sušenja koji traje do postizanja ravnotežnog sadržaja vlage u danim procesnim uvjetima (C-E). Kritični sadržaj vlage to je veći što je veća brzina sušenja, manja debljina materijala te veći promjer pora.

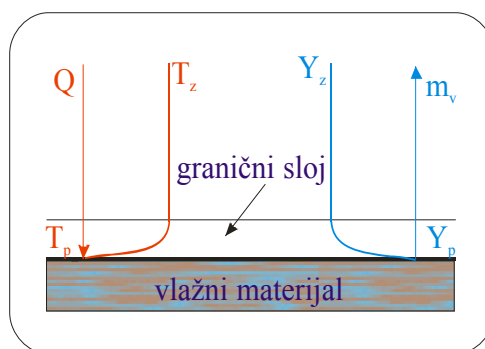


Slika 5.12. Stanje materijala tijekom sušenja

Kod nehigroskopskih materijala period padajuće brzine sušenja završava sa potpuno suhim materijalom (sva je prisutna vlaga slobodna). Higroskopski se materijali mogu potpuno osušiti jedino ako zrak ne sadrži vlagu, što u praksi nije nikada slučaj, tako da se kod njih pojavljuje i drugi period padajuće brzine sušenja, koji traje do postizanja ravnoteže. Zapravo, ovisno o unutrašnjoj strukturi materijala može postojati nekoliko perioda padajuće brzine sušenja, pri čemu u svakom prevladava određeni mehanizam prijenosa vlage.

5.5.1. Period konstantne brzine sušenja

Tijekom perioda konstantne brzine sušenja material je prekriven tankim slojem vlage, te nije u direktnom kontaktu sa sušnim medijem. Sva se dovedena toplina troši na isparavanje vlage pa se temperatura površine održava na stalnoj vrijednosti koja odgovara temperaturi mokrog termometra (zrak iznad površine zasićen je vodenom parom).

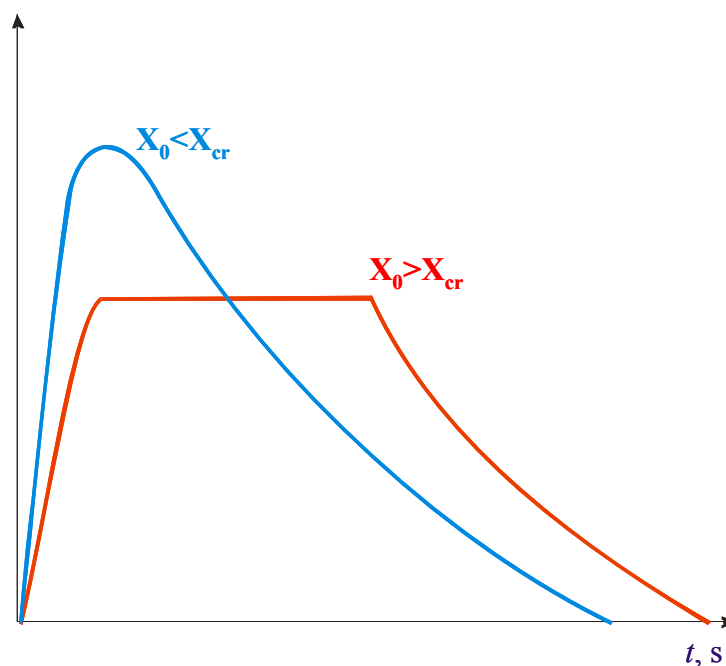


Slika 5.13. Otpori procesima prijenosa tvari i topline u periodu konstantne brzine sušenja

Proces odvođenja vlage s površine materijala kontroliran je vanjskim uvjetima, odnosno svojstvima toplog zraka koji se koristi za sušenje (temperatura, relativna vlažnost, brzina i smjer strujanja), tlaku te vanjskoj površini materijala (oblik). Tu su još i potreba za miješanjem uzorka te način na koji se materijal uvodi u sušionik. Za takav se proces kaže da se odvija pod kontrolom vanjskih uvjeta. Ti su uvjeti bitni na početku sušenja kada se uklanja površinska slobodna vlaga, tijekom perioda konstantne brzine sušenja. Tada su unutarnji otpori prijenosu tvari i topline zanemarivi u odnosu na vanjske. Kod nekih je materijala, osobito onih koji su skloni skupljanju, potrebno veoma pažljivo odrediti uvjete

sušenja. Naime kod prevelikih brzina sušenja i velike razlike sadržaja vlage između površine i unutrašnjosti materijala, dolazi do razvijanja velikih koncentracijskih gradijenata unutar materijala. Zbog toga dolazi do presušivanja površine, naglog skupljanja te nastajanja deformacija i pukotina na uzorku. Kod uzoraka malih dimenzija i poroznih materijala čije pore imaju velike promjere, proces sušenja je pod kontrolom vanjskih uvjeta. Sadržaj vlage materijala i njegova temperatura isti su na površini i u unutrašnjosti, jer se ne razvijaju gradijenti temperature i sadržaja vlage. Ako se stanje zraka na ulazu u sušionik održava stalnim tada vrijedi:

$$\Delta T = \text{const}, \quad \Delta Y = \text{const}, \quad \Delta p = \text{const}, \quad \Delta X / \Delta t = \text{const}$$



Slika 5.14. Utjecaj početnog sadržaja vlage materijala na period konstantne brzine sušenja

Kako se vidi na slici 5.14. krivulja sušenja ne mora uvijek pokazati postojanje perioda konstantne brzine sušenja. Naime ukoliko je početni sadržaj vlage materijala manji od kritičnog krivulja brzine sušenja imati će maksimalnu vrijednost nakon koje brzina sušenja počinje opadati. Karakterističan plato ($\Delta X / \Delta t = \text{const}$) postoji samo u slučajevima kada je sadržaj vlage materijala na početku sušenja dovoljno velik da osigura potpunu prekrivenost izložene površine materijala tankim slojem vlage.

Brzina sušenja može se izračunati na nekoliko načina.

1. Na temelju eksperimentalnih podataka uz poznatu stvarnu površinu isparavanja:

$$R = - \frac{m_{sm}}{A} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (5.14.)$$

Ovdje je R – gustoća toka vlage, $\text{kg/m}^2\text{s}$.

2. Procjenom koeficijenta prijenosa tvari, k , korištenjem korelacijskih jednadžbi, kao na primjer:

$$Sh = C \cdot Re^n \cdot Sc^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \quad (5.15.)$$

Sherwoodova značajka:

$$Sh = \frac{k \cdot L}{D} \quad (5.16.)$$

Schmidtova značajka:

$$Sc = \frac{\eta}{D \cdot \rho} \quad (5.17.)$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\eta} \quad (5.18.)$$

Guckmannova značajka

$$Gu = \frac{T_{ST} - T_{MT}}{T_{ST}} \quad (5.19.)$$


Konstante u navedenoj jednadžbi za određeni hidrodinamički režim dane su u tablici.

Re	C	n
1-200	0,900	0,50
200-6000	0,870	0,54
6000-70000	0,347	0,65

3. Procjenom koeficijenta prijelaza topline, α

Ovisno o smjeru strujanja zraka u odnosu na materijal postoje korelacije:

←



$$\alpha = 0,0204 \cdot \left(\frac{m_z}{A} \right)^{0,8} \quad (5.20.)$$

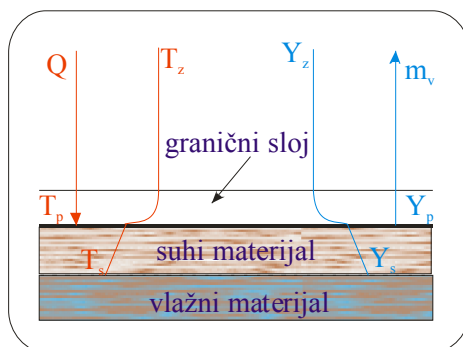


$$\alpha = 1,17 \cdot \left(\frac{m_z}{A} \right)^{0,37} \quad (5.21.)$$

5.5.2. Period padajuće brzine sušenja

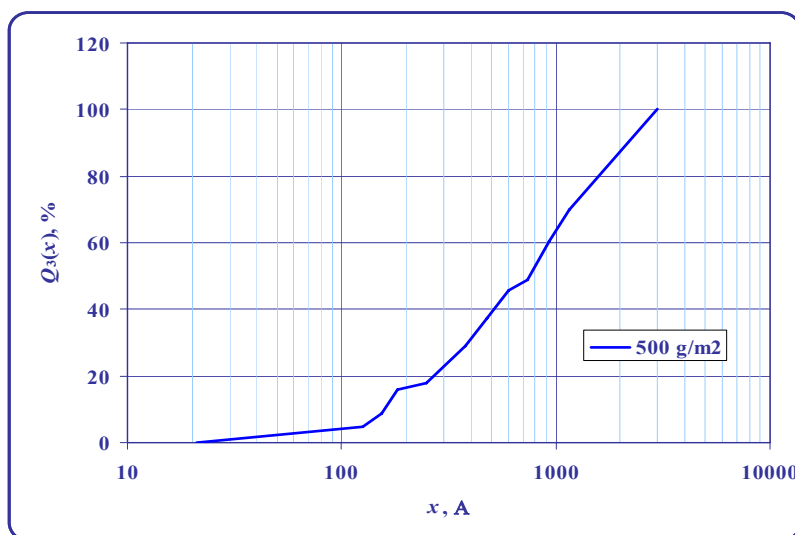
Kretanje vlage kroz unutrašnjost poroznog materijala, pod utjecajem je svojstava materijala koji se suši (unutrašnja struktura, sadržaj vlage, temperatura). Razvijanje temperaturnog gradijenta u materijalu dok vlaga isparava sa površine, posljedica je dovođenja topline vlažnom materijalu. Zbog toga, nadalje, dolazi do kretanja vlage iz unutrašnjosti materijala prema njegovoj površini i može se odvijati na više načina, što je veoma značajno kada je proces sušenja kontroliran unutarnjim mehanizmima prijenosa tvari. U periodu padajuće brzine sušenja, koja započinje kada sadržaj vlage

materijala postane manji od kritičnog, svojstva sušnog medija (zraka) koja inače idu u korist ubrzavanja procesa postaju bitna jedino za intenzifikaciju većih brzina prijenosa topline. Proračun procesa postaje znatno složeniji, što predstavlja problem kod predviđanja vladanja sustava matematičkim modeliranjem. Dakle javlja se novi otpor prijenosu tvari i topline, koji pruža sam materijal koji se suši.



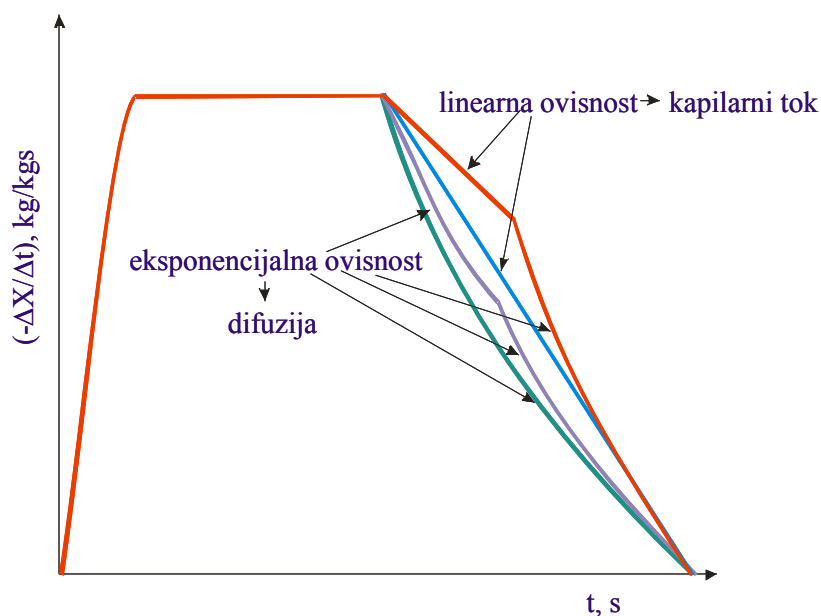
Slika 5.15. Otpori procesima prijenosa tvari i topline u periodu konstantne brzine sušenja

U periodu padajuće brzine sušenja, kada svojstva materijala koji se suši postaju bitna za kinetiku sušenja dva su osnovna mehanizma kojima se vlaga može kretati unutar poroznog materijala, kapilarni tok i difuzija (pare, kapljevine, Knudsenova). Veličina pora značajan je faktor koji definira kontrolirajući mehanizam. Ako je promjer pora veću od 10^{-7} m, vlaga će se kretati kapilarnim mehanizmom, dok će se kroz sitnije pore kretati difuzijskim mehanizmom. Međutim, često je unutrašnja struktura poroznog materijala takva da će se dio vlage kretati difuzijom, a dio kapilarnim tokom. Tada će krivulja sušenja u pokazati postojanje dva ili više perioda padajuće brzine sušenja. Obzirom da je otpor strujanju (utjecaj stjenke pora) manji u porama većeg promjera, prvo će se prazniti upravo pore većeg promjera. Budući da se kroz pore većeg promjera vlaga kreće kapilarnim tokom, prvi će period padajuće brzine sušenja odgovarati kapilarnom mehanizmu kretanja vlage kroz unutrašnjost vlažnog materijala. Za predviđanje mehanizama prijenosa vlage tijekom sušenja u periodu padajuće brzine sušenja, potrebno je poznavati raspodjelu veličina pora. Na slici 4.16. prikazan je primjer jedna raspodjele veličina pora materijala čija je unutrašnja struktura takva da će se dio vlage kretati kapilarnim tokom a dio difuzijskim mehanizmom.



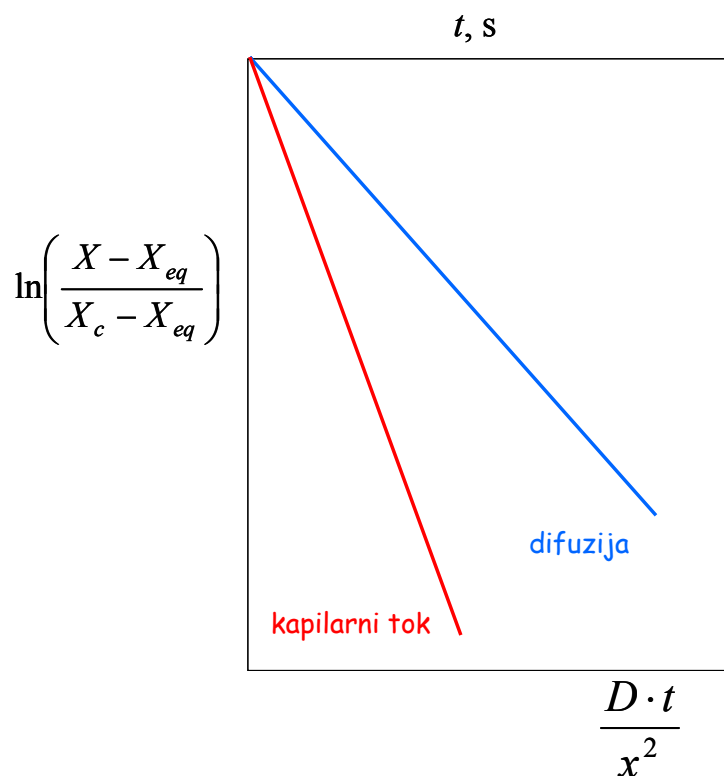
Slika 5.16. Raspodjela veličina pora

Manje precizan način određivanja mehanizma kretanja vlage, je na temelju grafičkog prikaza ovisnosti brzine sušenja o vremenu. Naime, na temelju oblika krivulje može se donijeti zaključak o mehanizmu kretanja vlage. Ukoliko je ta ovisnost linearna vlaga se kreće kapilarnim tokom, a ukoliko je eksponencijalna difuzijskim mehanizmom.



Slika 5.17. Krivulja brzine sušenja (različiti mehanizmi prijenosa vlage)

Kada je eksperimentalno određena kinetička krivulja sušenja, odnosno kada je poznat kritični sadržaj vlage materijala u danim uvjetima sušenja, može se na relativno jednostavan način odrediti koji je od ta dva mehanizma odgovoran za prijenos vlage iz unutrašnjosti prema površini materijala. Crtanjem ovisnosti neostvarene promjene sadržaja vlage u ovisnosti o vremenu (slika 5.18.) dobiva se pravac iz čijeg se nagiba onda na sljedeći način odredi da li je dominantan kapilarni i difuzijski mehanizam.



Slika 5.18. Određivanje mehanizma prijenosa vlage u periodu padajuće brzine sušenja

Ako se vlaga kroz materijal kreće kapilarnim tokom brzina sušenja u linearnoj je ovisnosti o sadržaju vlage materijala. Kako je mehanizam isparavanja isti kao tijekom perioda konstantne brzine sušenja, na njenu vrijednost utječu isti parametri (brzina strujanja zraka, temperatura, relativna vlažnost). Jednadžba koja opisuje brzinu sušenja je:

$$R = -\frac{m_{sm}}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (5.22.)$$

ovdje je R brzina sušenja u $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$, m_{sm} , masa suhog materijala, A , površina ishlapljivanja/isparavanja.

Kako se brzina mijenja linearno sa sadržajem vlage:

$$R = R_c \cdot \frac{X - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} \quad (5.23.)$$

Ako se za količinu suhog materijala napiše da je jednaka:

$$m_{sm} = x \cdot A \cdot \rho, \quad (5.24.)$$

može se za vrijeme sušenja napisati:

$$t = \frac{x \cdot \rho \cdot X_c}{R_c} \cdot \ln\left(\frac{X_c - X_{eq}}{X - X_{eq}}\right) \quad (5.25.)$$

odnosno, dobiva se pravac iz čijeg se nagiba može izračunati brzina sušenja:

$$\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_c - X_{eq}}\right) = -\frac{R_c}{x \cdot \rho \cdot X_c} \cdot t \quad (5.26.)$$

Ako brzina sušenja određena na taj način odgovara eksperimentalno određenoj, tada je tok vlage kroz unutrašnjost materijala pod kontrolom kapilarnog mehanizma.

Ukoliko vrijednost procijenjene brzine sušenja ne odgovara eksperimentalno određenoj, tada je proces sušenja u periodu padajuće brzine sušenja pod kontrolom difuzije, te se iz nagiba pravca izračuna vrijednost efektivnog difuzijskog koeficijenta. Pri tome se koristi II Fickov zakon:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (5.27.)$$

Ovaj je način difuzije često karakterističan za relativno sporo sušenje materijala kao što su sapun, želatina, ljepilo, te za kasnije stadije sušenja gline, tekstila, drveta, papira te ostalih hidrofilnih krutina. Najveći problem koji se javlja kod analize podataka je taj da početna raspodjela vlage u materijalu nije jednolika ako postoji i period konstantne brzine sušenja. Otpor prijenosu isparene vlage sa površine materijala vrlo je malen, a difuzija kontrolira proces sušenja. Sadržaj vlage na površini materijala ima ravnotežnu vrijednost, što znači da je slobodni sadržaj vlage nula. Analitičko rješenje II Fickovog zakona za taj slučaj ima sljedeći oblik:

za ploču:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot e^{-\frac{D_{eff} \cdot (2n+1)^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot x^2} \cdot t} \quad (5.28.)$$

ovdje x predstavlja poludebljinu ploče ($L/2$) ako se sušenje odvija sa obje strane, odnosno debljinu ploče ako se sušenje odvija samo sa jedne strane.

za kuglu:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-\frac{D_{eff} \cdot n^2 \cdot \pi^2}{r^2} \cdot t} \quad (5.29.)$$

Jednadžbe pretpostavljaju da je D_{eff} konstantno, iako u se praksi vrijednost efektivnog difuzijskog koeficijenta mijenja sa temperaturom, sadržajem vlage i vlažnosti zraka. Za duga vremena sušenja bitan je samo prvi član gornjih izraza, te se dobiva:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{D_{eff} \cdot \pi^2}{4 \cdot x^2} \cdot t} \quad (5.30.)$$

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{D_{eff} \cdot \pi^2}{r^2} \cdot t} \quad (5.31.)$$

Jednadžbe iz kojih se sada određuje efektivni difuzijski koeficijent (slika 5.18.) su:

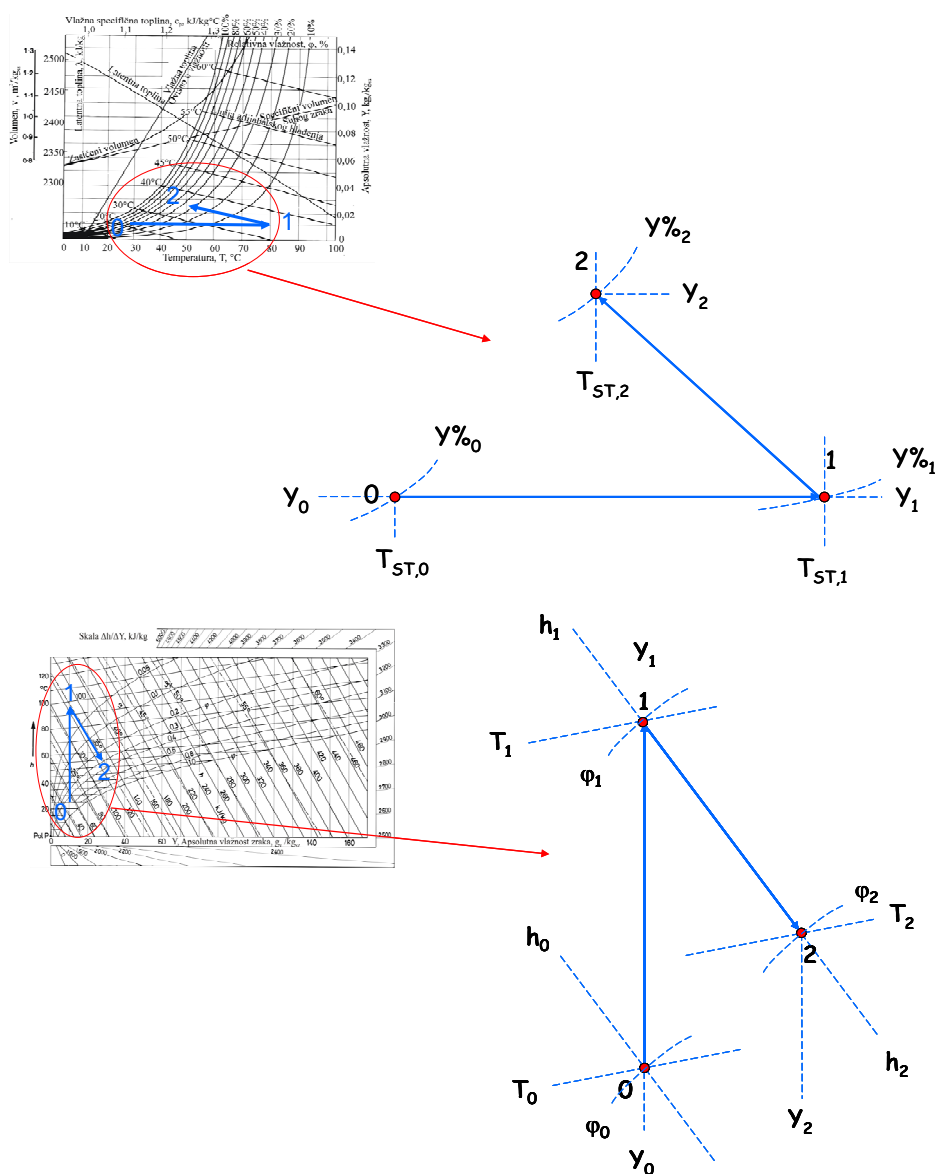
$$\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot \pi^2}{4 \cdot x^2} \cdot t \quad (5.32.)$$

$$\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot \pi^2}{r^2} \cdot t \quad (5.33.)$$

5.5.3. Proračun zraka za sušenje

Prikaz procesa sušenja u dijagramima vlažnosti

Na slici 5.19. prikazano je kako se mijenja stanje zraka od zagrijavanja na željenu temperaturu sušenja do izlaska iz sušionika (za slučaj adijabatskog sušenja). Zagrijavanje se provodi pri konstantnoj apsolutnoj vlažnosti zraka jer se zrak samo zagrijava (smanjuje se relativna vlažnost zraka). Nakon postizanja željene temperature zrak ulazi u sušionik gdje prima na sebe vlagu pri čemu se hladi jer predaje toplinu vlažnom materijalu. Ako se u sušionik stalno doprema zrak kondicioniran na iste uvjete na kraju sušenja zrak bi se morao vratiti u točku 1.



Slika 5.19. Prikaz procesa sušenja u dijagramima vlažnosti

Protok suhog zraka kroz sušionik

$$m_{sz} = m_v \cdot g \quad (5.34.)$$

- specifični protok suhog zraka, $\text{kg}_{sz}/\text{kg}_w$

$$g = \frac{1}{Y_2 - Y_0} \quad (5.35.)$$

Količina topline koja se troši u predgrijaču zraka

$$Q = m_{sz} \cdot (h_1 - h_0) \quad (5.36.)$$

Kod normalne varijante sušenja iz bilance topline slijedi:

$$Q = m_{sz} \cdot (h_2 - h_0) + \sum Q_g \quad (5.37.)$$

$$h_1 = h_2$$

$\sum Q_g$ - suma topline za zagrijavanje materijala, nosača i za gubitke u okolinu

Q - toplina za isparavanje vlage i grijanje zraka i pare

Specifični utrošak topline za isparavanje vlage

$$q = \frac{Q}{m_v} = \frac{h_2 - h_0}{Y_2 - Y_0} = g \cdot (h_1 - h_0) \quad (5.38.)$$

$$q_t = \frac{h_2 - h_0}{Y_2 - Y_0} \quad (5.39.)$$

q_t - specifični utrošak topline u teoretskom sušioniku, kJ/kg_v

Razlika ova dva specifična utroška topline je:

$$q - q_t = \frac{h_2 - h_0}{Y_2 - Y_0} = \Delta \quad (5.40.)$$

Za slučaj kada nema dodatnog zagrijavanja u sušioniku vrijedi:

$$\Delta = \frac{\sum Q}{m_v} = q_{mat} + q_{nos} + q - c \cdot T_{ul} \quad (5.41.)$$

Toplinska efikasnost sušionika

$$E = \frac{\lambda}{q} \quad (5.42.)$$

λ - latentna toplina isparavanja vode kod temperature mokrog termometra, J/kg

Miješanje dviju struja zraka

Ako se miješaju dvije struje zraka označene točkama 1 i 2 na slici 5.20. mogu se uz definirana stanja tih dviju struja izračunati sve veličine koje definiraju stanje smjese.

Ukupna bilanca tvari:

$$\dot{m}_{z1} + \dot{m}_{z2} = \dot{m}_z \quad (5.43.)$$

Bilanca tvari za vlagu:

$$Y_1 \cdot \dot{m}_{z1} + Y_2 \cdot \dot{m}_{z2} = Y_m \dot{m}_z \quad (5.44.)$$

Bilanca topline:

$$h_1 \cdot \dot{m}_{z1} + h_2 \cdot \dot{m}_{z2} = h_m \dot{m}_z \quad (5.45.)$$

Apsolutna vlažnost smjese

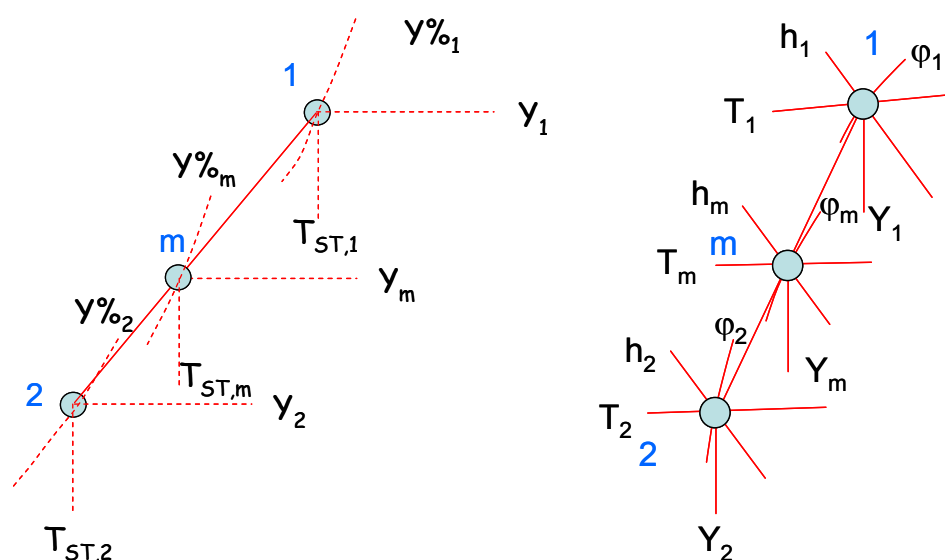
$$Y_m = \frac{\dot{m}_{z1} \cdot Y_1 + \dot{m}_{z2} \cdot Y_2}{\dot{m}_{z1} + \dot{m}_{z2}} \quad (5.46.)$$

Entalpija smjese:

$$h_m = \frac{\dot{m}_{z1} \cdot h_1 + \dot{m}_{z2} \cdot h_2}{\dot{m}_{z1} + \dot{m}_{z2}} \quad (5.47.)$$

Pravilo poluge:

$$\frac{\dot{m}_{z1}}{\dot{m}_{z2}} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l - l_1}{l_1} \quad (5.48.)$$



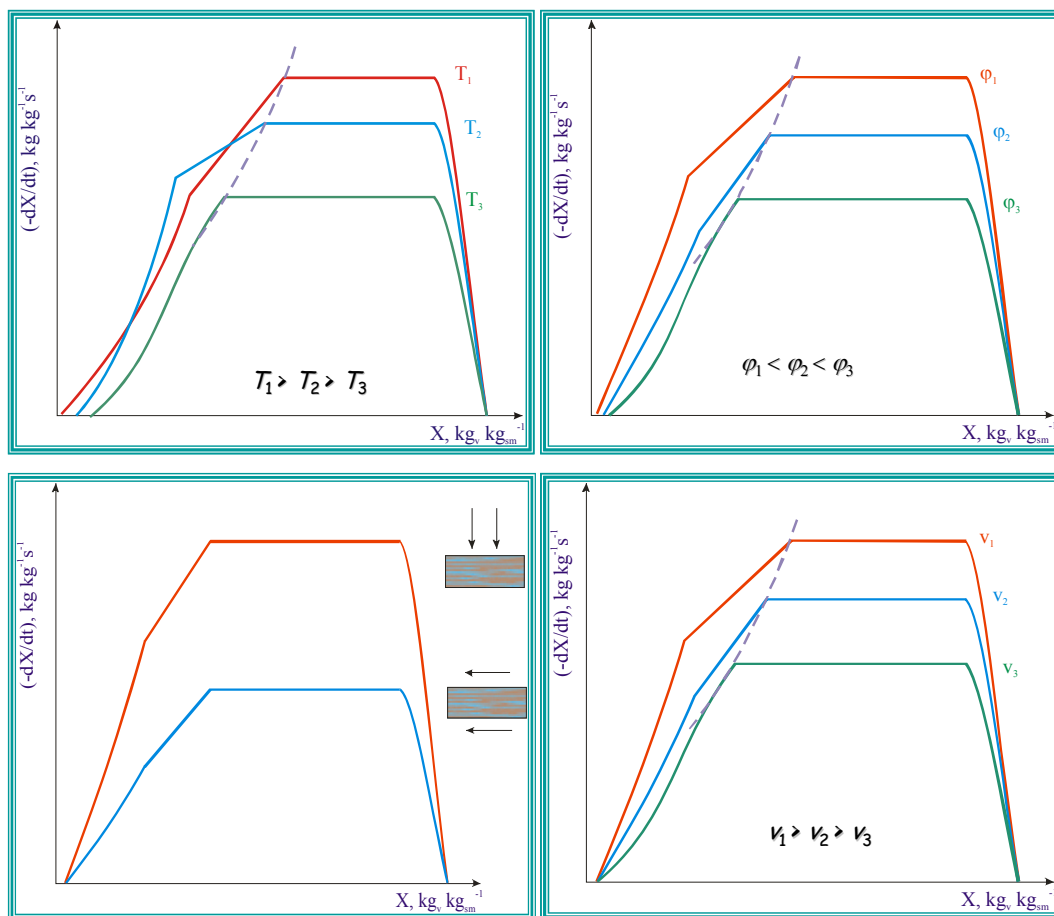
Slika 5.20. Prikaz u dijagramima vlažnosti: a) Y-T, b) h-Y

5.5.4. Utjecaj vanjskih uvjeta na kinetiku sušenja

Na kinetiku sušenja utječu uvjeti sušenja te geometrijska i fizikalna svojstva materijala koji se suši.

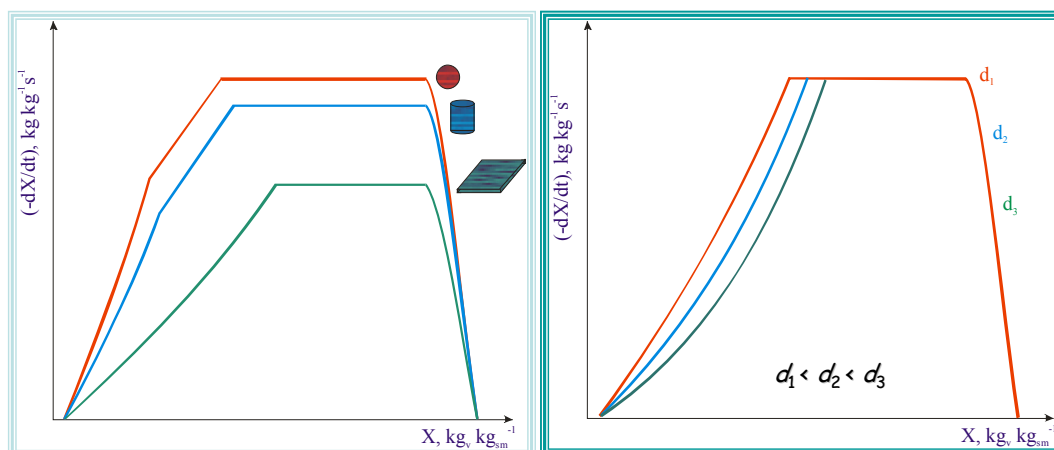
Veća brzina sušenja ostvaruje se pri višim temperaturama, nižim relativnim vlažnostima i većoj brzini strujanja zraka (medija za sušenje). Naime, pri višim temperaturama zraka veća je pokretačka sila procesa prijenosa topline, a time i brzina isparavanja i zagrijavanja materijala koji se suši. Više su i vrijednosti svih prijenosnih svojstava (koeficijenta difuzije, koeficijenta prijenosa tvari, koeficijata prijelaza topline i toplinske vodljivosti). Ukoliko je manja relativna vlažnost zraka veća je pokretačka sila za proces prijenosa tvari. Pri većim brzinama strujanja zraka povoljniji su hidrodinamički uvjeti (manji su otpori) što za posljedicu ima veće brzine prijenosa topline i tvari. Brzina sušenja veća je ako zrak struji okomito na porozni materijal, što ima poseban utjecaj ako se suši mirujući sloj čvrstih čestica. Obzirom da zrak prolazi kroz sloj čestica, bolji je prijenos topline a time i tvari. Prijenos tvari

je intenziviran i zbog toga što zrak sa sobom odnese dio vlage iz unutrašnjosti materijala. Dakle, ne zagrijava se samo preko vanjske površine, a prijenos tvari i topline odvijaju se u istom smjeru.



Slika 5.21. Utjecaj svojstava zraka i hidrodinamičkih uvjeta na brzinu sušenja

Vezano uz geometrijske karakteristike materijala značajni su oblik čestica, debljina materijala kao i unutrašnja struktura poroznog materijala.



Slika 5.22. Utjecaj geometrijskih karakteristika materijala na brzinu sušenja

Kuglica se suši u najpovoljnijim uvjetima zbog savršenog oblika. Naime kroz cijeli su volumen ujednačeni temperaturni i koncentracijski gradijenti, pa se po volumenu u svim smjerovima jednoliko suši. Što se tiče tijela cilindričnog oblika, put difuzije je različit u aksijalnom i radijalnom smjeru, što može za posljedicu imati nejednolik konačan sadržaj vlage materijala. Dimanzije tanke ploče su takve da je još veća mogućnost neravnomjerne raspodjele sadržaja vlage na kraju sušenja. Kinetika sušenja ovisi i o tome da li je ploča obješena pa su sve njene plohe izložene sušnom mediju, ili se suši samo s jedne strane ako se nalazi na nosaču (sporije sušenje).

Ukoliko su svi uvjeti procesa sušenja isti, kao i početni sadržaj vlage, maksimalna brzina sušenja koja odgovara periodu konstantne brzine sušenja biti će ista za sve debljine uzoraka. Međutim vrijeme trajanja perioda konstante brzine sušenja biti će kraće za deblji materijal, obzirom da je dulji put difuzije (i kondukcije), pa vlaga ne uspije dovoljno brzo stići iz unutrašnjosti materijala do njegove površine kako bi osigurala prekrivenost materijala tankim slojem vlage (brzina isparavanja je veća od brzine dovođenja vlage do površine materijala).

Već je rečeno da se vlaga brže kreće kroz pore koje su većeg promjera. To za posljedicu ima i veću brzinu sušenja u odnosu na pore manjeg promjera.

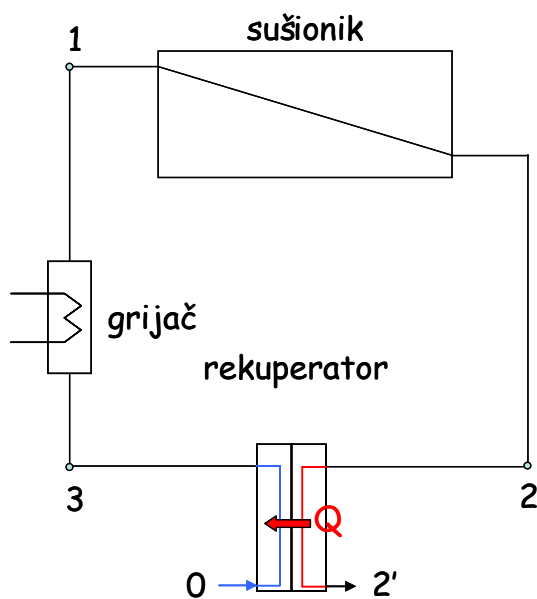
Početni sadržaj vlage materijala također utječe na brzinu sušenja. U istim uvjetima sušenja niži početni sadržaj vlage materijala rezultira većom brzinom sušenja i kraćim vremenom trajanja procesa. Tu je također važno znati da li se veći sadržaj vlage odnosi samo na površinsku vlagu ili i na unutrašnju (da li su sve pore ispunjene vlagom).

Na kraju treba spomenuti i mehanizam zagrijavanja materijala. Najnepovoljniji uvjeti sušenja postižu se kod konvekcijskog sušenja, jer se procesi prijenosa vlage i topline odvijaju u suprotnim smjerovima. Nakon toga slijedi kondukcijsko sušenje, kod kojeg se procesi prijenosa tvari i topline odvijaju u istom smjeru. Ako se kondukcijsko sušenje odvija još i pri sniženom tlaku i uz istu temperaturu sušenja proces će biti još brži. Naime, temperatura vrelišta smanjuje se kako se snižava tlak tako da se vlaga kreće i pod utjecajem gradijenta tlaka ali postoji i mogućnost da do isparavanja dođe unutar pora pa tako nastala para vuče sa sobom i kapljevinu prema površini materijala. Najpovoljniji su uvjeti osigurani mikrovalnim sušenjem, obzirom da se cijeli volumen uzorka (odnosno vlage prisutne u materijalu) istovremeno zagrijava a procesi prijenosa tvari odvijaju se u istom smjeru i to iz unutrašnjosti (koja je na najvećoj temperaturi) prema površini materijala.

5.6. Ušteda energije kod sušenja

Obzirom na prisutnost sušenja u gotovo svim industrijskim granama, te upotrebu većinom konvekcijskih sušionika očito je da je sušenje nepovoljno s energetskog ali i ekološkog aspekta. Za zagrijavanje zraka troše se velike količine topline, a vlažni i topli zrak ispušta se u atmosferu. Zbog toga se danas u velikoj mjeri sušenje provodi tako da se iskoristi toplina koju zrak na izlasku iz sušionika nosi sa sobom. U ovom poglavlju dati će se pregled najčešće korištenih metoda uštede energije, koje su ujedno i povoljnije s ekološkog aspekta.

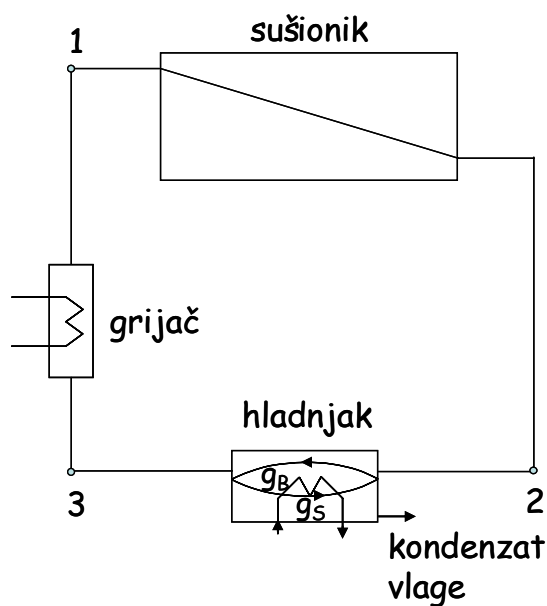
5.6.1. Rekuperacija topline



Slika 5.23. Rekuperacija topline

Zrak na izlazu iz sušionika koristi se za predgrijavanje zraka prije ulaska u sušionik. Vlažni i topli zrak ulazi u izmjenjivač topline (rekuperator) gdje kao topli fluid predaje toplinu zraku prije ulaska u predgrijač. Na taj način moguće je ostvariti uštedu energije od 15 %, jer se manja količina energije troši u predgrijaču. U okoliš se ispušta ohlađeni zrak, manje apsolutne vlažnosti.

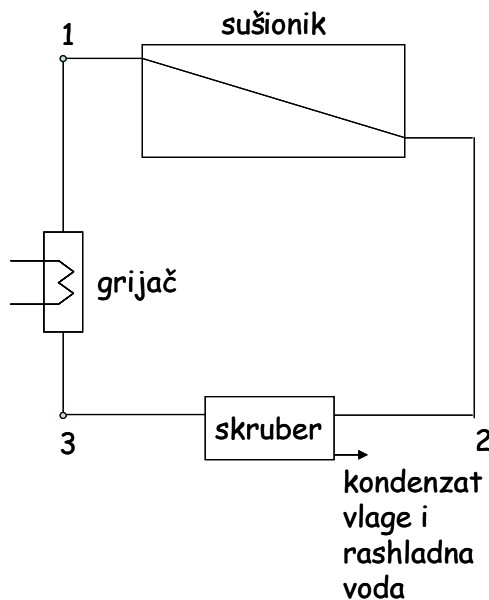
5.6.2. Indirektno odvlaživanje



Slika 5.24. Indirektno odvlaživanje

Zrak nakon izlaska iz sušionika ulazi u hladnjak pri čemu se dio prisutne vlage kondenzira pa je vlažnost zraka niža. Takav zrak nakon odvlaživanja ide u predgrijač, pri čemu je moguće ostvariti uštedu energije od 20 %. Nema ispuštanja zraka u okoliš.

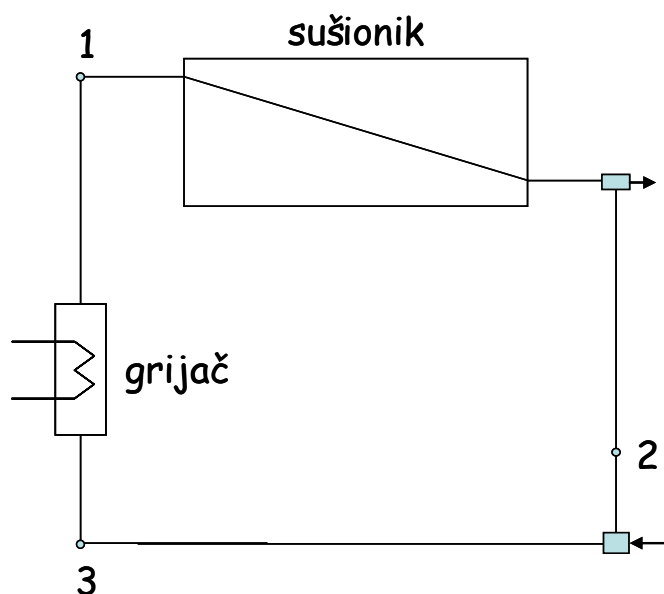
5.6.3. Direktno odvlaživanje



Slika 5.25. Direktno odvlaživanje

Zrak iz sušionika ulazi u skruber (direktno odvlaživanje) gdje se adijabatski hladi i odvlažuje u kontaktu sa vodom (ušteda 20 %). Kao i u prethodnom načinu uštede energije zrak se vraća u proces sušenja, a za predgrijavanje je potrebna manja količina topline.

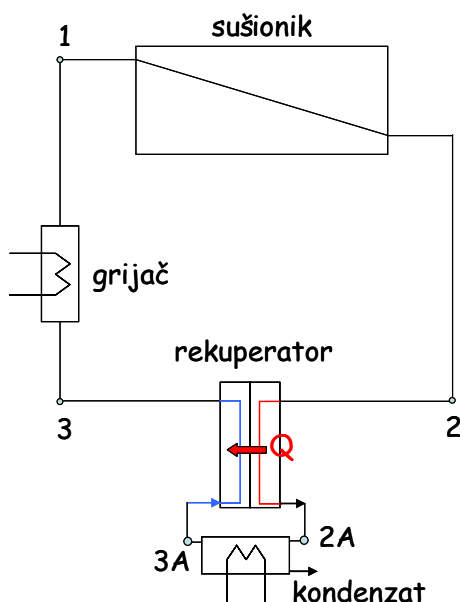
5.6.4. Parcijalna izmjena zraka



Slika 5.26. Parcijalna izmjena zraka

Dio toplog i vlažnog zraka na izlazu iz sušionika miješa se sa svježim zrakom pri čemu se hladi i odvlažuje (10 % ušteda). Takva smjesa zraka ima višu temperaturu u odnosu na svježi zrak tako da se u predgrijaču troši manje energije za zagrijavanje. Ušteda je nešto manja obzirom da zrak ima nešto veću apsolutnu vlažnost pa je manja pokretačka sila za proces prijenosa tvari.

5.6.5. Odvlaživanje i rekuperacija

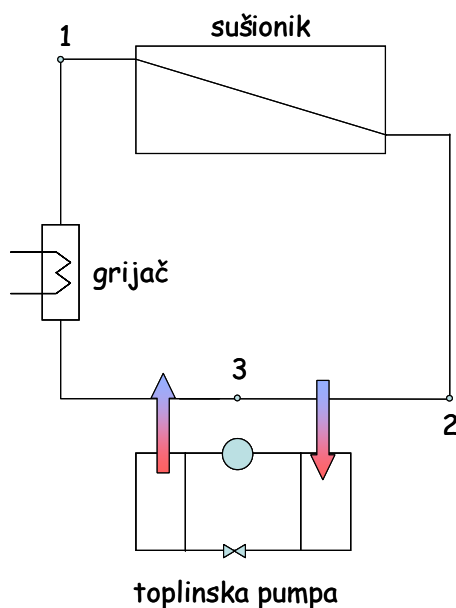


Slika 5.27. Odvlaživanje i rekuperacija

Ovom se metodom ostvaruje znatno veća ušteda energije (30 %), a proces je povoljniji i sa ekološkog aspekta, jer se koriste dvije metode. Topli vlažni zrak ulazi u izmjenjivač topline u kojem predaje određenu količinu topline i hladi se. Nakon toga ulazi u hladnjak gdje se još više ohladi pri čemu se kondenzira određena količina vlage. Takav zrak ulazi u izmjenjivač topline kao hladni fluid i grije se pomoću izlaznog zraka. U predgrijaču se nadoknadi potrebna toplina da bi se zrak zagrijao na željenu temperaturu prije ponovnog ulaska u sušionik.

5.6.6. Upotreba toplinske pumpe

Princip rada toplinske pumpe detaljno je objašnjen kada se govori o uštedi energije u procesima isparavanja (isparivači). Vlažni i topli zrak ulazi u prvi izmjenjivač topline gdje kao topli fluid zagrijava radni medij toplinske pumpe. Prilikom zagrijavanja dolazi do isparavanja radnog medija toplinske pumpe, a nastala para ulazi u kompresor gdje se komprimira na viši tlak pri čemu mu raste i temperatura, te ulazi u drugi izmjenjivač topline. Sada radni medij toplinske pumpe kao topli fluid predaje toplinu zraku, zrak se zagrijava, a preostala potrebna toplina nadoknađuje se u predgrijaču. Moguća je ušteda energije čak do 65 %.



Slika 5.28. Ušteda energije pomoću toplinske pumpe

5.7. Sušionici

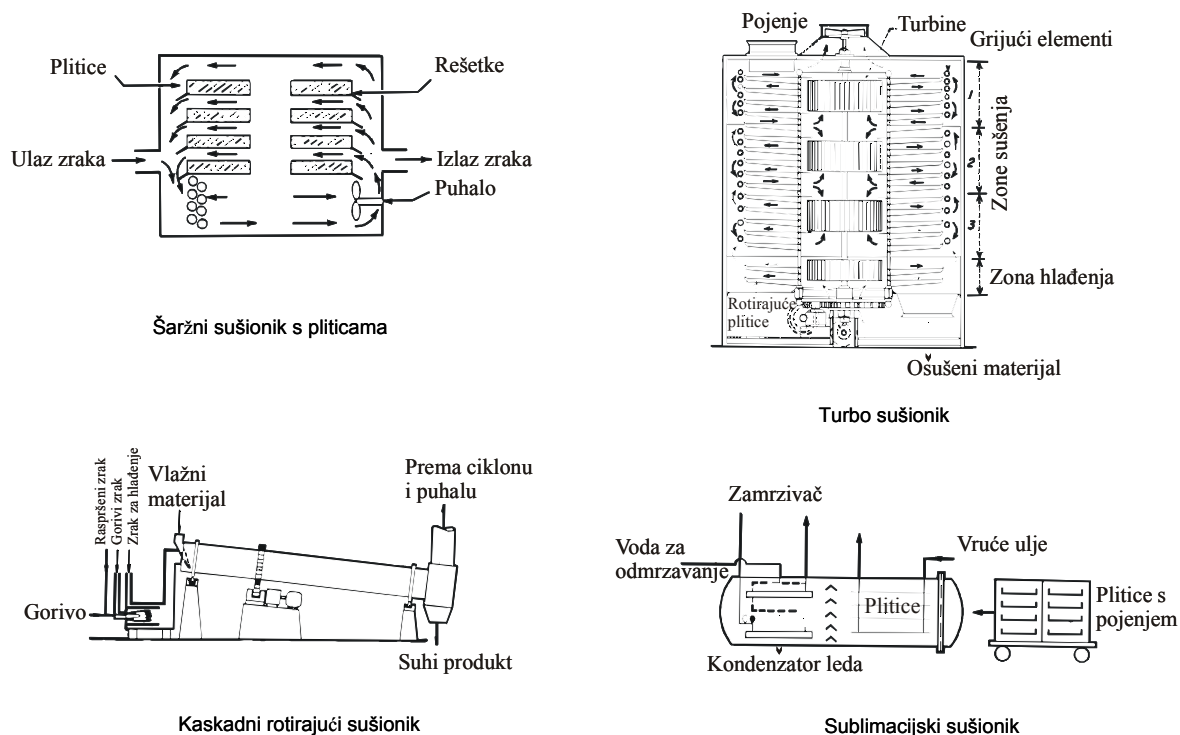
Različite značajke materijala koji se suši uvjetuju postojanje velikog broja sušionika. Sušionici se klasificiraju na različite načine koji će se u nastavku navesti.

Klasifikacija sušionika

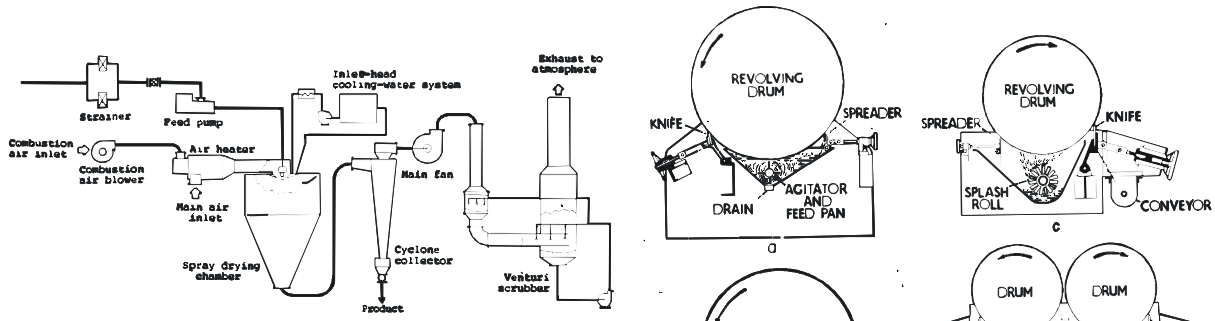
1. Obzirom na način rada
 - Šaržni
 - kontinuirani
2. Obzirom na način dovođenja topline
 - Način zagrijavanja
 - Isprekidano ili kontinuirano
 - Adijabatski ili neadijabarski
3. Obzirom na stanje materijala u sušioniku
 - stacionarno
 - pokretno, uz miješanje, dispergirano
4. Obzirom na radni tlak
 - vakuum
 - atmosferski
5. Obzirom na sušni medij
 - zrak

- pregrijana para
 - plinovi
6. Obzirom na temperaturu sušenja
- manja od temperature vrelišta
 - veća od temperature vrelišta
 - manja od temperature ledišta
7. Obzirom na relativno gibanje materijala i sušnog medija
- istostrujno
 - protustrujno
 - miješani tok
8. Obzirom na broj stupnjeva
- Jednostupnjevito
 - višestupnjevito
9. Vrijeme zadržavanja
- kratko ($t < 1$ min)
 - srednje (1-60 min)
 - dugačko (> 60 min)

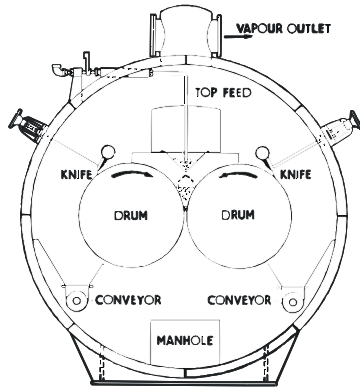
Očito je da nije moguće dati potpun pregled sušionika, tako da će se prikazati samo neke izvedbe sušionika.



Slika 5.29. Sušionici za praškaste materijale



Shema postrojenja sa sušionikom s raspršivanjem

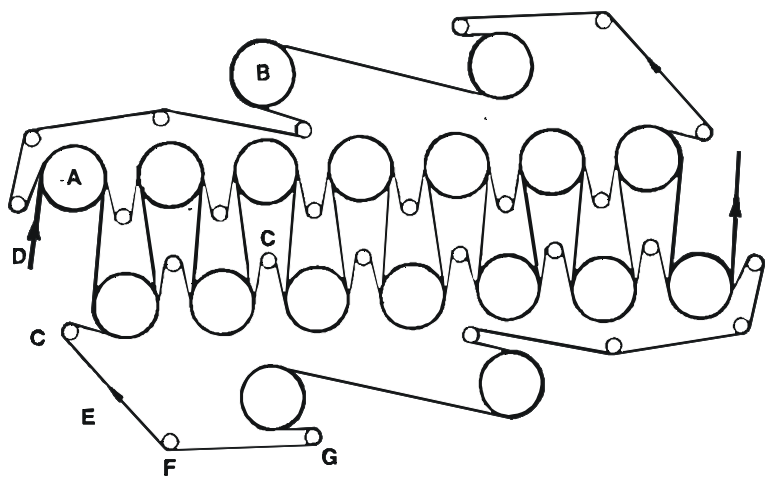


Vakuum sušionik s bubnjem

FIG. 16.18. Methods of feeding drum dryers. (a) Single drum, dip-feed. (b) Single drum, pan-feed. (c) Single drum, splash-feed. (d) Double drum, dip-feed. (e) Double drum, top-feed

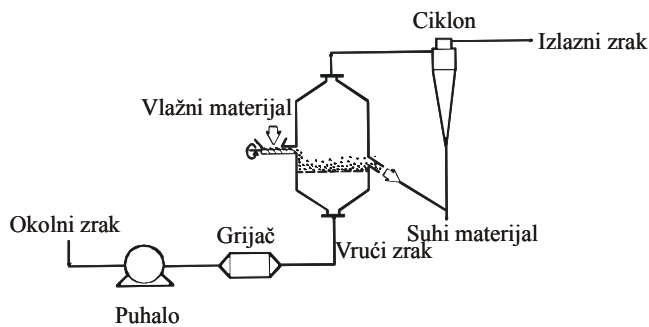
Izvedbe sušionika s bubnjem

Slika 5.30. Sušionici za muljeve i suspenzije

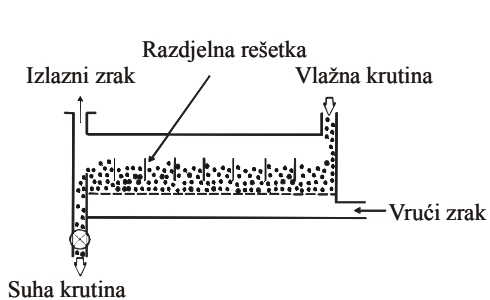


- A - valjci za sušenje papira
- B - valjci za sušenje sušnih sita
- C - valjci sušnog sita
- D - papirna traka
- E - sušno sito
- F - vodeći valjci sušnog sita
- G - valjci za napinjanje sušnog sita

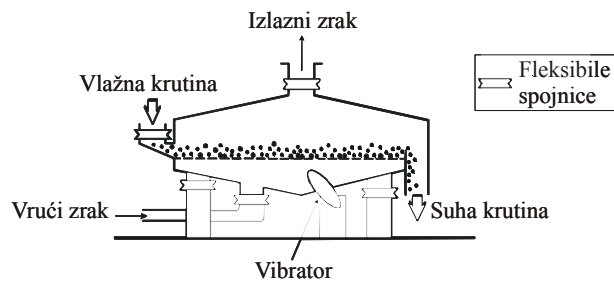
Slika 5.31. Sušionik za sušenje papira



Shematski prikaz sustava za sušenje u fluidiziranom sloju

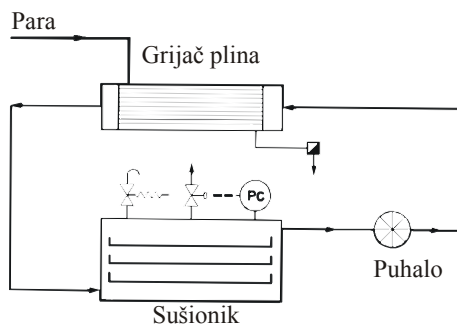


Sušionik s fluidiziranim slojem s jednolikom raspodelom brzina



Sušionik s vibro-fluidiziranim slojem

Slika 5.32. Sušionici za proizvodnju partikulativnih krutina



Slika 5.33. Sušenje pregrijanom parom

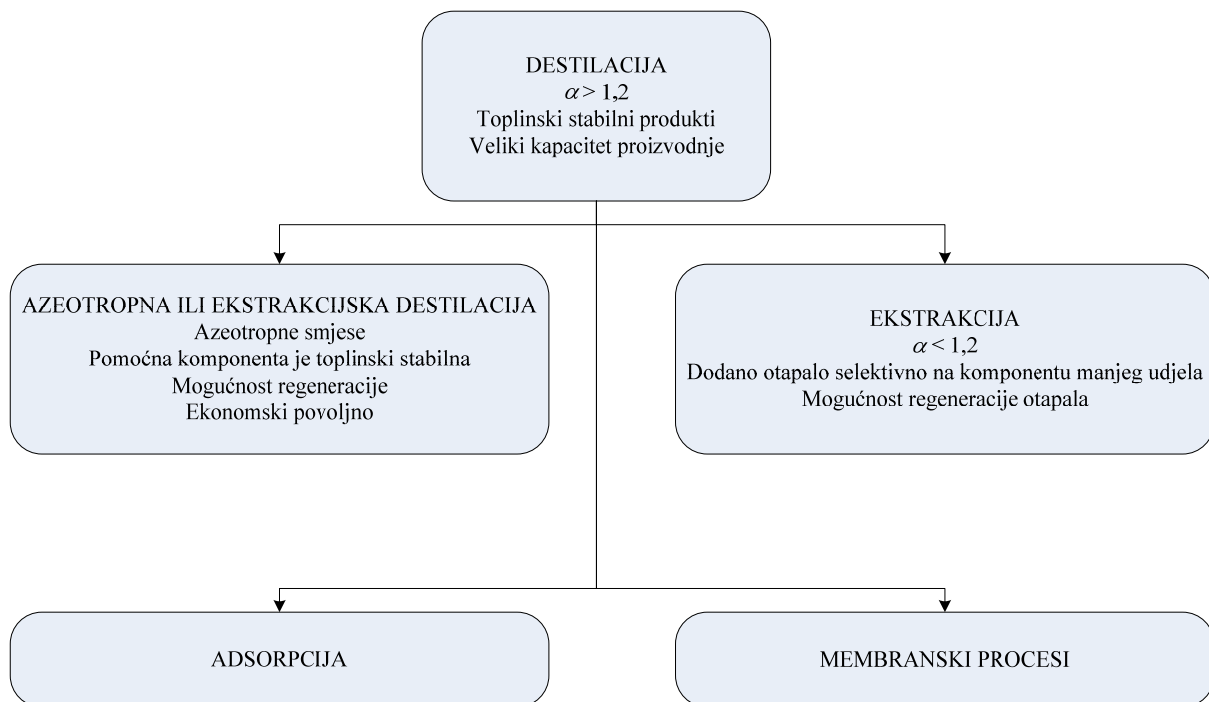
6. DESTILACIJA

6.1. Uvod

Destilacija je proces kod kojeg se smjesa (kapljevita ili parna) dvije ili više komponenti razdvaja do pojedinačnih komponenti željene čistoće. Osniva se na činjenici da će para sadržavati veći udio komponente nižeg vrelišta. Dakle, hlađenjem pare i njenom kondenzacijom destilat će biti bogatiji na lakše hlapivoj komponenti dok će donji produkt sadržavati veću količinu teže hlapive komponente.

Separacija komponenti destilacijom temelji se na njihovim različitim temperaturama vrelišta. Ovisno o sastavu, vrelište kapljevine će se mijenjati. Dakle, destilacija ovisi o svojstvima tlaka para kapljevite smjese.

Separacija kapljeviti smjesa destilacijom jedan je od najstarijih separacijskih procesa. To je najčešći separacijski proces koji troši velike količine energije. Usprkos tome kada god je potrebno separirati neku kapljevitu smjesu prvi je izbor uvijek destilacija (slika 6.1.). Ukoliko zbog nekog razloga smjesu nije moguće separirati destilacijom biraju se redom procesi kako je prikazano na slici 6.1.



Slika 6.1. Separacija kapljeviti smjesa

Destilacija se ne provodi sa sljedećim smjesama:

- Smjese jako i slabo zasićenih komponenti
- Smjese izomera
- Smjese vode i polarnih organskih ili anorganskih komponenti
- Smjese kod kojih se intervali vrelišta komponenti preklapaju

Dakle, efikasnost destilacije ograničavaju:

- Mala relativna hlapivost ($\alpha < 1,2$)
 - o Azeotropna ili ekstrakcijska destilacija, ekstrakcija, adsorpcija, membranski procesi
- Zahtjevi na čistoću pojenja i produkata
 - o Produkt visoke T_v ili male koncentracije ($< 0,2$)
 - o Ako se mala količina komponente visoke T_v mora ukloniti iz željenog produkta → SKUPO!!!
 - o Preklapanje intervala vrelišta kod višekomponentnih smjesa → puno kolona
- Potreba za ekstremnim temperaturama i tlakovima
 - o $T > 250^\circ\text{C}$ i $T < -40^\circ\text{C}$
 - o $p > 5 \text{ MPa}$ i $p < 2 \text{ kPa}$
- Mali kapacitet proizvodnje
- Ukoliko dolazi do neželjenih reakcija na temperaturama u koloni
 - o Toplinski nestabilne komponente u pojenju (gubitak produkta ili nastajanje neželjenih produkata)
 - o Taloženje
 - o Korozija (zahtjevi za skupim materijalima)
 - o Opasnost od eksplozije ukoliko pojenje sadrži nestabilne komponente

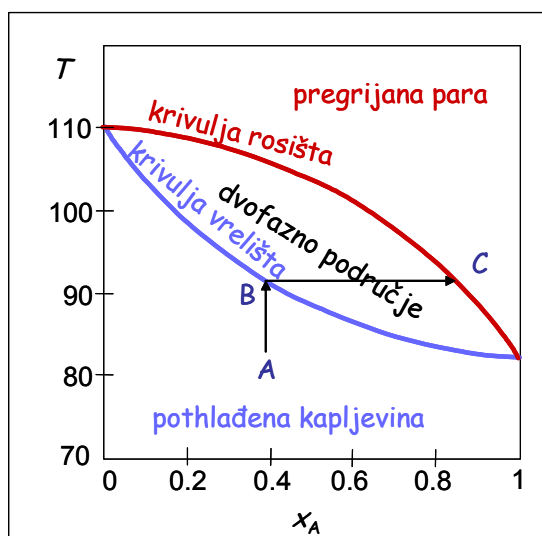
6.2. Tlak para i vrelište

Tlak para kapljevine pri nekoj temperaturi je ravnotežni tlak molekula koje izlaze i ulaze na površinu kapljevine. Tlak para raste s porastom temperature. Kapljevine vrije kada se njen tlak para izjednači sa okolišnim tlakom. Kapljevine velikog tlaka para, su hlapive pa vriju pri nižim temperaturama. Tlak para i temperatura vrelišta ovise o udjelima pojedinih komponenti u smjesi.

6.2.1. Dijagram vrelišta

Dijagram vrelišta pokazuje kako se ravnotežni sastavi komponenti mijenjaju ovisno o temperaturi pri definiranom tlaku (slika 6.2.) Uzmimo na primjer kapljevitu smjesu komponenata A i B. Vrelište čiste komponente A odgovara sastavu u kojem je $x_A = 1$, a vrelište čiste komponente B sastavu u kojem je $x_A = 0$. U ovom je primjeru A lakše hlapiva komponenta pa ima nižu temperaturu vrelišta. Gornja krivulja se naziva krivulja rosišta, a donja krivulja vrelišta. Točka rosišta je temperatura pri kojoj zasićena para počinje kondenzirati, a točka vrelišta temperatura pri kojoj kapljevine zavrije. Područje iznad krivulje rosišta odgovara pregrijanoj pari, a ispod krivulje vrelišta pothlađenoj kapljevini.

Na primjer zagrijavanjem pothlađene kapljevine koja sadrži 40 % komponente A (točka A), koncentracija joj se ne mijenja sve dok se ne zagrije do temperature vrelišta (točka B) i tada započinje vrenje. Para koja nastaje vrenjem ima ravnotežni sastav definiran točkom C (oko 80 %).



Slika 6.2. Dijagram vrelišta

6.2.2. Relativna hlapivost

Relativna hlapivost je mjera razlike hlapivosti dviju komponenti, odnosno njihovih temperatura vrelišta. Njena vrijednost ukazuje na lakoću separacije destilacijom. Relativna hlapivost komponente i u odnosu na komponentu j definira se na sljedeći način:

$$\alpha_{ij} = \frac{\left(\frac{y_i}{x_i}\right)}{\left(\frac{y_j}{x_j}\right)} \quad (6.1.)$$

gdje je :

y_i – molni udio komponente i u pari

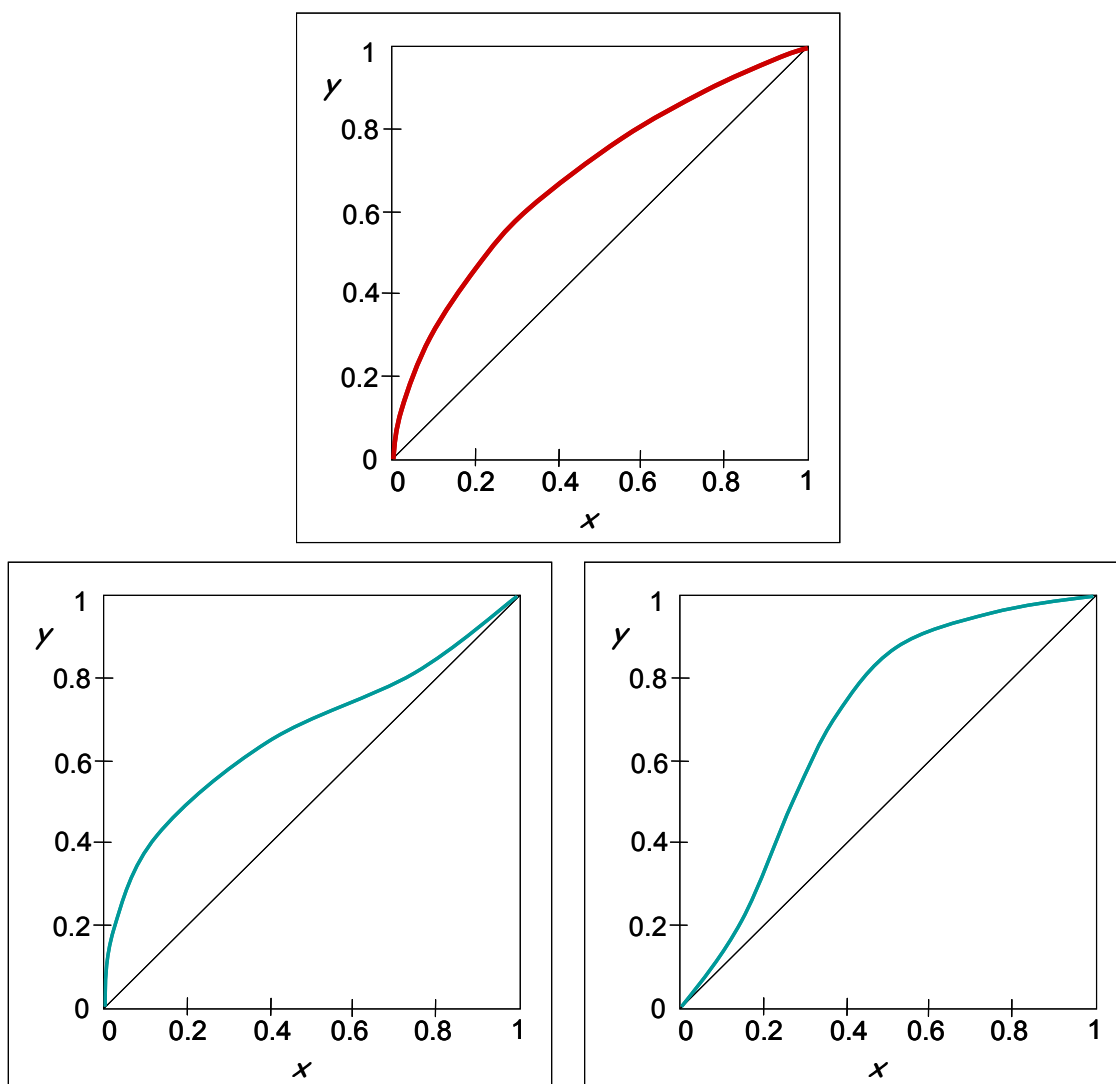
x_i – molni udio komponente i u kapljevini

Ako je relativna hlapivost dvije komponenti bliska jedinici, komponente imaju slične karakteristike tlaka para, bliske temperature vrelišta, pa će stoga biti izuzetno teško separirati ih destilacijom. U tom slučaju se smjesa mora separirati nekim drugim procesom (npr. ekstrakcijom).

6.3. Ravnoteža para-kapljevina

Destilacijske se kolone dizajniraju ovisno o svojstvima vrelišta komponenata u smjesi. Dakle, njihova veličina, posebno visina definirana je ravnotežom para-kapljevina. Naime, obzirom da se radi o procesu prijenosa tvari, potpomognutom prijenosom topline, pokretačka sila definirana je odstupanjem od ravnoteže.

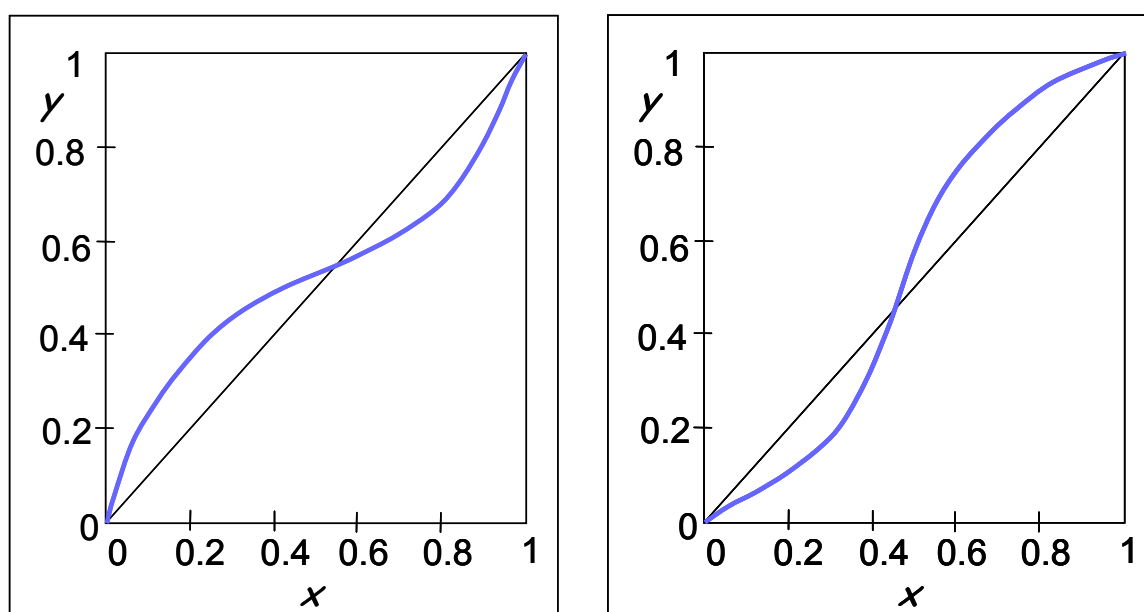
Ravnotežni podaci, pri stalnom tlaku, dobivaju se iz dijagrama vrelišta. Ravnotežni dijagrami su prikazani na slikama 6.3. i 6.4. Ravnotežna krivulja daje sastave parne i kapljevite faze u ravnoteži pri konstantnom tlaku. Smjese čije je vladanje bliske idealnom lagano se separiraju. Realne smjese se mnogo teže razdvajaju destilacijom.



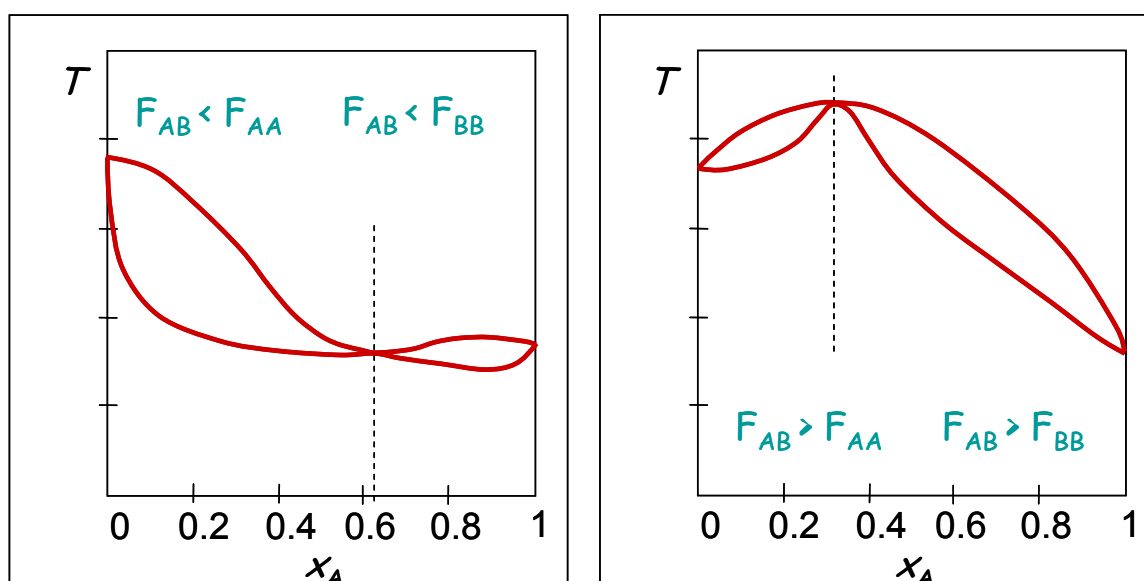
Slika 6.3. Ravnotežni dijagram idealne i realnih smjesa

Azeotropne smjese (slika 6.4.) nije moguće u potpunosti separirati destilacijom. Ravnotežne krivulje presjecaju dijagonalu. Točka sjecišta naziva se azeotropna točka. U toj točki su ravnotežni sastavi parne i kapljevite faze isti. Krivulja vrelišta prvog sustava prikazanog na slici 6.4. imati će minimalno vrelište u azeotropnoj točki, a drugi će sustav imati maksimalno vrelište u azeotropnoj točki (slika 6.5.). Na slici su prikazani homogeni azeotropi. Azeotrop je homogen ako je jedna kapljevita faza u ravnoteži sa parnom fazom, i ne može se separirati jednostavnom destilacijom. Da bi se smjesa separirala potrebno je prilagoditi položaj azeotropa. To se može postići na nekoliko načina. Ako je

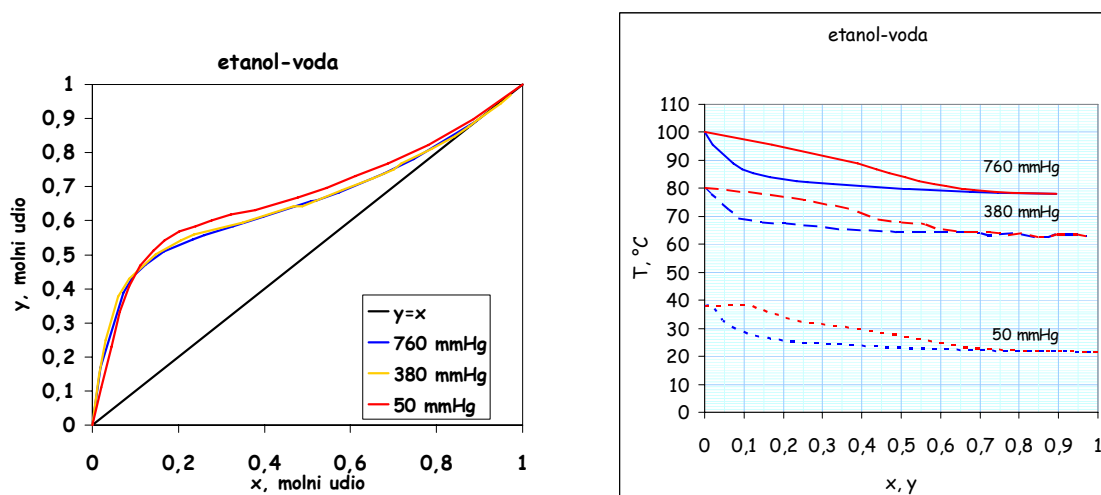
azeotropna točka vezana uz određene uvjete (p , T) njihovom promjenom (npr. promjenom radnog tlaka) azeotrop može nestati. Na slici 6.6. prikazano je kako se snižavanjem radnog tlaka pomiče azeotropna točka sustava etanol-voda, sve do potpunog nestanka pri tlaku od 50 mmHg. Azeotropna se točka također može ukloniti dodatkom treće komponente u sustav, tako da postoje dva slučaja. Ako treća komponenta ne tvori azeotrop sa niti jednom komponentom, govori se o ekstraktivnoj destilaciji. Pomoćna komponenta pri tome mora imati znatno veće vrelište i mora biti mješljiva sa smjesom. Ako treća komponenta sa jednom komponentom tvori azeotropnu smjesu nižeg vrelišta, govori se o azeotropnoj destilaciji. Vrelište dodane komponente blisko je vrelištima osnovne smjese.



Slika 6.4. Ravnotežni dijagrami azeotropnih smjesa

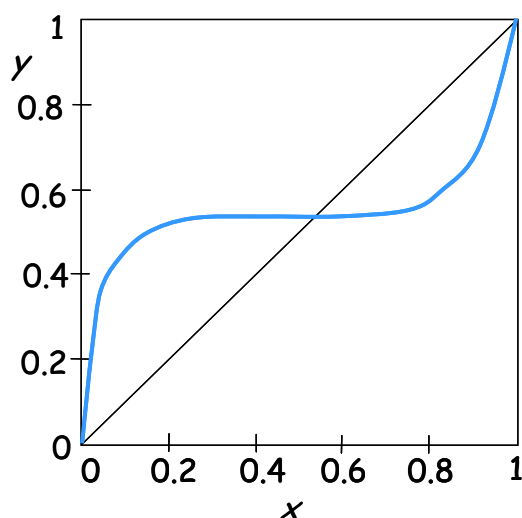


Slika 6.5. Dijagrami vrelišta azeotropnih smjesa



Slika 6.6. Utjecaj radnog tlaka na ponašanje azeotropne smjese

Primjer heterogenog azeotropa prikazan je na slici 6.7. Heterogeni se azeotropi mogu prepoznati po platou u ravnotežnom dijagramu. Takve je smjese moguće separirati u dvije destilacijske kolone jer obično tvore dvije kapljevite faze znatno različitog sastava. Te se dvije faze mogu razdvojiti u taložnicima u odgovarajućim uvjetima.



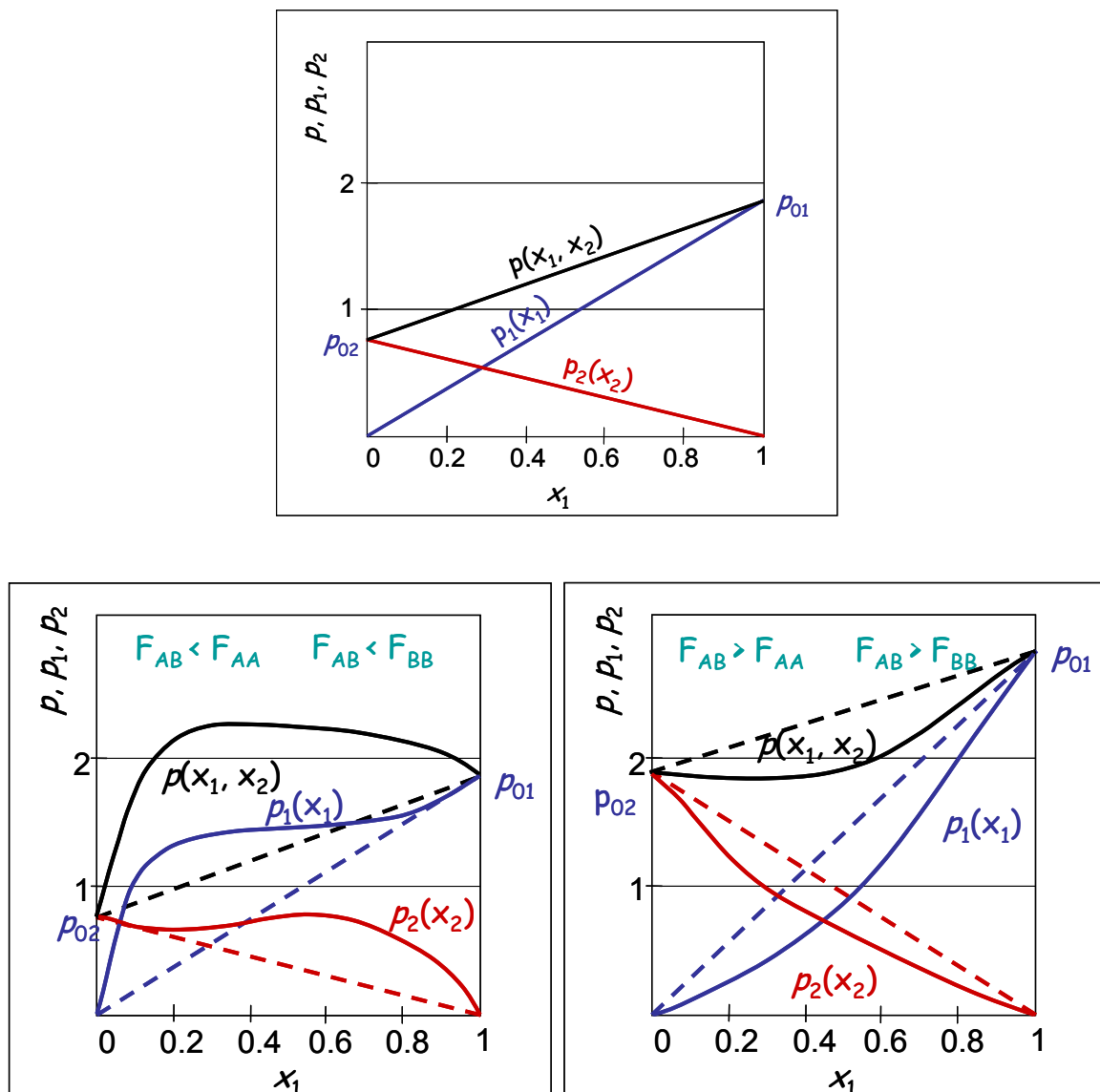
Slika 6.7. Heterogeni azeotrop

Ravnuteža para-kapljevina prikazuje se i dijagramima tlaka (slika 6.8.). Ovisno o mješljivosti i rezultatu miješanja (volumen, toplina) postoje idealne i realne smjese. U idealnim se smjesama komponente miješaju u bilo kojem molnom omjeru, a tijekom miješanja ne razvija se toplina. Tada vrijedi Raoultov zakon:

Parcijalni tlak komponente i (p_i) u parnoj fazi u ravnoteži proporcionalan je molnom udjelu te komponente u kapljevinu, x_i :

$$y_i \cdot P = p_i = p_{0,i} \cdot x_i \quad (6.2.)$$

U realnim smjesama privlačne sile između različitih vrsta molekula su različite. Ako su privlačne sile između različitih vrsta molekula manje od privlačnih sila između sličnih molekula, molekule se u smjesi drži zajedno slabijim silama od onih za čistu kapljevину, pa tijekom miješanja dolazi do endotermne ekspanzije volumena i povišenja tlaka para \rightarrow pozitivna devijacija od Raoultovog zakona. Dijagram tlaka će pokazati maksimalni tlak para, a dijagram vrelišta će imati minimalno vrelište. Ako su privlačne sile između različitih vrsta molekula veće od privlačnih sila između sličnih molekula, molekule se u smjesi drži zajedno jačim silama od onih za čistu kapljevину, pa tijekom miješanja dolazi do egzotermne kontrakcije volumena i povišenja temperature vrelišta \rightarrow negativna devijacija od Raoultovog zakona. Dijagram tlaka će pokazati minimalni tlak para, a dijagram vrelišta će imati maksimalno vrelište. Kod destilacije je radni tlak 0,05-5 bar, pa se kapljevina promatra kao realna a plin kao idealni.



Slika 6.8. Dijagrami tlaka za idealnu i realne smjese

Na proces destilacije utječe radni tlak – sniženjem tlaka za isti sastav kapljevine, udio komponente u pari će se povećati. To znači da će separacija biti djelotvornija ako se radi pri sniženim tlakovima.

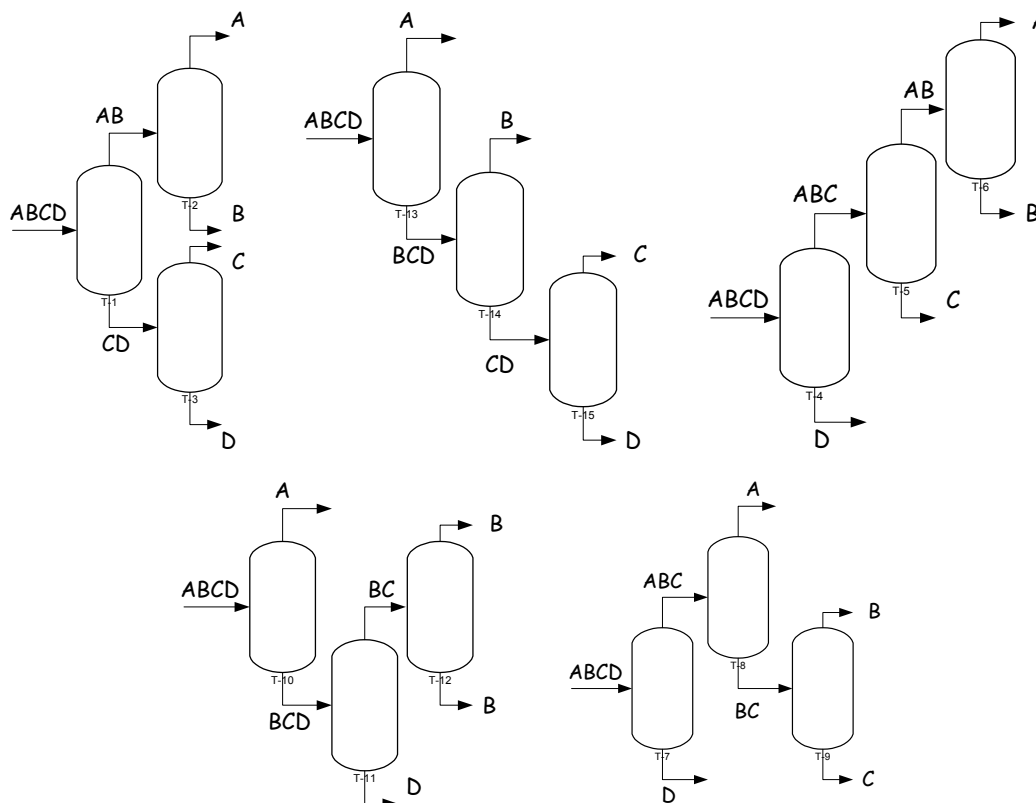
6.4. Destilacijske kolone

Postoji mnogo različitih izvedbi destilacijskih kolona od kojih je svaka projektirana za specifičnu separaciju (različita složenost). Jedan od načina podjele kolona je način na koji rade. Tako postoje šaržne i kontinuirane kolone. U šaržne se kolone pojenje unese u kolonu a zatim se provede destilacija. Nakon što je postignuta željena separacije u kolonu se unosi nova količina pojne smjese. U kontinuiranim se kolonama razdvaja kontinuirana struja pojenja bez prekida rada, osim ako nema problema u radu kolone. Destilat i donji produkt također se kontinuirano odvođe iz kolone. Takve kolone mogu raditi sa velikim protocima. Kontinuirane se kolone dalje klasificiraju obzirom na vrstu pojenja, prema broju produkata, da li se u kolonu dodaje pomoćna komponenta, te obzirom na izvedbu unutrašnjosti kolone. Sažeti prikaz navedenih klasifikacija prikazan je u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Klasifikacija kontinuiranih kolona

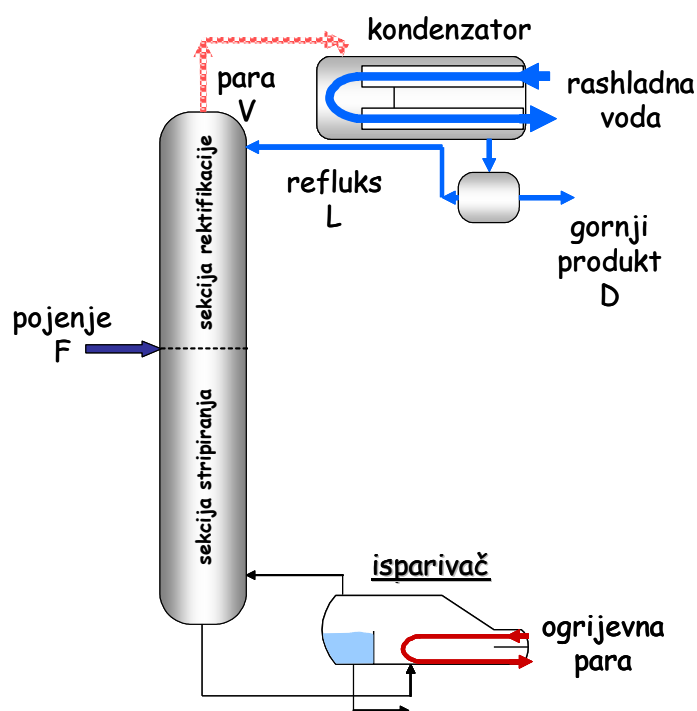
OBZIROM NA VRSTU POJENJA	dvokomponentne smjese višekomponentne smjese
PREMA BROJU PRODUKATA	dva produkta više od dvije izlazne struje
RAD UZ POMOĆNU KOMPONENTU	ekstraktivna destilacija azeotropna destilacija
IZVEDBA UNUTRAŠNJOSTI KOLONE	<u>kolone s pliticama</u> plitice različitih izvedbi služe za zadržavanje kapljevine kako bi se osigurao bolji kontakt između pare i kapljevine, odnosno bolja separacija <u>kolone s punilima</u> punila (nasipna ili strukturirana) poboljšavaju međufazni kontakt

Dvkomponentna smjesa se teoretski može u potpunosti separirati u jednoj koloni. Kako raste broj komponenata u smjesi potreban je sve veći broj kolona za dobivanje relativno čistih faza. Tako na primjer za separaciju trokomponentnih smjesa potrebne su dvije kolone, a četverokomponentnih smjesa tri (na pet različitih načina prikazanih na slici 6.9.). U slučaju većeg broja produkata kod razdvajanja višekomponentnih smjesa, potreban je veći broj izlaznih struja smještenih prema željenom sastavu po visini kolone.



Slika 6.9. Separacija četverokomponentnih smjesa

Destilacijske se kolone sastoje od nekoliko dijelova koje služe za prijenos topline ili poboljšanje procesa prijenosa tvari (slika 6.10.).



Slika 6.10. Destilacijska kolona

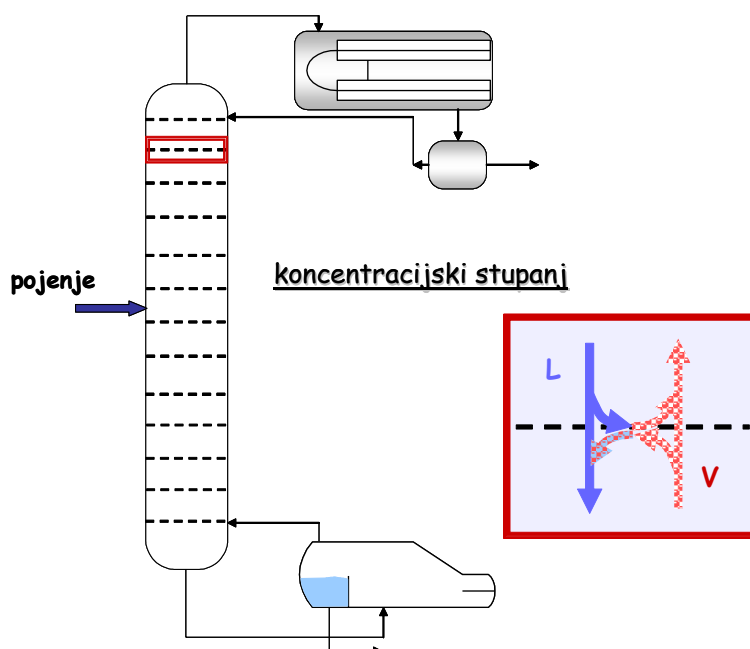
Osnovne komponente su:

- vertikalno cilindrično tijelo u kojem se odvija separacija komponenti
- unutrašnjih dijelova (pliticice/tavani ili punila) koji poboljšavaju proces separacije komponenti
- isparivač koji osigurava isparavanje kapljevine
- kondenzator za kondenzaciju gornjeg produkta
- posuda u kojoj se zadržava kondenzirana para sa vrha kolone kako bi se dio mogao vraćati natrag u kolonu kao refluks

Pojna smjesa, F , koju je potrebno separirati uvodi se u kolonu na mjestu ovisnom o stanju pojne smjese (od pothlađene kapljevine do pregrijane pare). Mjesto na kojem se u kolonu uvodi pojna smjesa dijeli kolonu na dva dijela: sekciju rektifikacije i sekciju stripiranja. U sekciji rektifikacije (pojačavanja) koncentracija lakše hlapive komponente raste, dok u sekciji stripiranja (istjerivanja) koncentracija teže hlapive komponente raste. Iz kolone se odvođe gornji produkt (destilat) koji je bogatiji na lakše hlapivoj komponenti, te donji produkt koji je bogatiji na teže hlapivoj komponenti. Kolone uglavnom rade uz definirani reflukсни omjer. Reflukсни se omjer definira kao omjer količine destilata koji se vraća natrag u kolonu (reflusk) i količine destilata koji se odvođi kao gornji produkt.

$$R = \frac{L}{D} \quad (6.3.)$$

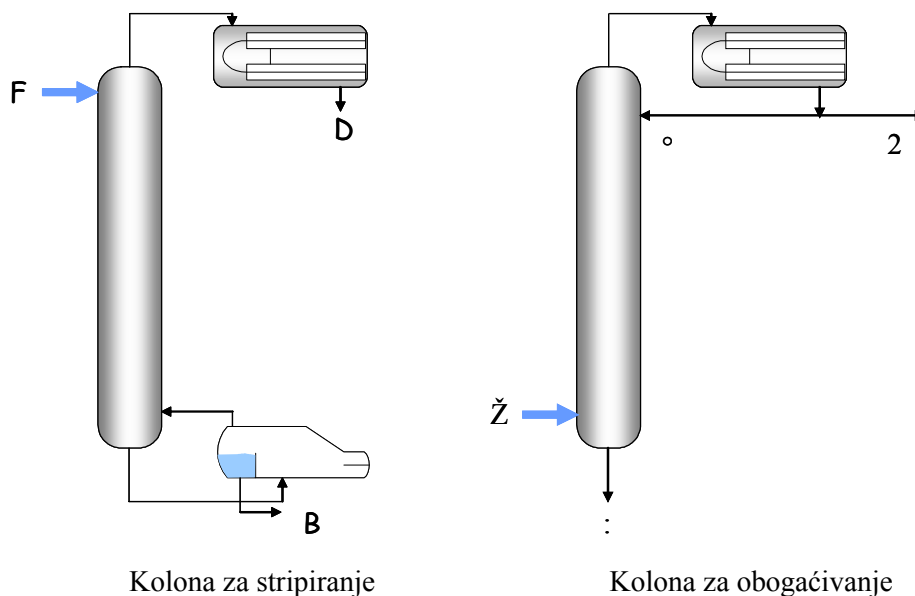
Kolone rade uz reflusk kako bi se osigurala željena separacija. Povratom dijela gornjeg produkta omogućava se uklanjanje preostale količine teže hlapive komponente iz parne faze koja izlazi na vrhu kolone.



Slika 6.11. Koncentracijski stupnjevi u koloni

Kolona je podijeljena na određeni broj koncentracijskih stupnjeva (slika 6.11.). Ako se radi o koloni s pliticama (tavanima) onda broj pliticica predstavlja broj koncentracijskih stupnjeva. Ukoliko je kolona

ispunjena nasipnim ili strukturiranim punilima, potrebno je odrediti koji dio kolone odgovara jednom koncentracijskom stupnju. Prema definiciji, jedan koncentracijski stupanj je dio kolone u kojem se smatra da je postignuto ravnotežno stanje. Obzirom da u realnim uvjetima nije moguće postići ravnotežno stanje (kolone rade u stacionarnom režimu), ova definicija obuhvaća teoretski, odnosno idealni koncentracijski stupanj. Stvaran broj koncentracijskih stupnjeva potrebnih za željenu separaciju uvijek će biti veći od teoretskog, što će ovisiti o djelotvornosti plitica odnosno punila, te radnim uvjetima.



Slika 6.12. Uvođenje pojne smjese na vrhu odnosno dnu kolone

Ovisno o svojstvima pojne smjese postoje dva karakteristična slučaja prikazana na slici 6.12. Ako je potrebna dobra čistoća donjeg produkta uz male količine gornjeg produkta i male protoke, pojna se smjesa uvodi na vrhu kolone. Broj koncentracijskih stupnjeva je fiksiran pa su radni parametri: temperatura donjeg produkta i količina ogrjevne pare. Ako je pojenje zasićena para s malom količinom kapljevine, te je potrebna dobra čistoća gornjeg produkta uz mali protok pojna se smjesa uvodi na dnu kolone. Obzirom da je pojenje zasićena para koja nosi dovoljnu količinu topline, ovakva izvedba ne zahtjeva isparivač na dnu kolone. I ovdje je broj koncentracijskih stupnjeva fiksiran pa je jedini radni parametar refluks.

6.4.1. Izvedba unutrašnjosti kolone

Kako bi se poboljšao kontakt između parne i kapljevite faze unutrašnjost kolone ispunjena je pliticama ili punilima koja mogu biti nasipna ili strukturirana (slika 6.13.). Plitice su pričvršćene za tijelo kolone, a ako je kolona ispunjena nasipnim punilima mora imati i nosače punila. U svrhu jednolike raspodjele parne i kapljevite faze po cijelom poprečnom presjeku kolone ugrađuju se raspodjelnici

faza, a da bi se spriječilo odnošenje kapljica sa parnom fazom na vrhu je smješten i odstranjivač kapljica.



Slika 6.13. Izvedba unutrašnjosti kolone

U tablici 6.2. dane su osnovne smjernice za odabir plitica ili punila.

Tablica 6.2. Odabir plitica ili punila

PLITICE	PUNILA
Komponente sadrže krutinu ili nečistoću	Toplinski osjetljive komponente
Velika količina kapljevite faze	Kada je bitan pad tlaka (vakuum)
Veliki protoci zahtijevaju veliki promjer kolone	Mali protoci kapljevite faze
Stjenke kolone treba povremeno pregledati	Mali promjer kolone
Varijacije u protocima faza	Za korozivne sustave (npr. Plastična punila)
	Za sustave sklone nastajanju pjene
	Kada je omjer promjera kolone i nasipnog punila veći od 10

Mnogi faktori utječu na odabir načina povećanja međufazne površine. Najznačajniji faktori su:

- djelotvornost, separacijski efekt (HTU, NTU)
- mogućnost opterećenja, interval opterećenja (najveća i najmanja dozvoljena brzina pare, gustoća refluksa)

- pad tlaka, ekvivalentni pad tlaka za teoretski stupanj
- fleksibilnost prema protocima
- osjetljivost na naslage
- mogućnost proizvodnje od materijala otpornih na različite smjese
- prihvatljiva cijena kolone

6.4.1.1. Plitice

Plitice su horizontalne ravne ploče određene geometrije postavljene na definiranoj udaljenosti jedna od druge unutar kolone. Sastoje se od dva dijela: mjesto dodira faza i mjesto separacije faza. Klasifikacija plitica se osniva na vrsti plitica, vrsti i broju mjesta separacije faza, smjer i put strujanja kapljevine u dodirnoj zoni, smjeru strujanja pare preko plitice, prisustvo razbijača, punila i ostalih dijelova koji poboljšavaju kontakt između faza a time i separaciju faza. Način strujanja faza je kontroliran. Kapljevina struji preko plitice prema dolje a para se diže, tako da struje u suprotnim smjerovima.

Dizajn plitica

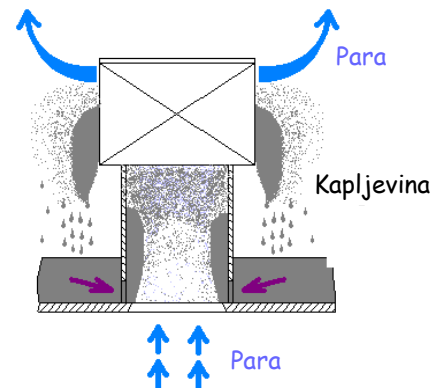
Svaka se plitica ponaša kao mala kolona u kojoj se odvija jedan dio separacije. Dakle što je više plitica bolji je stupanj separacije a ukupna djelotvornost će ovisiti o dizajnu plitica. Plitice su izvedene tako da poboljšaju kontakt pare i kapljevine uzimajući u obzir raspodjelu kapljevine i pare na plitici. Što je bolji međusobni kontakt pare i kapljevine, bolja je separacija na svakoj plitici i ukupnoj koloni. To znači da će biti potrebno manje plitica za isti stupanj separacije (manja potrošnja energije i troškovi).

Osnovna podjela obzirom na dizajn plitica:

- plitice sa otvorima ili razrezima
 - sitaste, rešetkaste
- plitice kod kojih para struji kroz cilindrične otvore sa zvonima, poklopcima zaronjenim u kapljevini
 - s poklopcima, s poprečnim tokom, Thormannm Streuber
- plitice s razrezanim otvorima prekrivenim prilagodljivim ventilima
 - Glitsch, Stahl, Koch
- posebno dizajnirane plitice
 - s perforiranim ventilima, Kittel, s mlaznicama

Plitice s poklopcima

Na svaki je otvor postavljen cilindar sa poklopcem koji dozvoljava prolazak pare (slika 6.14.). Para struji kroz cilindar prema gore a poklopac ju usmjerava prema dolje, te prolazi kroz pukotine na poklopcu i u mjehurićima prolazi kroz kapljevini na plitici.



Slika 6.14. Plitice s poklopcima

Plitice s ventilima

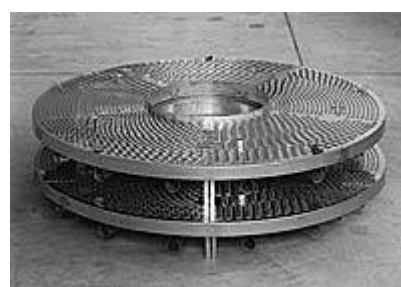
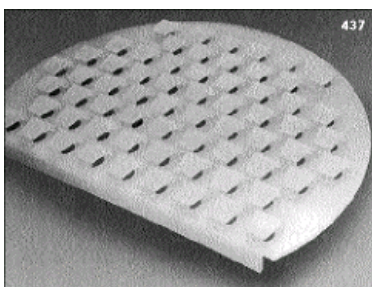
Kod ovakvih plitica perforacije su prekrivene pomičnim poklopcima (slika 6.15.). Para podiže poklopce i time si otvara put strujanja. Poklopci usmjeravaju paru tako da horizontalno nastruji u kapljeviniu čime je osigurano dobro miješanje (znatno bolje nego kod sitastih plitica).



Slika 6.15. Plitice s ventilima

Sitaste plitice

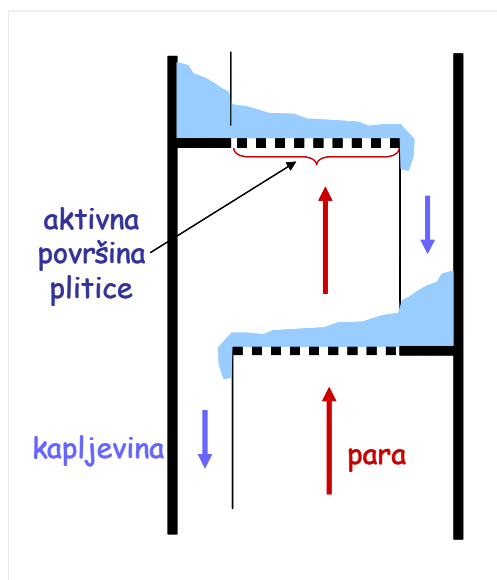
To su jednostavne metalne perforirane ploče, kod kojih para prolazi ravno prema gore kroz kapljeviniu koja se nalazi na plitici (slika 6.16.). Položaj, broj i veličina rupica su parametri koji se dizajniraju. Djelotvornost im je visoka, pa su zajedno sa pliticama sa ventilima mnogo češće u upotrebi od plitica s poklopcima.



Slika 6.16. Sitaste plitice

Tokovi pare i kapljevine

Na slici 6.17. prikazani su tokovi obje faze kroz kolonu preko plitica. Svaka plitica ima dva prolaza. Kapljevina silaznicama pod utjecajem gravitacije struji prema dolje s jedne plitice na drugu. Brana osigurava da je uvijek nešto kapljevine na plitici i dizajnirana je tako da su npr. poklopci prekriveni kapljevnom. Obzirom da je lakša, para struji prema gore i prisilno prolazi kroz kapljevnu kroz otvore na pliticama.



Slika 6.17. Tokovi faza preko plitica

Kako vruća para prolazi kroz kapljevnu na plitici ona kapljevni predaje toplinu pri čemu se dio pare kondenzira. Kondenzat je bogatiji na teže hlapivoj komponenti nego što je u pari. Zbog dovedene topline kapljevina na plitici vrije i proizvodi paru koja se podiže prema sljedećoj plitici i ona je bogatija na lakše hlapivoj komponenti. Takav kontinuirani kontakt pare i kapljevine odvija se na svakoj plitici, a rezultira separacijom komponenti različitih temperatura vrelišta.

Radni interval kolone s pliticama

Radni je interval ograničen vrstom i geometrijom plitica i svojstvima faza u kontaktu. Ograničen je minimalnim i maksimalnim protocima pare i kapljevine kroz kolonu. Izvan granica protoka znatno opada efikasnost kolone. Ako je protok pare premalen raspodjela pare po poprečnom presjeku je neujednačena pa se kapljevina cijedi. Isti je slučaj ako je protok kapljevine premali. Rezultat će biti nejednolika raspodjela kapljevine po poprečnom presjeku kolone, odnosno cijela plitica neće biti prekrivena kapljevnom fazom. S druge strane pri prevelikim protocima pare kapljevina, koja sadrži veću količinu teže hlapive komponente, biva odnesena na gornju pliticu čime se kviri sastav pare (smanjuje se udio lakše hlapive komponente). Osim toga može doći do potapanja kolone. Pri tome preveliki protok pare priječi strujanje kapljevine prema dolje. Ako je protok kapljevine prevelik, ona

se prekratko vrijeme zadržava na pojedinoj plitici te ne dolazi do mogućeg prijenosa tvari. U pravilu, veći protoci pare zahtijevaju veći razmak između plitica.

Parametri značajni za dizajn i rad kolone s pliticama su efikasnost plitice u radnom području, ograničavajući protoci pare te pad tlaka na plitici. Smanjenje potrebne energije osigurava se radom pri minimalnom padu tlaka na plitici i uz minimalni protok pare.

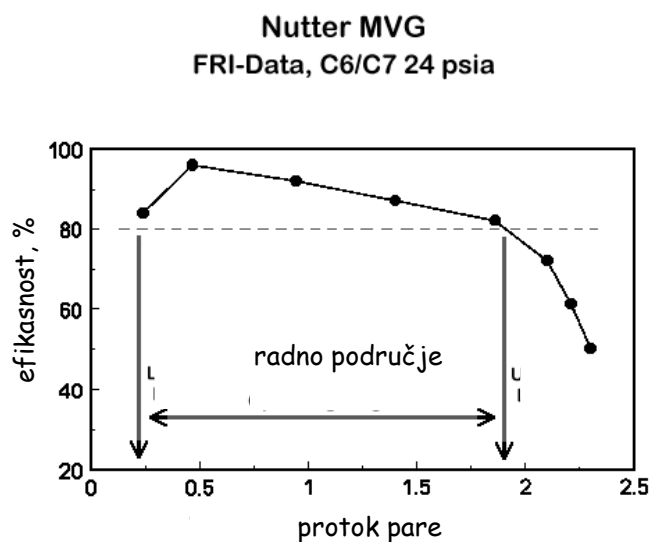
Efikasnost plitice definira se obzirom na paru jer se u njoj nalaze glavni otpori prijenosu tvari. Uobičajeno je efikasnost izraziti kao lokalnu, Murphreeovu ili Colburneovu.

$$\text{Lokalna efikasnost: } E_V = \frac{y - y_{n-1}}{y^*(x) - y_{n-1}} \quad (6.4.)$$

$$\text{Murphreeova efikasnost: } E_{V,M} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y^*(x_n) - y_{n-1}} \quad (6.5.)$$

$$\text{Colburneova efikasnost: } E_{V,m}^* = \frac{E_{V,m}}{1 + \frac{D}{L} \cdot E_{V,m}} \quad (6.6.)$$

Najznačajniji parametar za dizajn je stupanj separacije. Krivulja efikasnosti plitice ovisno o protoku pare definira rad kolone (slika 6.18.). Općenito, ako je efikasnost plitica veća od 80 %, plitica osigurava željenu separaciju.



Slika 6.18. Radni interval plitice

Pad tlaka kroz kolonu

Ukupni pad tlaka kroz kolonu računa se prema:

$$P_{dno} = P_{vrh} + \Delta p_g = P_h + N_p \cdot \Delta p \quad (6.7.)$$

pad tlaka plitice:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_\sigma + \Delta p_{st} \quad (6.8.)$$

zbog trenja (suhi)

$$\Delta p_t = c_w \cdot \frac{v_V^2 \cdot \rho_V}{2} \quad (6.9.)$$

zbog nastajanja mjehurića:

$$\Delta p_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma_L}{d_b} \quad (6.10.)$$

hidrostatski:

$$\Delta p_{st} = \rho_{LV} \cdot g \cdot h_s = \rho_L \cdot g \cdot h_L \quad (6.11.)$$

6.4.1.2. Punila (pakovanja)

Punila omogućavaju bolji kontakt između faza, osiguravaju povećanje međufazne površine a time efikasniji prijenos topline i tvari. Nasipna punila su različitih jednostavnih geometrijskih oblika i mogu biti napravljena od različitih materijala ovisno o svojstvima sustava (čelik, bakar, ugljen, porculan, staklo, plastika). Ne izazivaju velik pad tlaka što bi značilo velik utrošak energije potrebne za strujanje pare u koloni. Osim za destilaciju koriste i za čišćenje plinova, apsorpciju, isparavanje i ekstrakciju.



Slika 6.19. Nasipna i strukturirana punila

Mogu biti nasipna i strukturirana (slika 6.19.). Zbog gravitacije kapljevina struji prema dolje i na punilu tvori tanki film preko kojeg struji plin. Kapljevina mora biti ravnomjerno raspodijeljena i osigurati potpuno mokra punila što se postiže (na početku procesa) potapanjem kolone. Poroznost sloja je veća uz rub nego u središtu pa teži strujati uz stjenku.

Nasipna punila koriste se za kolone manjeg promjera. Podnose velika specifična opterećenja, osiguravaju visoku djelotvornost separacije uz nisku cijenu.

Strukturirana punila su pogodna za rad pod vakuumom. Podnose još veća opterećenja uz manji pad tlaka (odnosno gubitke). Djelotvornost separacije je veća, ali su i skuplja od nasipnih punila.

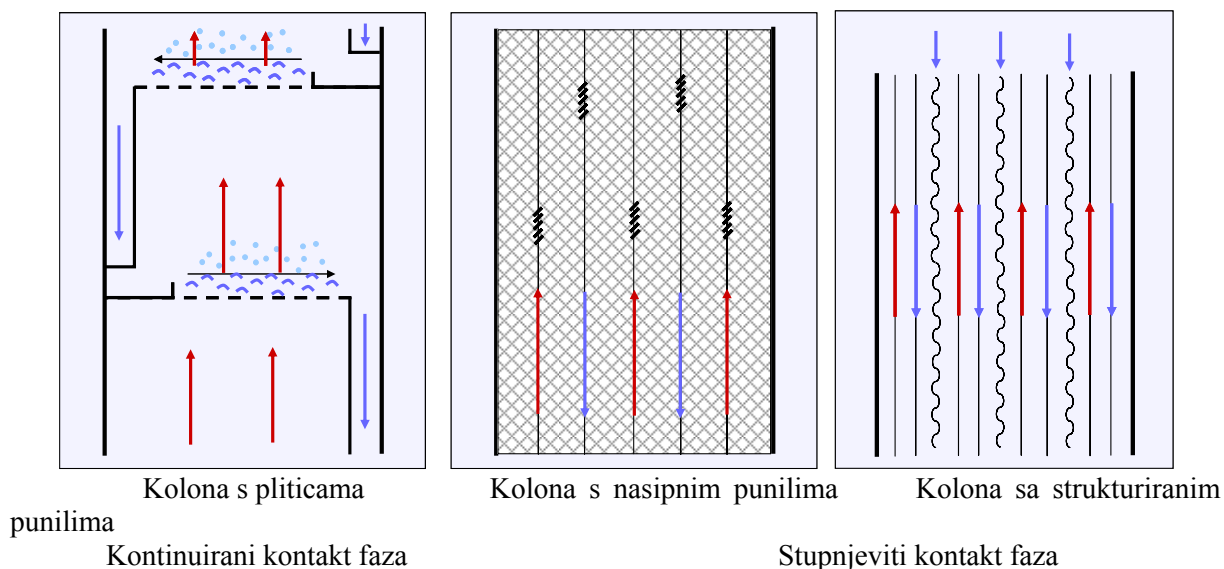
Radni uvjeti

Definirani su vrstom i geometrijom punila te svojstvima faza i njihovim protocima. Gornja granica protoka vezana je uz protok pare a donja uz protok kapljevine. Pri prevelikim protocima pare može doći do potapanja kolone ili do fluidizacije punila. Premali protok kapljevine neće osigurati svu raspoloživu međufaznu površinu jer će punila biti djelomično suha.

Separacijski efekt definiran je visinom jedinice prijenosa koja odgovara teoretskom separacijskom stupnju ili plitici. Ovisi o vrsti, dimenzijama punila, svojstvima faza (gustoća, viskoznost, površinska napetost), radnom tlaku te protocima faza.

Ako se sad na kraju usporede plitice i punila, može se zaključiti da je djelotvornost kolone s punilima istog promjera kao i kolona s pliticama veća obzirom da punila osiguravaju dodatnu međufaznu površinu. Visina kolona s punilima je stoga manja, a manji je i promjer kolone.

Obzirom na načina na koji para i kapljevina dolaze u kontakt kolone sa punilima nazivaju se **kolone sa kontinuiranim kontaktom** jer faze kontinuirano struje. S druge strane kolone sa pliticama nazivaju se **kolone sa stupnjevitim kontaktom** jer se separacija odvija na svakoj plitici prije prelaska na sljedeću. Na slici 6.20. prikazani su shematski načini kontaktiranja faza u destilacijskim kolonama.



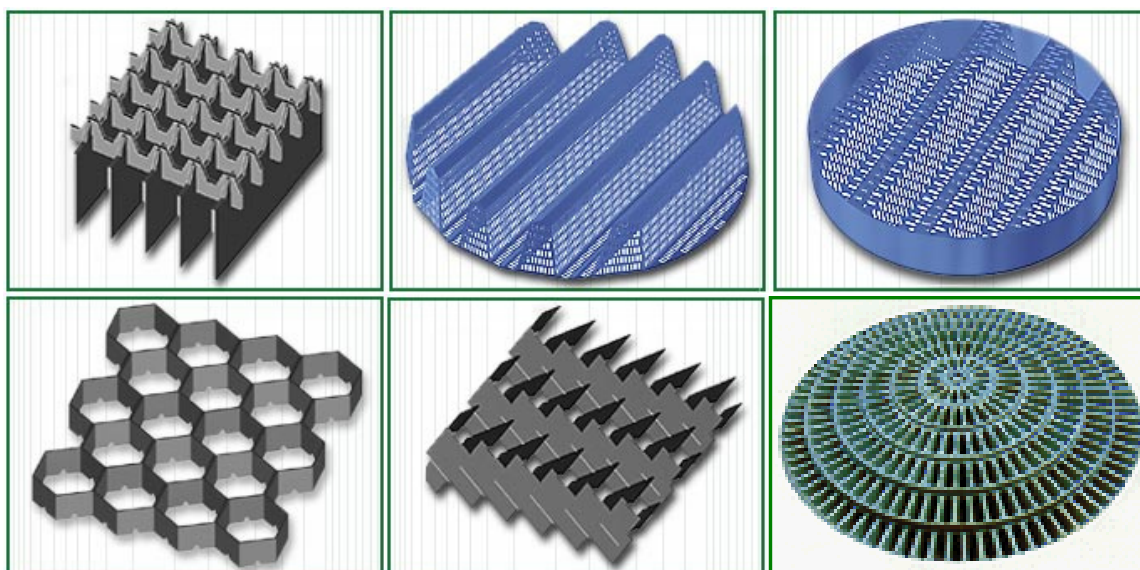
Slika 6.20. Načini kontaktiranja faza u destilacijskim kolonama

6.4.1.3. Ostali dijelovi kolona

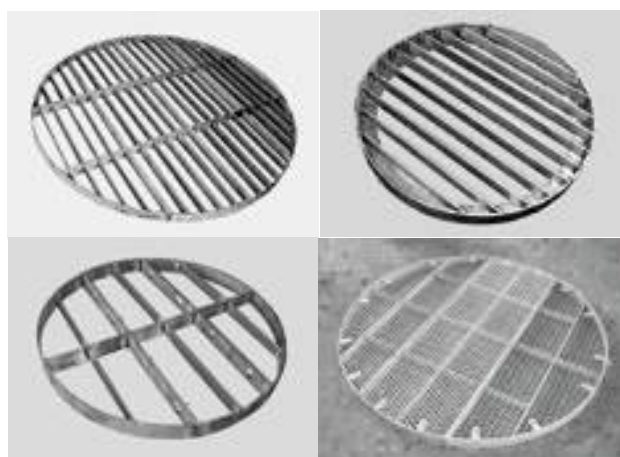
Nosač nasipnih i strukturiranih punila

Kako bi punila stajala u koloni ispod njih mora biti postavljen nosač punila. Nosač mora osigurati strujanje obje faze pri čemu ne smije pružati prevelik otpor strujanju. Loši hidrodinamički uvjeti rezultirati će smanjenom djelotvornosti procesa prijenosa topline i tvari. Težina nosača mora biti mala, te se moraju jednostavno instalirati u kolonu. Izvedeni su od različitih materijala otpornih na koroziju.

Često se koriste perforirane i naborane plitice čiji je osnovni nedostatak mala slobodna površina i velika težina. Nosači su različiti ovisno da li nose strukturirana ili nasipna punila (slika 6.21. i 6.22.)

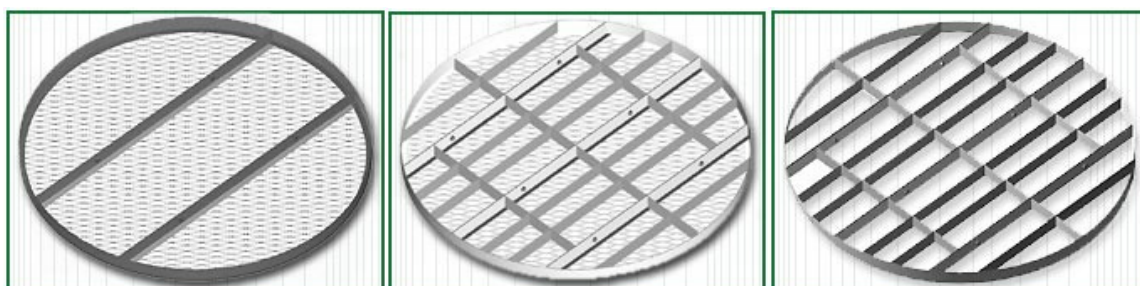


Slika 6.21. Nosači nasipnih punila



Slika 6.22. Nosači strukturiranih punila

Plitica za zadržavanje nasipnih punila

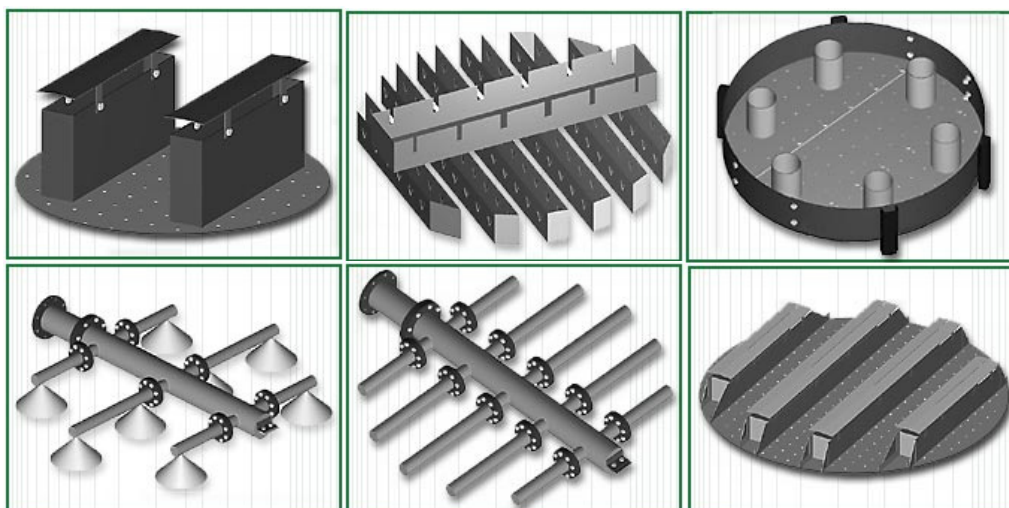


Slika 6.23. Plitica za zadržavanje nasipnih punila

Ugrađuje se na vrhu kolone u svrhu sprječavanja odnošenja nasipnog punila iz kolone pomoću pare (slika 6.23.). Kao i nosači punila ne smije pružati veliki otpor strujanju odnosno mora biti propusna za tokove faza.

Raspodjelnik kapljevine

Djelotvornost punila ovisi o jednolikoj raspodjeli kapljevine koja se osigurava odgovarajućim raspodjelnicima (slika 6.24.). Kriterij za odabir su protok i svojstva kapljevine (naslage, nastajanje pjene, gustoća, viskoznost, površinska napetost).Točke distribucije moraju biti jednoliko raspodijeljene po poprečnom presjeku. Raspodjelnik ne smije pružati velik otpor strujanju. Izvedeni su od različitih materijala. Ako su plastični bitan je sastav kapljevine i temperatura. Ukoliko pojenje sadrži čestice male rupice se mogu začepiti.



Slika 6.24. Raspodjelnici kapljevine

Raspodjelnik pare

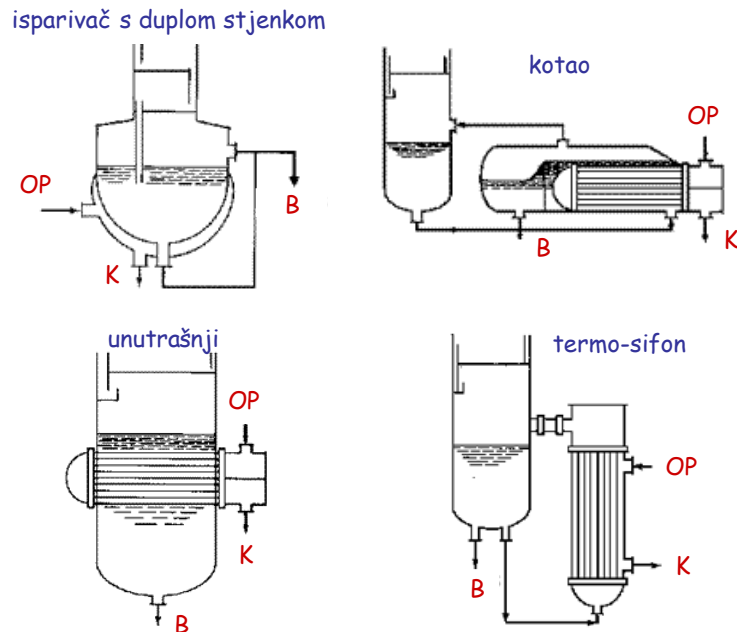
Za djelotvoran proces prijenosa tvari neophodna je jednolika raspodjela plina po poprečnom presjeku kolone. To je od osobitog značaja za male i velike protoke plina te velike promjere kolone. Raspodjelnik (slika 6.25.) mora osigurati jednoliku raspodjelu uz mali pad tlaka. Naime, jednolika raspodjela smanjuje opasnost od potapanja kolone i odnošenja kapljica.



Slika 6.25. Raspodjelnici pare

Isparivači

Postoji velik broj različitih vrsta isparivača koji se koriste. isparivači se mogu promatrati kao izmjenjivači topline koji moraju dovesti dovoljnu količinu topline da bi kapljevina na dnu kolone dosegla temperaturu vrelišta. Najčešće se koriste isparivači sa dvostrukom stjenkom, kotao, unutrašnji isparivač i termo-sifon (slika 6.26.).



Slika 6.26. Isparivači

Kondenzatori

Uglavnom se koriste izmjenjivači topline sa snopom cijevi (slika 6.27.) Ukoliko je potrebno kondenzirati velike količine destilata, velika površina izmjene topline rezultira velikim izmjenjivačem topline (zauzima mnogo prostora)

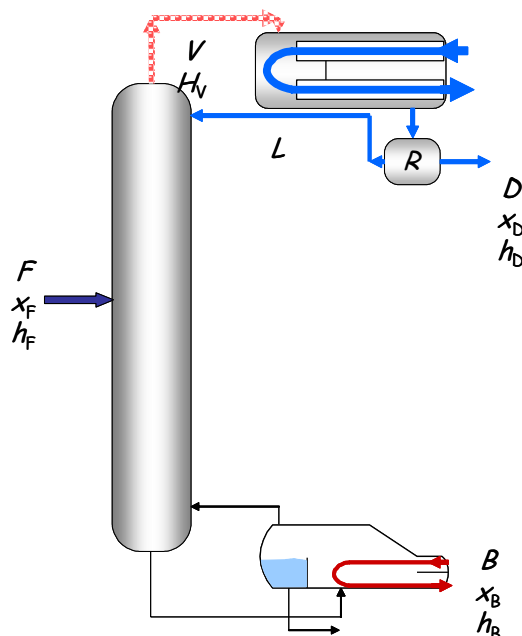


Slika 6.27. Kondenzator

6.5. Kontinuirana kolonska destilacija

Kapljevita smjesa se kontinuirano uvodi u kolonu a dobiveni se produkti također kontinuirano odvođe. Radni uvjeti i dimenzije kolone odabrani su tako da osiguravaju željenu kvalitetu i čistoću produkata.

6.5.1. Bilance tvari i topline



Slika 6.28. Kontinuirana kolonska destilacija

Na slici 6.28. oznake predstavljaju:

F – protok pojne smjese, mol/s

D – protok destilata (gornji produkt), mol/s

B – protok donjeg produkta, mol/s

x_F – molni udio LHK u pojenju

x_D – molni udio LHK u destilatu

x_B – molni udio LHK u donjem produktu

h_F, h_D, h_B – molarne entalpije pojedinih struja

Bilanca tvari

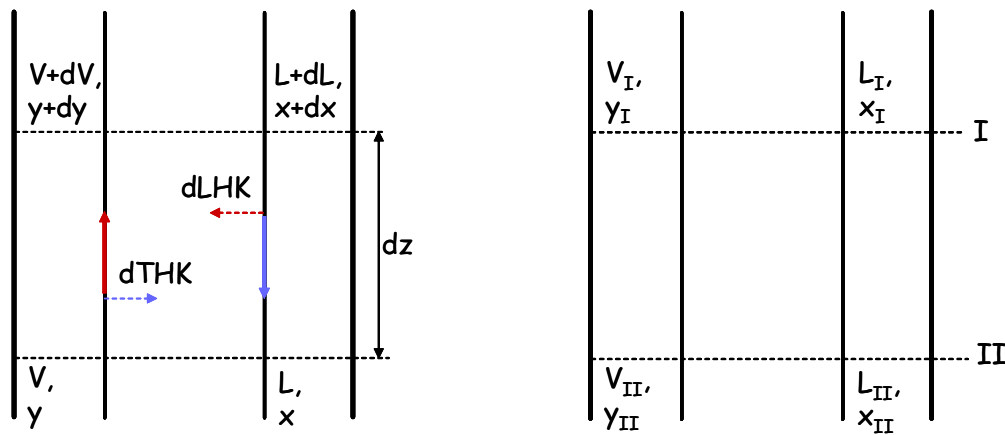
$$\text{Ukupna: } F = D + B \quad (6.12.)$$

$$\text{Za LHK: } F \cdot x_F = D \cdot x_D + B \cdot x_B \quad (6.13.)$$

Sada su količine destilata i donjeg produkta:

$$D = F \cdot \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \quad (6.14.)$$

$$B = F \cdot \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad (6.15.)$$



Slika 6.29. Unutrašnji protoci u koloni

Uz poznate protoke pare, V , i kapljevine, L , mogu se izračunati unutrašnji protoci za bilo koji poprečni presjek kolone koja radi adijabatski (slika 5.26.). U dio kolone omeđen oznakama I i II ulaze para V_{II} (sa donjeg koncentracijskog stupnja) i kapljevine L_I (sa gornjeg koncentracijskog stupnja). Istovremeno taj dio kolone napuštaju para V_I (struji prema gore) i kapljevine L_{II} (slijeva se prema dolje).

$$\text{Ukupna bilanca:} \quad V_{II} + L_I = V_I + L_{II} \quad (6.16.)$$

$$\text{Za LHK:} \quad V_{II} \cdot y_{II} + L_I \cdot x_I = V_I \cdot y_I + L_{II} \cdot x_{II} \quad (6.17.)$$

Potrebna toplina

Bilanca topline dana je sljedećim izrazom:

$$Q_{isp} + F \cdot h_F = Q_{kond} + B \cdot h_B + D \cdot h_D + Q_{gubitaka} \quad (6.18.)$$

Toplina koju isparivač mora dovesti u sustav računa se iz bilancne jednadžbe:

$$Q_{isp} = Q_{kond} + B \cdot h_B + D \cdot h_D + Q_{gubitaka} - F \cdot h_F \quad (6.19.)$$

Uz poznati refluksni omjer može se izračunati koju količinu topline mora odvesti kondenzator. Na vrhu kolone izlazi para koja onda ulazi u kondenzator gdje se kondenzira te se dio vraća u kolonu a dio odvodi kao destilat iz kolone. Toplina kondenzacije računa se prema:

$$Q_{kond} = V \cdot \lambda = (D + L) \cdot \lambda \quad (6.20.)$$

Ako se brojnik i nazivnik podijele sa D , dobiva se:

$$Q_{kond} = D \cdot (R + 1) \cdot \lambda \quad (6.21.)$$

6.5.2. Jednadžbe radnih pravaca

Obzirom da pojenje dijeli kolonu na dva dijela, postoje dva radna pravca. Jedan opisuje sekciju rektifikacije, a drugi sekciju stripiranja. Do jednadžbi radnih pravaca dolazi se postavljanjem bilanci tvari oko vrha, odnosno dna kolone (slika 6.30.).

Gornji radni pravac

$$\text{Ukupna bilanca:} \quad V_n = L_{n-1} + D \quad (6.28.)$$

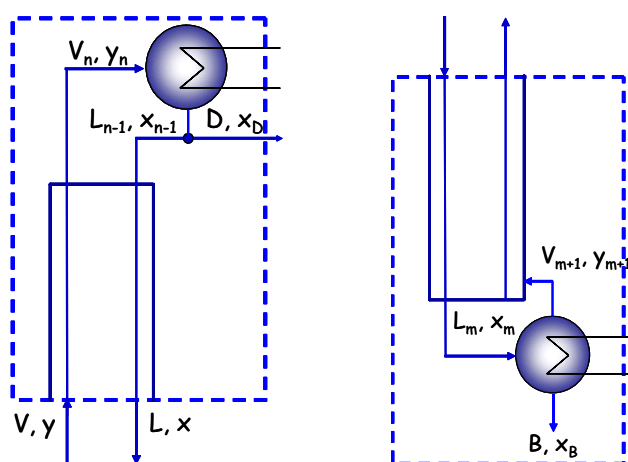
$$\text{Za LHK:} \quad V_n \cdot y_n = L_{n-1} \cdot x_{n-1} + D \cdot x_D \quad (6.29.)$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se jednadžba gornjeg radnog pravca:

$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} \cdot x_{n-1} + \frac{D}{V_n} \cdot x_D \quad (6.30.)$$

Uvođenjem refluksnog omjera uzevši u obzir konstantnost molnih protoka kroz kolonu, te uz $V = D + L$ jednadžba poprima sljedeći oblik:

$$y_n = \frac{R}{R+1} \cdot x_{n-1} + \frac{x_D}{R+1} \quad (6.31.)$$



Slika 6.30. Uz bilance tvari oko vrha i dna kolone

Donji radni pravac

$$\text{Ukupna bilanca:} \quad L_m = V_{m+1} + B \quad (6.32.)$$

$$\text{Za LHK:} \quad L_m \cdot x_m = V_{m+1} \cdot y_{m+1} + B \cdot x_B \quad (6.33.)$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se jednadžba gornjeg radnog pravca:

$$y_m = \frac{R}{R-1} \cdot x_{m+1} - \frac{x_B}{R-1} \quad (6.34.)$$

6.5.3. Određivanje broja koncentracijskih (separacijskih) stupnjeva i visine kolone

Način određivanja ovisi o izvedbi unutrašnjosti kolone, odnosno da li se radi o koloni s pliticama ili koloni s punilima. Za kolonu s pliticama (ε – efikasnost plitice) udaljenim za Δz visina kolone jednaka je:

$$H = NTU_{st\ var\ ni} \cdot \Delta z = \frac{NTU_{teoretski}}{\varepsilon} \cdot \Delta z \quad (6.35.)$$

Za kolonu s nasipnim ili strukturiranim punilima:

$$H = NTU \cdot HTU \quad (6.36.)$$

Ovdje je HTU dio kolone čija visina odgovara jednom koncentracijskom stupnju, a NTU je broj koncentracijskih stupnjeva.

Određivanje broja teoretskih jedinica prijenosa

Prvi korak u projektiranju kolone je određivanje potrebnog broja separacijskih stupnjeva. Broj teoretskih jedinica prijenosa (koncentracijskih stupnjeva) može se odrediti:

- Grafički
 - McCabe-Thieleovom metodom
 - Ponchon-Savaritovom metodom
- Računski
 - Fenske-Underwood metoda
 - Gillilandova metoda

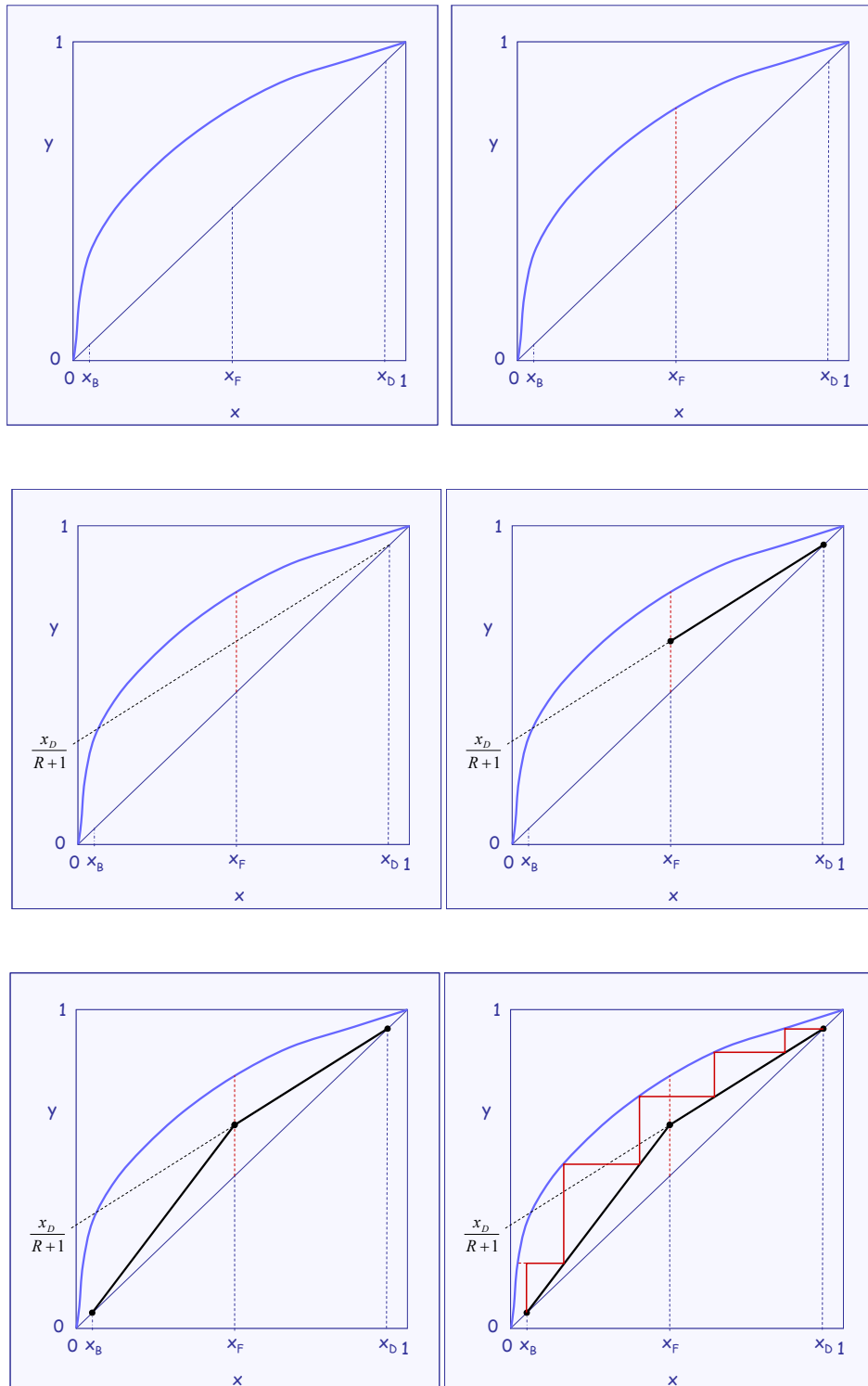
6.5.3.1. McCabe-Thieleova metoda

Koristi se za određivanje teoretskog broja koncentracijskih stupnjeva dvokomponentnih sustava. Osnovna pretpostavka metode je da je omjer protoka kapljevine i pare kroz kolonu je stalan u obje sekcije kolone → slične topline isparavanja obje prisutne komponente (za svaki mol teže hlapive komponente koja se iskondenzira, 1 mol lakše hlapive komponente ispari). To je jednostavan način testiranja različitih procesnih parametara na broj koncentracijskih stupnjeva potrebnih za željenu separaciju. Metoda je prikazana na slici 6.31. korak po korak.

U ravnotežni se dijagram prvo ucrtaju koncentracije pojne smjese, x_F , destilata, x_D , i donjeg produkta, x_B . Nakon toga se, ovisno o stanju pojne smjese ucrtava na mjestu ulaska pojne smjese u kolonu (sastav x_F) q-linija. Uz poznati refleksni omjer izračuna se nagib gornjeg radnog pravca $\left(\frac{x_D}{R+1}\right)$ i označi na

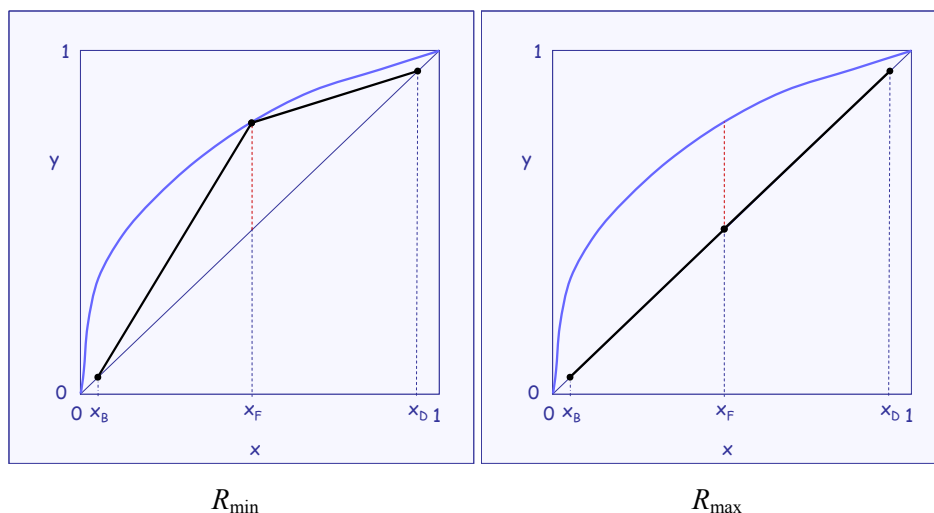
y-osi, te se kroz tu točku i mjesto gdje sastav destilata, x_D , siječe dijagonalu provuče pravac. Obzirom da gornji radni pravac opisuje dio kolone iznad mjesta pojenja, njemu odgovara dio ucrtanog pravca od točke ($x_D = y_D$) do presjecišta sa q-linijom (podebljani dio ucrtanog pravca). Donji se radni pravac jednostavno dobiva spajanjem točke gdje gornji radni pravac siječe q-liniju i točke gdje sastav donjeg produkta, x_B , siječe dijagonalu. Broj teoretskih koncentracijskih stupnjeva dobiva se ucrtavanjem pravokutnih trokuta između radnih pravaca i ravnotežne krivulje, počevši od vrha kolone, odnosno mjesta gdje sastav destilata siječe dijagonalu. Prema slici 6.31. pojna smjesa ulazi u kolonu na trećem koncentracijskom stupnju. Ukoliko se radi o koloni s pliticama, dobiveni broj stupnjeva se mora zaokružiti na prvi veći broj (prema slici NTU=5). Za kolonu s punilima ostavlja se NTU=4,75.

Da bi se dobio stvarno potreban broj koncentracijskih stupnjeva, potrebno dobiveni teoretski (postignuta ravnoteža na svakom koncentracijskom stupnju) broj koncentracijskih stupnjeva pomnožiti sa efikasnosti plitica ili punila.



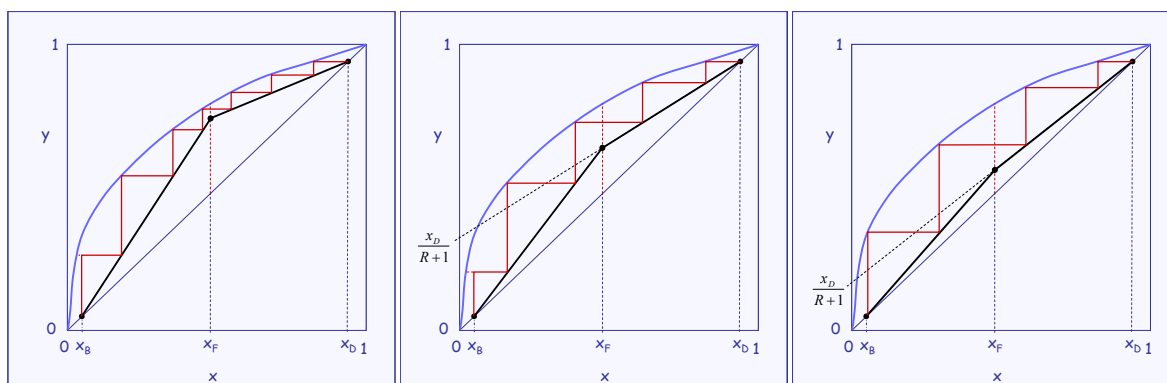
Slika 6.31. McCabe-Thileova metoda

Dva su granična teoretska slučaja između kojih se nalazi stvarni refluksni omjer, R_{\min} i R_{\max} (slika 6.32.). Za minimalni refluksni omjer radni se pravci sijeku na mjestu gdje q-linija siječe ravnotežnu krivulju. U tom slučaju broj potrebnih koncentracijskih stupnjeva za željenu separaciju teži u beskonačnost. Naime, nije moguće ucrtati konačan broj koncentracijskih stupnjeva kako se radni pravac približava ravnotežnoj krivulji. U slučaju totalnog refluksa, R_{\max} , dobiva se minimalan broj teoretskih koncentracijskih stupnjeva. Oba slučaja nemaju praktično značenje, jer bi rezultirali beskonačno visokom kolonom ili ne bi bilo gornjeg produkta (cijeli destilat se vraća u kolonu).

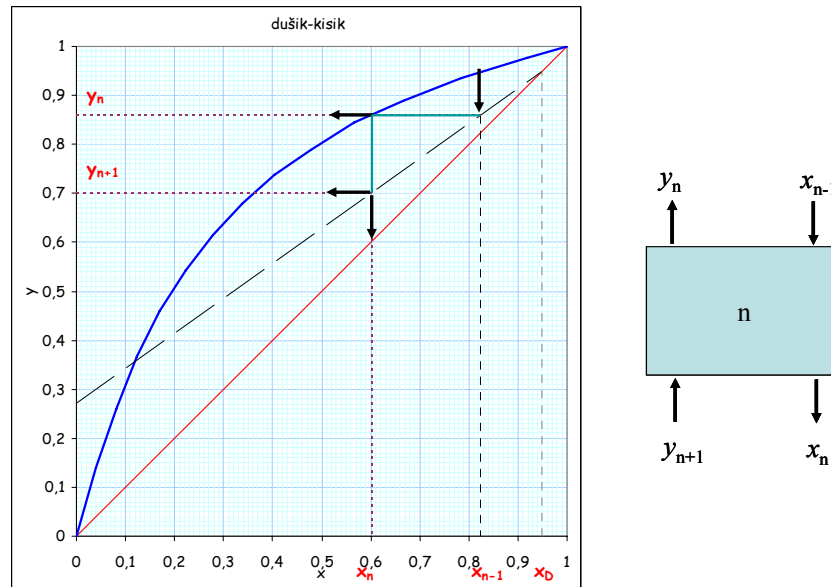


Slika 6.32. Granični slučajevi položaja radnih pravaca

Na slici 6.33. vidi se kako je povećanjem refluksnog omjera potreban sve manji broj koncentracijskih stupnjeva, odnosno sve niža kolona, za ostvarenje željene separacije (željeni sastav destilata i gornjeg produkta). Naime, što se više gornjeg produkta vraća u kolonu, ostvaruje se bolja separacija jer je moguće ukapljiti sve veću količinu zaostale teže hlapive komponente u gornjem produktu. Na taj način udio lakše hlapive komponente u destilatu raste.



Slika 5.33. Utjecaj refluksnog omjera na broj koncentracijskih stupnjeva



Slika 6.34. Sastavi pare i kapljevina koji ulaze i izlaze iz jednog koncentracijskog stupnja

Na slici 6.34. prikazane su ulazne i izlazne koncentracije na nekom n-tom stupnju. Na taj stupanj sa stupnja iznad slijeva se kapljevina sastava $x_{n-1} = 0,825$, a sa plitice ispod dolazi para sastava $y_{n+1} = 0,7$. Između faza na plitici n dolazi do izmjene topline i tvari. Obzirom da se pretpostavlja postizanje ravnoteže na teoretskom koncentracijskom stupnju, izlazne koncentracije sa n-tog stupnja $x_n = 0,6$ i $y_n = 0,86$ su u ravnoteži. Na opisani se način mogu odrediti sastavi na svakom koncentracijskom stupnju, nakon što se McCabe-Thileovom metodom odredi potreban broj teoretskih koncentracijskih stupnjeva.

Stanje pojne smjese definira položaj q-linije, odnosno mjesto gdje q-linija presijeca ravnotežnu krivulju. Pri čemu je stanje pojne smjese definirano njenim agregatnim stanjem i temperaturom (tablica 6.3.).

Jednadžba q-linije:

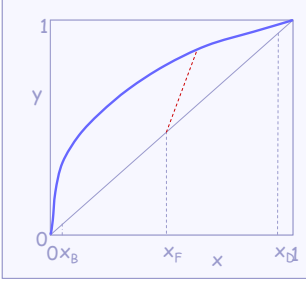
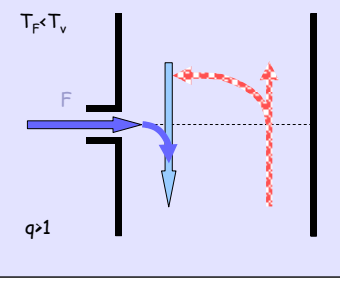
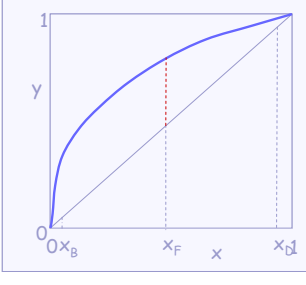
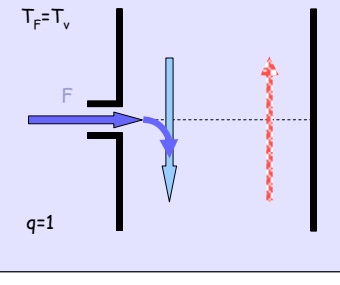
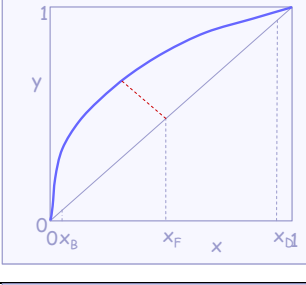
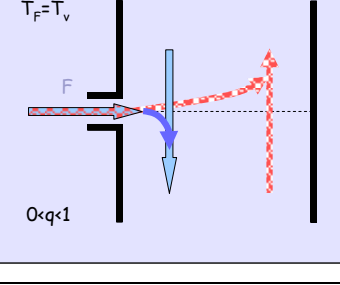
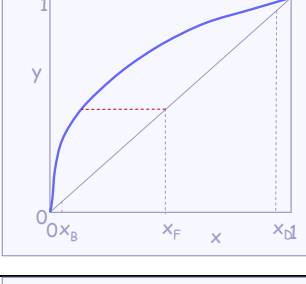
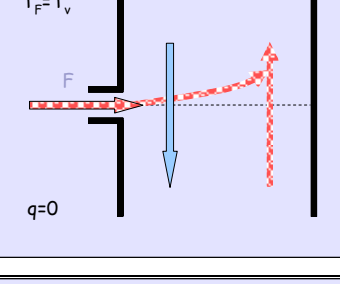
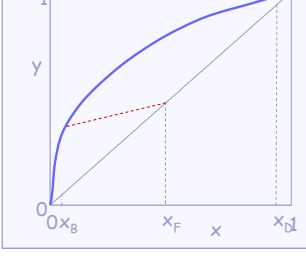
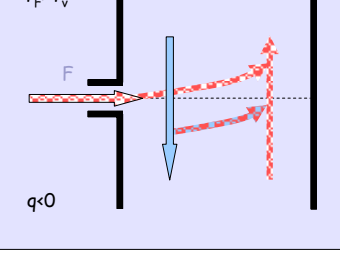
$$y_q = \frac{q}{q-1} \cdot x_q - \frac{x_F}{q-1} \quad (6.37.)$$

ovdje je q toplina potrebna za isparavanje 1 kmola pojne smjese, a (x_q, y_q) koordinate sjecišta gornjeg i donjeg radnog pravca.

Ako je pojna smjesa pothlađena kapljevina, da bi se na pojnom stupnju osiguralo vrenje potrebno je dovesti količinu topline koja će pojnu smjesu zagrijati do temperature vrelišta. Para predaje toplinu pojnoj smjesi, a kapljevina se slijeva na donji stupanj. Za slučaj kada je pojna smjesa kapljevina na temperaturi vrelišta, na pojnom stupnju nema izmjene topline i tvari, već se kapljevina pridružuje toku prema stupnju ispod pojnog. Ako je pojna smjesa, smjesa pare i kapljevina na temperaturi vrelišta, faze će se razdvojiti i pridružiti odgovarajućim tokovima, bez izmjene tvari i topline. Izmjene topline i

tvori para ni u slučaju ako je pojna smjesa para na temperaturi vrelišta, već se samo para pridružuje toku pare prema vrhu kolone. Konačno, u slučaju kada je pojna smjesa pregrijana para

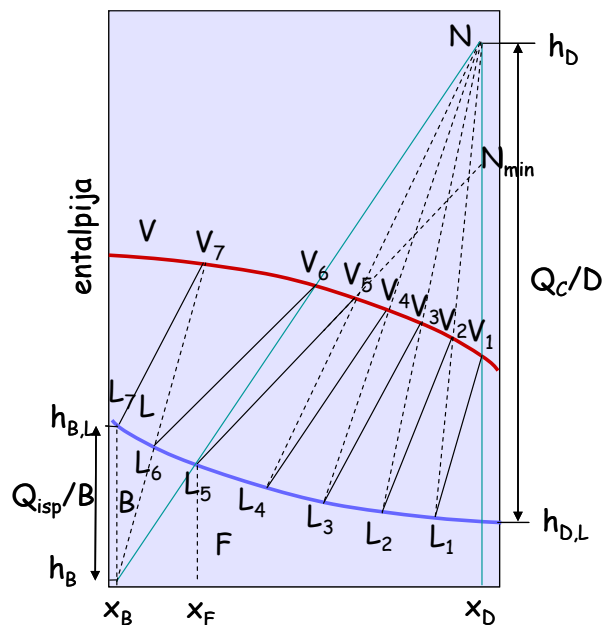
Tablica 6.3. Karakteristični slučajevi položaja q-linije

<p>kapljevina ($T_F < T_V$)</p> <p>$q > 1$</p>		 <p>$T_F < T_V$</p> <p>$q > 1$</p>
<p>kapljevina ($T_F = T_V$)</p> <p>$q = 1$</p>		 <p>$T_F = T_V$</p> <p>$q = 1$</p>
<p>smjesa pare i kapljevine ($T_F = T_V$)</p> <p>$0 < q < 1$</p>		 <p>$T_F = T_V$</p> <p>$0 < q < 1$</p>
<p>para ($T_F = T_V$)</p> <p>$q = 0$</p>		 <p>$T_F = T_V$</p> <p>$q = 0$</p>
<p>pregrijana para ($T_F > T_V$)</p> <p>$q < 0$</p>		 <p>$T_F > T_V$</p> <p>$q < 0$</p>

6.5.3.2. Ponchon Savaritova metoda

Ponchon-Savaritova grafička metoda koristi se za određivanje broja teoretskih separacijskih stupnjeva u protustrujnim kolonama. Potrebno je poznavanje entalpija-koncentracija dijagrama (Ponchon-Merkel). Molarne entalpije isparavanja nisu jednake a entalpija miješanja se ne zanemaruje.

Na slici 6.35. prikazana je metoda određivanja broja koncentracijskih stupnjeva Ponchon-Savaritovom metodom. Prvo se kroz veznu liniju pojenja provlači pravac koji prolazi kroz sastav donjeg produkta. Da bi se dobila točka N, pol, nađe se sjecište tog pravca sa sastavom gornjeg produkta. Sada se iz točke V1 (sastav pare) provlači vezna linija, čime se dobiva sastav kapljevine L1. Iz te točke do pola (točka N) provlači se pravac i nalazi točka V2. Postupak se ponavlja sve dok posljednji sastav kapljevine ne odgovara sastavu donjeg produkta, x_B .



Slika 6.35. Ponchon-Savaritova metoda određivanja NTU

Q_C – toplina oslobođena u kondenzatoru

Q_{isp} – toplina dovedena u isparivač .

6.5.3.3. Fenske Underwood metoda određivanja R_{min} i NTU_{min}

Ova metoda se osniva na pretpostavci stalnih molnih protoka i stalne relativne hlapivosti, $\alpha_{1,2}$.

Minimalni broj teoretskih stupnjeva, NTU_{min} , ostvaruje se kod totalnog refluksa ($R \rightarrow \infty$).

$$NTU_{min} = \frac{\log\left(\left(\frac{x_a}{x_b}\right)_D \cdot \left(\frac{x_b}{x_a}\right)_B\right)}{\log(\alpha_{1,2})} \quad NTU_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D \cdot (1 - x_B)}{x_B \cdot (1 - x_D)}\right)}{\log(\alpha_{1,2})} - 1 \quad (6.38.)$$

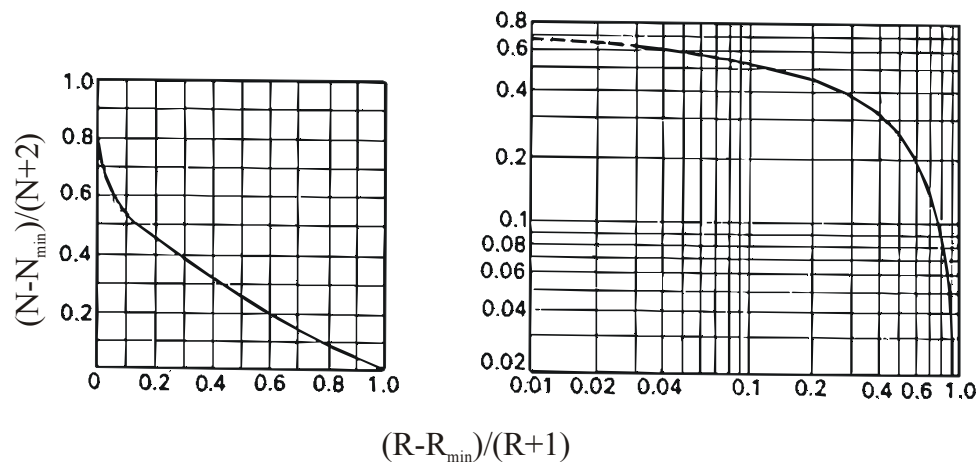
Minimalni refluksni odnos dobiva se za slučaj kada $NTU \rightarrow \infty$

$$R_{\min} = \frac{1}{\alpha_{ab} - 1} \cdot \left(\left(\frac{x_D}{x_F} \right)_a - \alpha_{ab} \cdot \left(\frac{x_D}{x_F} \right)_b \right) \quad R_{\min} = \frac{1}{\alpha_{1,2} - 1} \cdot \left[\frac{x_D}{x_F} - \alpha_{1,2} \cdot \frac{1 - x_D}{1 - x_F} \right] \quad (6.39.)$$

Ovdje je a lakše, a b teže hlapiva komponenta.

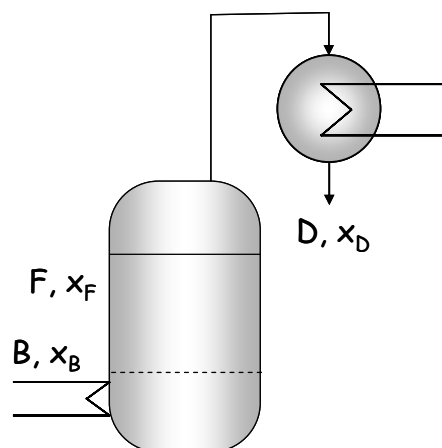
6.5.3.4. Gilliland-ova metoda

Gilliland-ov dijagram daje empirijsku relaciju između broja teoretskih jedinica prijenosa i refluksnog omjera, slika 6.36.. Za danu destilaciju minimalni refluksni i omjer i minimalni broj teoretskih jedinica prijenosa mogu se odrediti McCabe-Thiele-ovom metodom ili izračunati prema Fenske Underwood-u.



Slika 6.36. Relacija između refluksnog omjera i broja koncentracijskih stupnjeva

6.6. Diskontinuirana jednostavna destilacija



Slika 5.37. Diskontinuirana jednostavna destilacija

Smjesa koju je potrebno separirati unese se u kotao, zagrijava te se nastala para kontinuirano odvodi. Tijekom destilacije u kotlu zaostaje donji produkt sve veće koncentracije teže hlapive komponente.

Razina kapljevine u kotlu stalno se smanjuje. Kada se više ne dobiva destilat željenog sastava, destilacija se prekida.

Bilance tvari i topline

Ukupna bilanca:

$$F = D + B \quad (6.40.)$$

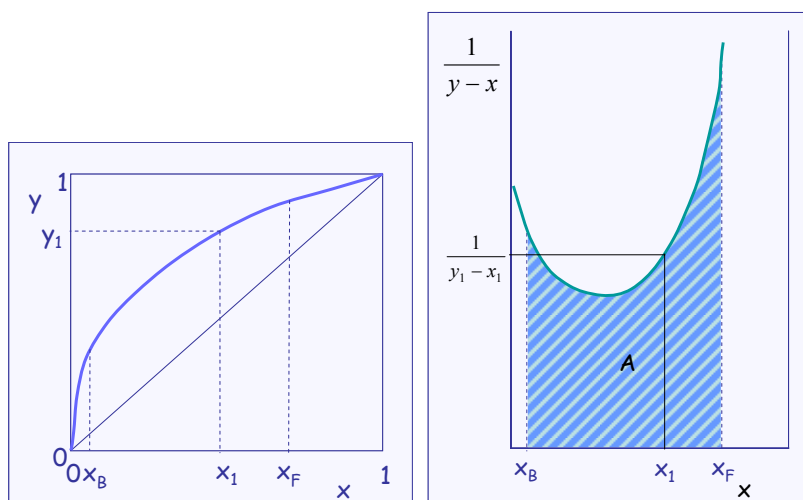
Bilanca za lakše hlapivu komponentu:

$$F \cdot x_F = D \cdot x_D + B \cdot x_B \quad (6.41.)$$

Jednadžba jednostavne destilacije:

$$\frac{dB}{B} = \frac{dx}{y-x} \quad (6.42.)$$

$$\ln\left(\frac{F}{B}\right) = \int_{x_B}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x} \quad (6.43.)$$



Slika 6.38. Grafička integracija

Količina donjeg produkta može se izračunati grafičkom integracijom, pri čemu je površina ispod krivulje, unutar granica početne i konačne koncentracije, jednaka vrijednosti integrala. Srednji sastav gornjeg produkta računa se korištenjem bilancne jednadžbe prema:

$$x_D = \frac{F \cdot x_F - B \cdot x_B}{F - B} \quad (6.44.)$$

Potrebna toplina računa se prema:

$$Q = Q_{zagrijavanja} + Q_{destilacije} = F \cdot (H_v - h_F) + D \cdot \lambda_D \quad (6.45.)$$

Toplina se može dovesti na sljedeće načine:

- uređaj grijan parom preko dvostruke stjenke
- unutarnja zavojnica

- unutarnji snop cijevi
- vanjski isparivač sa pumpom
- direktno zagrijavanje

6.7. Kontinuirana jednostavna destilacija

Kapljevita smjesa kontinuirano parcijalno isparava a gornji i donji produkt se kontinuirano odvođe.

Koristi se u slučaju visokih relativnih hlapivosti, ili za separaciju smjese koja sadrži malu količinu komponente nižeg vrelišta ili obrnuto. Koncentracije su u funkciji površine izmjene topline.

Bilance tvari i topline

Ukupna bilanca:

$$F = D + B \quad (6.46.)$$

Bilanca za lakše hlapivu komponentu:

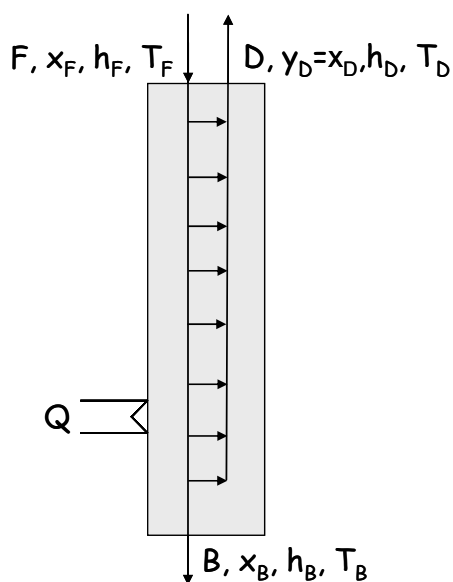
$$F \cdot x_F = D \cdot x_D + B \cdot x_B \quad (6.47.)$$

Srednji sastav destilata:

$$x_D = \frac{F \cdot x_F - B \cdot x_B}{F - B} \quad (6.48.)$$

Iz bilance topline (ULAZ=IZLAZ):

$$Q = D \cdot h_D + B \cdot h_B - F \cdot h_F \quad (6.49.)$$



Slika 6.39. Kontinuirana jednostavna destilacija

Specifična potrošnja topline:

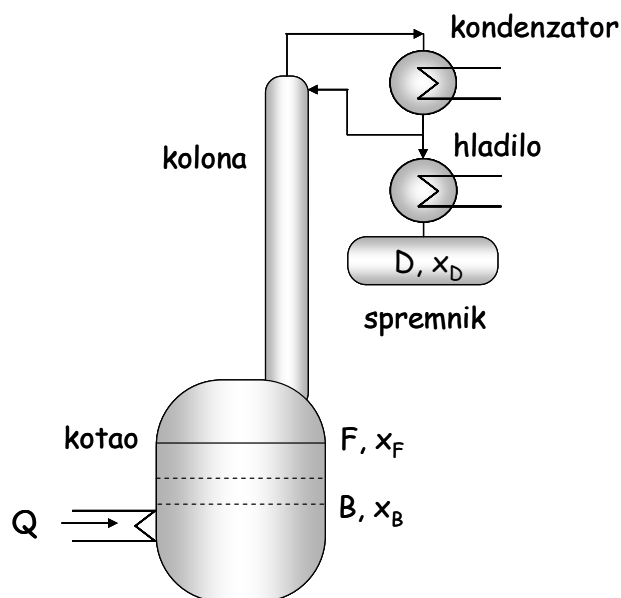
$$q = \frac{Q}{D} = h_D - h_B + \frac{y_D - x_B}{x_F - x_B} \cdot (h_B - h_F) \quad (6.50.)$$

6.8. Šaržna adijabatska destilacija

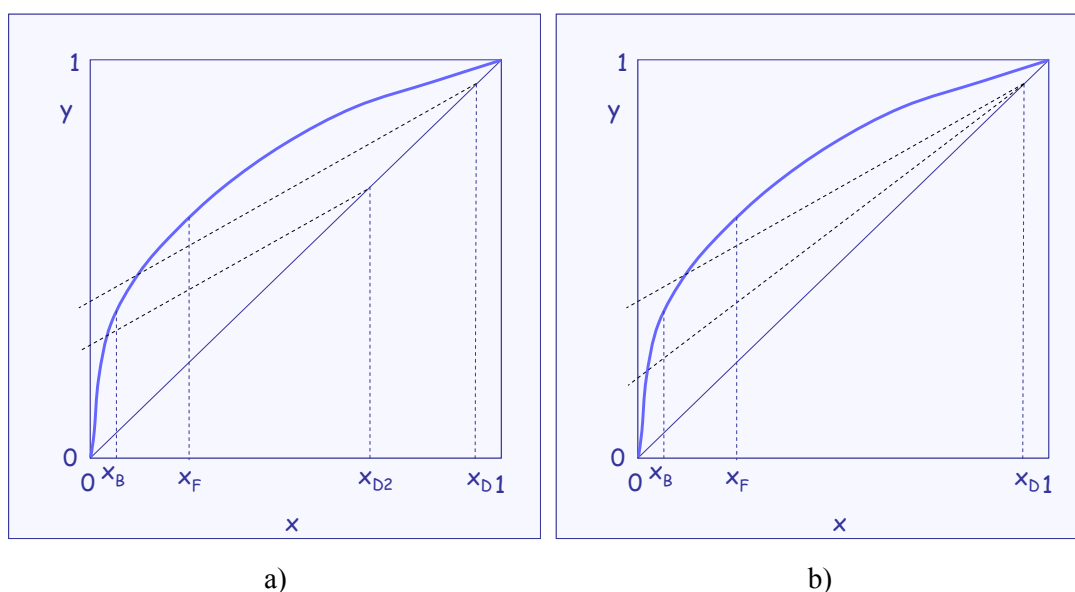
Kapljevina se unese u kotao, zagrije do vrenja te dolazi do rektifikacije u koloni za obogaćivanje. Pri tome nastala para kondenzira u kondenzatoru, dio se kao refluks vraća u kolonu, a nakon završetka donji produkt se uklanja iz uređaja.

Moguć je rad na dva načina:

- stalan refluksni omjer (višekomponentne smjese)
- refluks se prilagođava za stalan sastav destilata (dvokomponentne smjese)



Slika 6.40. Šaržna adijabatska destilacija



Slika 6.41. Prikaz u ravnotežnom dijagramu: a) $R=\text{const}$, b) $x_D=\text{const}$.

Kada kolona radi sa stalnim refluksnim omjerom, nakon nekog vremena više neće biti dovoljno lakše hlapive komponente unutar kolone da se osigura isti sastav destilata, pa će on početi opadati. Osim sastava destilata i donjeg produkta mijenja se (opada) i broj koncentracijskih stupnjeva koji odgovara danoj separaciji (vezanoj uz sastave produkata). Ukoliko je moguće, da bi se osigurao i dalje željeni sastav destilata potrebno je regulirati refluksni omjer. Pri tome se refluksni omjer povećava, što za posljedicu ima smanjenje potrebnog broja koncentracijskih stupnjeva.

Bilanca tvari i potrebna toplina

Ako kolona radi sa stalnim refluksnim omjerom iz bilance tvari dobiva se:

$$D = F - B = F \cdot \left(1 - \exp \left(- \int_{x_B}^{x_F} \frac{dx}{x_D - x} \right) \right) \quad (6.51.)$$

Ako se R prilagodi da se dobiva destilat stalnog sastava, ukupna količina destilata:

$$D = F - B = F \cdot \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \quad (6.52.)$$

Za stalni sastav destilata:

$$Q = \lambda \cdot \int_0^D (R+1) \cdot dD + D \cdot h_D \quad (6.53.)$$

Za stalni refluksni omjer:

$$Q = (R+1) \cdot \int_0^D \lambda(D) \cdot dD + \int_0^D h_D \cdot dD \quad (6.54.)$$

Za zagrijavanje kolone nakon punjenja kotla do vrelišta, potrebna je sljedeća količina topline:

$$Q = F \cdot (h_v - h_F) \quad (6.55.)$$

6.9. Faktori koji utječu na rad kolone

Prilikom projektiranja kolone potrebno je na početku odrediti potreban broj koncentracijskih stupnjeva za željenu separaciju i mjesto uvođenja pojne smjese u kolonu. Osim toga potrebno je još uzeti u obzir razmak između plitica, promjer kolone, konfiguraciju unutrašnjosti kolone, te količine topline koje se izmjenjuju u kondenzatoru i isparivaču.

Na rad destilacijske kolone utječe velik broj parametara. To su stanje i sastav pojne smjese, nečistoće u tragovima koje mogu utjecati na ravnotežu para-kapljevina, uvjeti strujanja faza, stanje plitica ili punila, te vanjski uvjeti. Navedeni utjecaji mogu izazvati loš rad kolone. Ostali utjecaji uključuju promjene radnih uvjeta i protoka, te zahtjeva na čistoći produkata. Kolone se dizajniraju tako da osiguraju efikasnu separaciju faza. Iako se radi o procesu koji se najčešće koristi za separaciju kapljeviti smjesa, važno je naglasiti da je destilacija izuzetno ekonomski nepovoljan proces jer troši velike količine energije za grijanje i hlađenje.

Stanje pojenja

Stanje i sastav pojne smjese utječu na položaj radnih pravaca, a time i broj potrebnih koncentracijskih stupnjeva za željenu separaciju te položaj uvođenja pojne smjese u kolonu. Ukoliko se tijekom rada znatno promjene uvjeti (sastav i stanje pojne smjese) neće se ostvariti željena separacija. Da bi se taj utjecaj smanjio, instaliraju se kolone sa mogućnošću promjene mjesta pojenja.

Refluks

S povećanjem refluksa nagib gornjeg radnog pravca raste, sve se više kapljevine bogate LHK vraća u kolonu što rezultira boljom separacijom te je potreban manji broj koncentracijskih stupnjeva za željeni stupanj separacije. S druge strane, smanjenjem refluksa radni se pravac približava ravnotežnoj krivulji te je potrebno sve veći broj koncentracijskih stupnjeva. Ograničavajući uvjet vezan je uz minimalni refluksni omjer koji zahtjeva beskonačan broj koncentracijskih stupnjeva. Većina kolona radi uz $R=(1,2-1,5) \cdot R_{\min}$, obzirom da se pokazalo da su tada minimalni radni troškovi (veći refluks rezultira većom količinom topline koja se mora dovesti u isparivač).

Uvjeti strujanja pare

Nepovoljni uvjeti strujanja pare mogu prouzročiti:

- nastajanje pjene
- odnošenje
- potapanje kolone
- istjecanje kapljevine

Pjena nastaje prilikom ekspanzije kapljevine kada kroz nju prostruji plin ili para. Preintenzivno pjenjenje rezultira zadržavanjem kapljevine na pliticama, te može doći do miješanja sa kapljevnom na gornjem stupnju. Da li će doći do pjenjenja ovisi o fizikalnim svojstvima kapljevine, dizajnu plitica i radnim uvjetima, a nastala pjena smanjuje djelotvornost separacije. Preveliki protok pare može rezultirati odnošenjem kapljevine parom na gornji stupanj, čime se smanjuje djelotvornost plitice. Naime, teže hlapiva komponenta odnosi se na pliticu iznad koja sadrži smjesu nižeg vrelišta. Može se na taj način i kontaminirati destilat velike čistoće. Kao i u slučaju pjenjenja dolazi do pada efikasnosti separacije. Prevelik protok pare također može dovesti do potapanja kolone kada kapljevina biva odnesena na vrhu kolone. Rezultira povećanim zadržavanjem kapljevine na pliticama, a ovisno o stupnju potapanja kapacitet kolone se smanjuje. S druge strane, ako je protok pare premalen tlak pare nije dovoljan da zadrži kapljevinu na plitici pa kapljevina počinje istjecati sa plitica. Rezultira naglim padom tlaka i smanjenom djelotvornosti procesa.

Promjer kolone

Uvjeti strujanja pare u velikoj mjeri utječu na rad kolone. Brzina strujanja pare ovisi o promjeru kolone. Istjecanje definira minimalni protok pare, a potapanje kolone definira maksimalni protok pare. Dakle, ako promjer kolone nije dobro dizajniran kolona neće raditi ispravno.

Stanje plitica i punila

Stvarni broj separacijskih stupnjeva definiran je efikasnošću plitice odnosno punila. Dakle, sve što utječe na smanjenje efikasnosti plitica utječe i na rad kolone. Na djelotvornost plitica utječu naslage, otpori, korozija i brzine navedenih procesa, što ovisi o vrsti kapljevine. Potrebno je pažljivo odabrati odgovarajući konstrukcijski materijali.

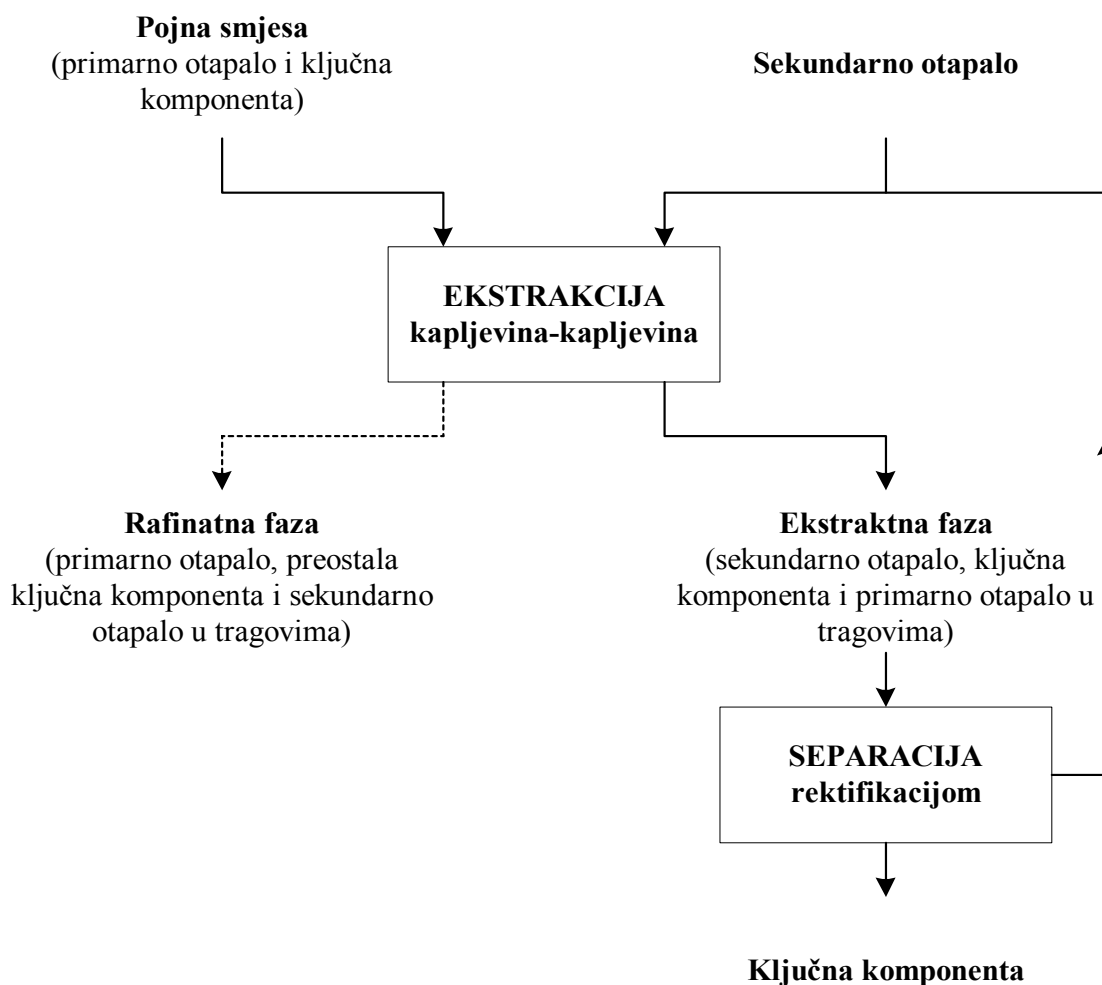
Vanjski uvjeti

Većina kolona je otvorena u atmosferu. Iako su izolirane promjena vanjskih uvjeta utječe na rad kolone. Tako da isparivač mora osigurati nastajanje dovoljno pare tijekom hladnih vjetrovitih dana.

7. Ekstrakcija

7.1. Uvod

Kapljevinska ekstrakcija je separacijski proces kod kojeg se kapljevita smjesa separira kontaktiranjem sa sekundarnim otapalom. Razdvajanje smjese se temelji na nejednolikoj raspodjeli komponenti između nemiješljivih kapljevina. Smjesa koja se separira pri tome predstavlja jednu fazu, selektivno otapalo drugu fazu, a otopljena komponenta prelazi iz primarnog u sekundarno otapalo (smjer prijenosa tvari).



Slika 7.1. Shematski prikaz kapljevinske ekstrakcije

Kapljevinska ekstrakcija iskorištava razliku u topljivosti komponente u dva otapala. Separacija se odvija u sljedećim stupnjevima:

- ✓ Dovođenje pojne smjese i selektivnog otapala u kontakt
- ✓ Separaciju nastalih faza
- ✓ Regeneraciju otapala

Kapljevita smjesa koja se separira i odgovarajuće nemješljivo otapalo dovode se u bliski kontakt, a prisutne se komponente razdvajaju između dvije faze uz odgovarajući stupanj separacije (može se poboljšati višestupnjevitim kontaktom). Nakon toga dolazi do separacije faza na temelju različitih gustoća faza. Faza koju je potrebno pročistiti naziva se rafinatna faza, a selektivno otapalo obogaćeno otopljenom komponentom ekstraktna faza.

Osim ekstrakcija, za separaciju kapljeviti smjesa koristi se i destilacija. Obzirom da je ekstrakcija proces koji se odabire ukoliko se smjesa ne može separirati destilacijom u tablici 7.1. dana je usporedba ta dva toplinska separacijska procesa.

Tablica 6.1. Usporedba ekstrakcije i destilacije

Ekstrakcija	Destilacija
1. Do separacije dolazi dodatkom selektivnog otapala.	1. Do separacije dolazi dovođenjem toplinske energije.
2. Koristi se razlika u topljivosti komponente u dva otapala.	2. Koristi se razlika u tlaku para komponenata smjese.
3. Mjera stupnja separacije je selektivnost.	3. Mjera stupnja separacije je relativna hlapivost.
4. Nova kapljevita faza se dodaje u primarnu smjesu.	4. Nova faza nastaje dovođenjem topline.
5. Faze se teško izmješaju i još teže razdvajaju.	5. Miješanje i separacija faza je brzo i jednostavno.
6. Zahtjeva daljnju separaciju.	6. Moguće je dobiti gotovo čiste faze.(potpuno razdvajanje)
7. Fleksibilnost u odabiru radnih uvjeta.	7. Manja fleksibilnost u odabiru radnih uvjeta.
8. Potrebna mehanička energija za miješanje i separaciju.	8. Potrebno dovesti toplinsku energiju.
9. Nisu potrebni izmjenjivači topline za hlađenje i grijanje.	9. Potrebni su izmjenjivači topline (kondenzator i isparivač)
10. Sekundarni izbor za separaciju kapljeviti smjesa.	10. Uglavnom primarni izbor za separaciju kapljeviti smjesa.

Iako zahtjeva pomoćne uređaje (grijanje/hlađenje) kada god je moguće smjesu separirati i destilacijom i ekstrakcijom, prvenstveni odabir je destilacija. Naime, kada se smjesa separira ekstrakcijom iskorišteno otapalo je potrebno regenerirati, tako da nakon ekstrakcije uvijek slijedi destilacija.

Separacija koja se odvija u više različitih uređaja je uvijek složenija i ekonomski nepovoljnija. Međutim, ako je smjesu nemoguće separirati destilacijom, ekstrakcija može biti alternativni odabir.

Kada izabrati ekstrakciju?

- Kada se velike količine vode moraju ukloniti za potpunu separaciju. Velika vrijednost latentne topline isparavanja vode čini process isparavanja energetski nepovoljnim.
- Kada dvije ili više kapljevina tvore azeotropnu smjesu, pa se željena separacija ne može ostvariti destilacijom.
- Kada su jedna ili više komponenti toplinski nestabilne, pa separacija nije moguća destilacijom.

Prilikom optimiranja procesa velika se pažnja mora posvetiti odabiru otapala, radnim uvjetima te načinu rada.

7.2. Odabir radnih uvjeta

Ovisno o prirodi procesa temperatura, pH i vrijeme zadržavanja mogu u znatnoj mjeri utjecati na selektivnost i efikasnost procesa. Obzirom da tlak ne utječe na prijenos tvari ekstrakcijom, ekstrakcija se uglavnom provodi pri atmosferskom tlaku. Na selektivnost utječe temperatura. Kako bi se osiguralo dobro razdvajanje pojne smjese isparavanje se mora spriječiti. Međutim temperatura mora biti dovoljno velika kako bi se komponente otopile. Rad u blagim uvjetima olakšava odabir otapala, tako da se većina ekstrakcijskih procesa odvija na uvjetima bliskim sobnim što je jedna od bitnih značajki ekstrakcije. Kako bi se povećala selektivnost temperatura se može mijenjati tijekom separacije. Povišene temperature mogu održavati viskoznost niskom i time smanjivati otpor prijenosu tvari. U većini slučajeva potrebni su blagi radni uvjeti obzirom da bi povišena temperatura dovela do razgradnje željenog produkta (farmaceutska industrija). Za takve procesa ekstrakcija je idealna obzirom da temperatura utječe na topljivost. Od izuzetnog je značaja pažljivo odabrati otapalo.

U procesima ekstrakcije metala i bio-ekstrakciji pH ima znatan utjecaj. Pri određenoj pH vrijednosti može se povećati koeficijent raspodjele ili smanjiti mogućnost razgradnje. Ponekad samo otapalo može sudjelovati u neželjenim reakcijama pri određenim pH vrijednostima. Vrijeme zadržavanja ima veliku ulogu u ekstrakciji uz kemijsku reakciju te u procesima u kojima sudjeluju brzo razgradljive komponente.

Na selektivnost još utječe međusobna topljivost, precipitacija i tlak para.

7.2.1. Odabir otapala

Kapljevina koja se koristi kao otapalo nikada ne posjeduje sva svojstva pogodna za ekstrakciju, te je potreban kompromis pri odabiru pogodnog otapala. Najveća se pažnja mora posvetiti selektivnosti, regeneraciji, koeficijentu raspodjele i gustoći.

Selektivnost je omjer koncentracija otopljene komponente u ekstraktnoj i rafinatnoj fazi. Ta je veličina mjera efikasnosti separacije i mora biti veća od 1. Ukoliko je vrijednost manja od 1 ekstrakcija nije moguća.

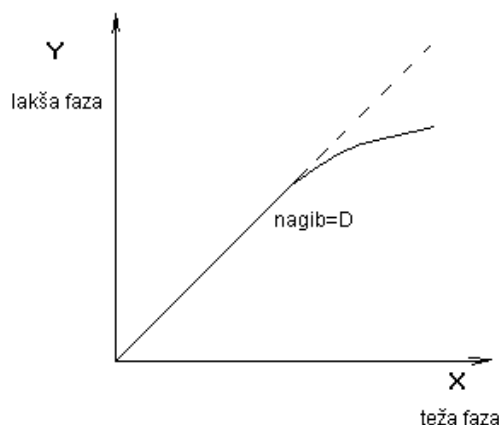
Obzirom da se otapalo mora regenerirati zbog ponovne upotrebe, otapalo ne smije stvarati azeotrop sa otopljenom komponentom. Kako bi se smanjila cijena regeneracije relativna hlapivost mora biti velika. Latentna toplina isparavanja mora biti što je moguće manja. Razlika gustoća faza mora biti što je moguće veća zbog lakšeg razdvajanja faza. Međufazna napetost mora biti velika kako bi se osigurali uvjeti za koalescenciju kapljica. Naime, koalescencija pogoduje ekstrakciji iako je za neke procese nepovoljna i otežava predviđanje vladanja sustava prilikom prenošenja rezultata u veće mjerilo (*scale-up*). Otapalo mora biti jeftino, neotrovno i nezapaljivo. Mora imati malu viskoznost, točku leđišta i tlak para za lakše rukovanje i skladištenje. Osim toga mora biti kemijski stabilno i inertno na druge komponente.

Tablica 6.2. Otapala za ekstrakciju octene kiseline iz vodenih otopina

otapalo	Koeficijent raspodjele pri 20°C	Topljivost u vodi pri 20°C Maseni udio, %
n-Butanol	1,6	>10
Etil Acetat	0,9	10
MIBK	0,7	2,0
Toluen	0,06	0,05
n-Hexan	0,01	0,015

7.3. Fazna ravnoteža

Kod određene temperature, koncentracija distribuirane komponente u jednoj fazi u odnosu na koncentraciju u drugoj fazi, zadržavati će jedinstveni odnos kao što je prikazano na slici 7.2.



Slika 7.2. Fazna ravnoteža

7.3.1. Koeficijent raspodjele

U razrijeđenim otopinama u ravnoteži, omjer koncentracija otopljene komponente u dvije faze naziva se koeficijent raspodjele, K .

$$K = \frac{c_E}{c_R} \quad (7.1.)$$

c_E i c_R i x su koncentracije otopljene komponente u ekstraktnoj i rafinatnoj fazi, Može se izraziti i preko masenih udjela raspodijeljene komponente u ravnoteži:

$$K = \frac{y}{x} \quad (7.2.)$$

Kao što je već spomenuto kod ostalih toplinskih separacijskih procesa, ravnoteža kapljevinakapljevina mora biti poznata obzirom da definira pokretačku silu procesa. Ravnoteža se najbolje prikazuje izjednačavanjem kemijskih potencija obje faze:

$$\mu_i^I = \mu_i^{II} \quad (7.3.)$$

Ovaj se odnos reducira do izraza koji ovisi samo o molnim udjelima i odgovarajućim koeficijentima aktivnosti:

$$\gamma_i^I \cdot x_i^I = \gamma_i^{II} \cdot x_i^{II} \quad (7.4.)$$

Za procjenu koeficijenta aktivnosti koriste se modeli (UNIFAC, UNIQUAC i NRTL), čiji se odabir temelji na dostupnim svojstvima.

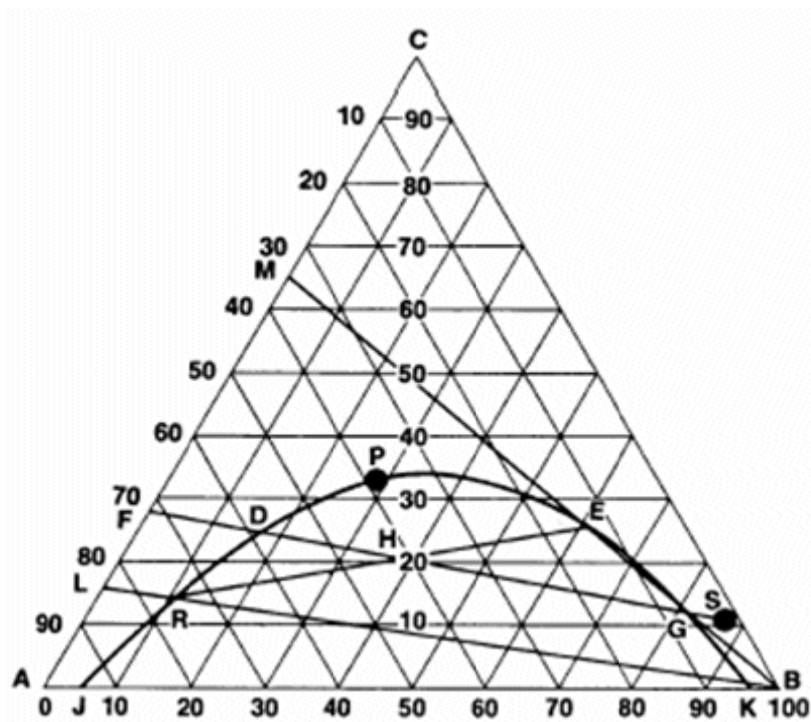
7.3.2. Relativni koeficijent raspodjele

Ako se dvije komponente raspodijele između faza u ravnoteži, može se definirati važan parametar koji opisuje stupanj separacije tvari u jednom ekstrakcijskom stupnju:

$$\alpha \equiv \left(\frac{Y_A / X_A}{Y_B / X_B} \right)_{eq} \equiv \left(\frac{Y_A / Y_B}{X_A / X_B} \right)_{eq} = \frac{D_A}{D_B} \quad (7.5.)$$

7.3.3. Ternarni dijagram

Ternarni fazni dijagrami prikazuju sve tri komponente prisutne kod ekstrakcije. Ternarni se dijagram može konstruirati direktno iz eksperimentalnih podataka. Binodalna krivulja (ravnotežna krivulja; granica topljivosti) označena slovima JDPEK na slici dobiva se metodom zamućenja. Na primjer, u otopinu koja sadrži komponente A i C dodaje se otapalo B sve do pojave zamućenja do kojeg dolazi zbog stvaranja nove faze. Tada je poznat sastav smjese tri komponente koji se može ucrtati u ternarni dijagram. Vezne linije povezuju sastave dviju faza koje su u ravnoteži. Mogu se također odrediti eksperimentalno. Pripremi se smjesa sastava označenog točkom H (40% A, 40% C, 20% B) na slici 7.3. Ako se sustav dovede do ravnoteže može se analizirati sastavi obje faza (ekstraktne i rafinatne). Točka F predstavlja pojnu smjesu, a točka S otapalo koje se dodaje u ekstraktor. Točka H predstavlja sastav smjese koja se nakon miješanja razdvaja na ravnotežne sastave R i E povezane veznom linijom.



Slika 7.3. Sustav kapljevina-kapljevina sa dvije djelomično mješljive komponente

Ovisno o odnosu sastava rafinata i ekstrakta vezne se linije nalaze unutar heterogenog područja. U kritičnoj točki, P, postoji samo jedna faza a sastavi rafinata i ekstrakta su jednaki. Kada se komponenta C doda u smjesu dvije faze A i B, C se raspodijeli između faza a sastavi faza slijede binodalnu krivulju. Dio binodalne krivulje KGEP odgovara sastavima ekstrakne faze, a dio JRDP sastavima rafinatne faze. Iznad binodalne krivulje egzistira samo jedna faza (homogeno područje). Poznavanje ravnotežnih ternarnih dijagrama od izuzetne je važnosti zbog odabira odgovarajućeg sekundarnog otapala. Na primjer metil etil keton ima preusko heterogeno područje (široko područje mješljivosti), pa ga ne bi trebalo odabrati za separaciju octene kiseline iz vodenih otopina (slika 7.4.)



Slika 7.4. Primjer “dobrog” i “lošeg” otapala za uklanjanje octane kiseline iz vodenih otopina

7.5. Načini dovođenja faza u kontakt

Kapljevinska ekstrakcija uključuje tri stupnja:

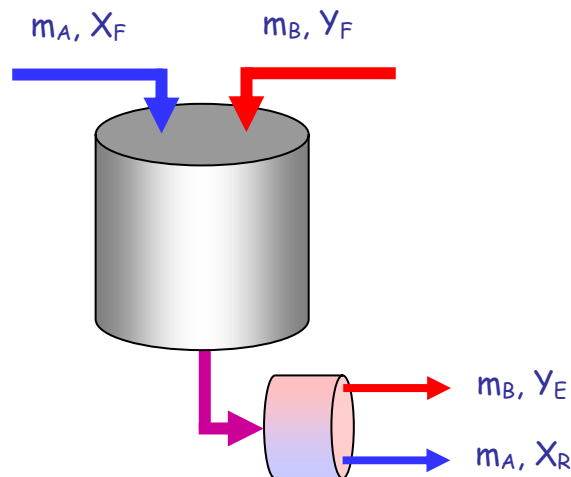
- Dovođenje pojne smjese i selektivnog otapala u kontakt
- Separaciju nastalih faza
- Uklanjanje i regeneracija otapala iz obje faze

Pri tome se prva dva stupnja mogu kombinirati u jednom uređaju, kao što je slučaj s kontinuiranom kolonskom ekstrakcijom. Kapljevinska se ekstrakcija provodi i u stupnjevitom kontaktu faza (kaskade). Najjednostavnija je pri tome jednostupnjevita ekstrakcija. U svrhu povećanja djelotvornosti procesa, separacija se može provoditi i u višestupnjevitom kontaktu. Ovisno o smjeru strujanja pojedinih faza, postoji istostrujna i protustrujna višestupnjevita ekstrakcija.

7.5.1. Jednostupnjevita šaržna ekstrakcija

Šaržni procesi, su tradicionalno malih kapaciteta (farmaceutska industrija). Uređaj se sastoji od miješalice u koju se otapalo dodaje kapljevitoj smjesi. Nakon toga slijedi miješanje faza, taloženje (razdvajanje faza) i na kraju njihova separacija. Jednostupnjeviti proces se koristi za jednostavne separacije koje se mogu provesti bez velike količine otapala. Kada se željeni sastav rafinata ne može ostvariti u jednom stupnju koristi se višestupnjevita ekstrakcija. Troše se velike količine otapala a zbog niske djelotvornosti rijetko se isplati.

Jednostupnjeviti proces može se prikazati kao:



Slika 7.5. Jednostupnjevita ekstrakcija

Kod jednostupnjevitog šaržnog procesa (slika 7.5.) otopina i otapalo miješaju se u ekstraktoru miješalici, a zatim se ostavi da se faze razdvoje u rafinatni i ekstraktnu fazu. Ukoliko se faze ostave dovoljno dugo u kontaktu uz miješanje, moguće je postići ravnotežno stanje.

Bilanca tvari:

$$m_A \cdot X_F + m_B \cdot Y_F = m_A \cdot X_R + m_B \cdot Y_E \quad (7.6.)$$

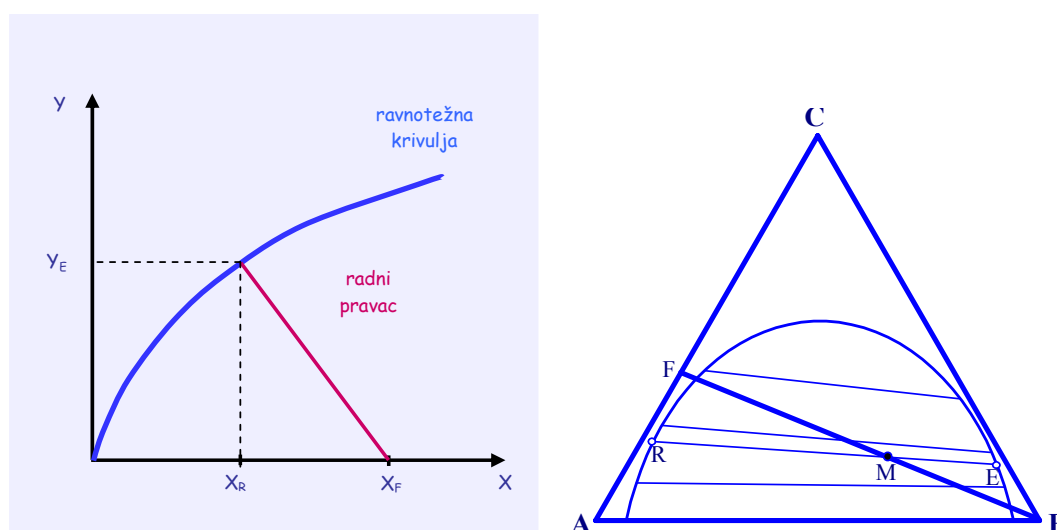
Preuređenjem jednadžbe, dobiva se radni pravac (slika 7.6. a):

$$Y_E = -\frac{1}{S} \cdot (X_R - X_F) + Y_F \quad (7.7.)$$

gdje je: $S = \frac{m_B}{m_A}$ - **solvent odnos**

Ukoliko je selektivno otapalo čisto na ulazu, $Y_F=0$:

$$Y_E = -\frac{1}{S} \cdot (X_R - X_F) \quad (7.8.)$$



Slika 7.6. Ravnotežni dijagrami: a) $Y = f(X)$, b) ternarni dijagram

U ternarnom dijagramu (slika 7.6. b) točka F predstavlja pojnu smjesu, koja se dovodi u kontakt sa čistim otapalom, B. Točka M predstavlja dobivenu smjesu. Nakon postizanja ravnoteže, smjesa se razdvaja na rafinat (točka R) i ekstrakt (točka E), koji se nalaze na binodalnoj krivulji (RE – vezna linija).

Ekstrakcijski faktor je definiran kao umnožak solvent odnosa i koeficijenta raspodjele:

$$E = D \cdot S \quad (7.9.)$$

Ekstrakcijski faktor, E , kaže koliko lako lakše otapalo može ukloniti komponentu iz težeg otapala, a njegova recipročna vrijednost kaže kako lako teže otapalo može ukloniti komponentu iz lakšeg. Što je veća vrijednost ekstrakcijskog faktora, više komponente će se naći na vrhu kaskade u struji lakšeg otapala.

Regeneracija se definira kao:

$$R = \frac{X_F - X_R}{X_F} \quad (7.10.)$$

7.5.2. Višestupnjevita istostrujna ekstrakcija

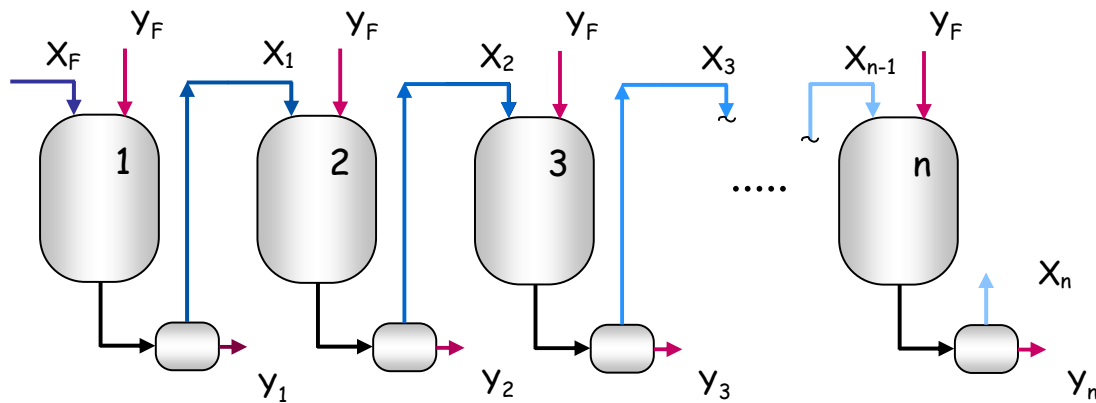
Kako bi se dobila veća čistoća rafinata, često je potrebno proces provoditi u višestupnjevitom kontaktu. Kod istostrujnog kontakta faza (slika 7.7.), pojna smjesa se uvodi u prvi stupanj, gdje se dovodi u kontakt sa selektivnim otapalom koje se također uvodi u taj stupanj. Ekstrakt se uklanja iz procesa, dok se rafinat uvodi u sljedeći stupanj kao pojna smjesa i tretira sa selektivnim otaplom. Kako rafinatna faza u svakom sljedećem stupnju sadrži sve manje komponente koju je potrebno ukloniti, sve je veća pokretačka sila za proces prijenosa tvari, te je moguće dobiti rafinat velike čistoće.

Bilanca tvari (uz pretpostavku da je lakše otapalo čisto):

$$m_A X_{j+1} = m_A X_j + \frac{m_B}{N} Y_j \quad (7.11.)$$

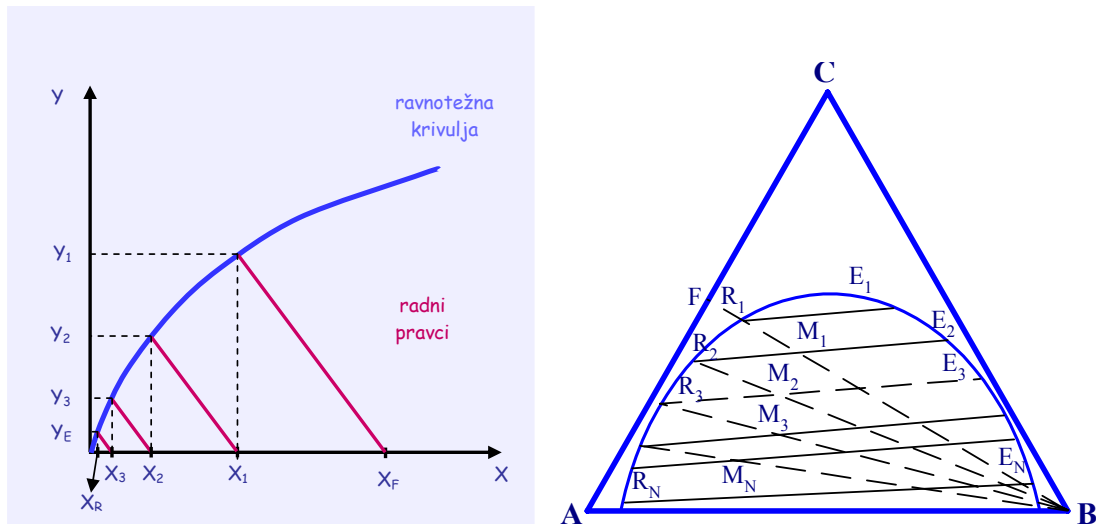
Jednadžba radnog pravca:

$$Y_1 = -\frac{N}{S} \cdot (X_1 - X_F) \quad (7.12.)$$



Slika 7.7. Višestupnjevita istostrujna kapljevinska ekstrakcija

Da bi se grafički odredio sastav rafinata i ekstrakta na izlazu iz svakog pojedinog stupnja, iz početnog sastava smjese, X_F , povlači se pravac nagiba $-N/S$ do ravnotežne krivulje (slika 7.8. a). Spuštanjem okomice do apscise očita se sastav rafinata na izlazu iz prvog stupnja, X_1 , te se iz te točke ponovno povlači radni pravac istog nagiba. Postupak se ponavlja onoliko puta u koliko stupnjeva se provodi ekstrakcija.

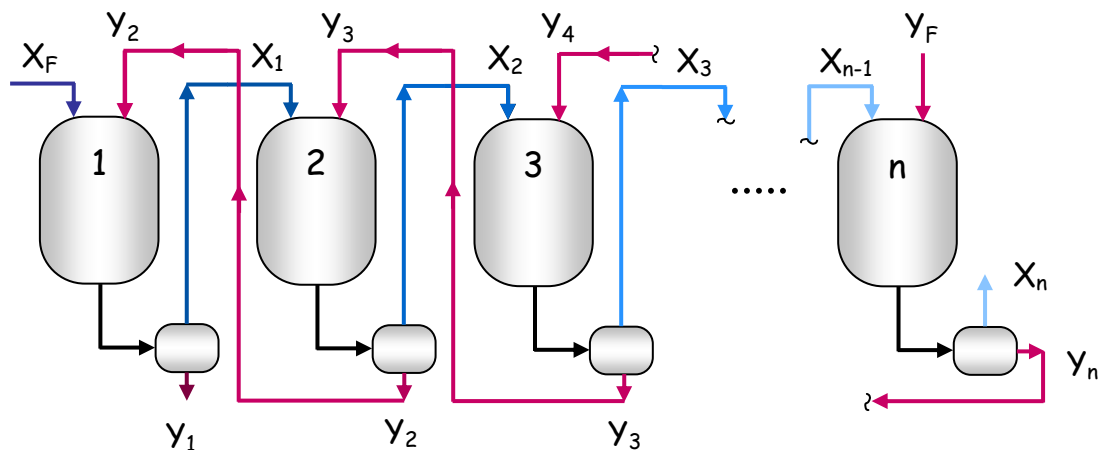


Slika 7.8. Ravnotežni dijagrami (istostrujni kontakt faza): a) $Y=f(X)$, b) ternarni dijagram

Sastavi faza na izlazu iz svakog stupnja, kao i broj potrebnih stupnjeva za željenu separaciju mogu se odrediti i iz ternarnog dijagrama (slika 7.8. b). Prvo se iz početnog sastava pojne smjese, točka F, povlači spojište sa vrhom trokuta B (čisto selektivno otapalo). Točka M_1 koja predstavlja ukupni sastav smjese se nađe korištenjem pravila poluge iz omjera protoka primarnog i sekundarnog otapala. Kroz tu se točku tada provuče vezna linija i dobiju se sastavi rafinatne, R_1 , i ekstraktne, E_1 , faze na izlazu iz prvog stupnja. Sada se točka R_1 spaja sa vrhom trokuta B, te se položaj točke M_2 , kao i sastavi obje faze određuju kao i za prvi stupanj.

7.5.3. Višestupnjevita protustrujna ekstrakcija

Protustrujni načina rada koristi se kada je potrebno pročistiti veće količine otopine. Takvim načinom rada otapalo se efikasnije koristi. Održava se pokretačka sila procesa prijenosa tvari te postižu optimalni rezultati. Kod višestupnjeviteg protustrujnog kontakta faza, pojna smjesa i selektivno otapalo uvode se na suprotnim krajevima, odnosno pojna smjesa se uvodi u prvi stupanj, a selektivno otapalo u posljednji (slika 7.9.).



Slika 7.9. Višestupnjevita protustrujna kapljevinska ekstrakcija

Bilanca j-tog stupnja:

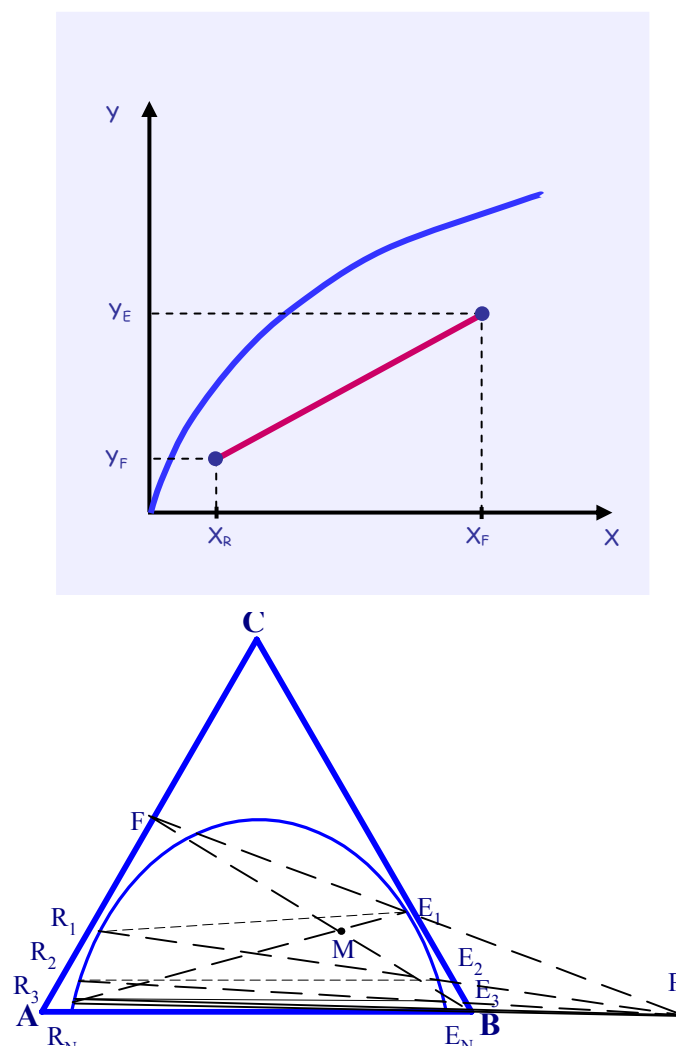
$$m_A X_{j+1} + m_B Y_{j-1} = m_A X_j + m_B Y_j \quad (7.13.)$$

Jednadžba radnog pravca:

$$Y_1 = \frac{1}{S} \cdot (X_F - X_N) + Y_F \quad (7.14.)$$

Za dani broj stupnjeva, što je veći E bolja je separacija, Sustavi sa $E < 1,3$ nisu komercijalno isplativi.

Da bi se u ravnotežnom dijagramu (slika 7.10. a) odredio broj teoretskih stupnjeva ekstrakcije prvo je potrebno nacrtati radni pravac nagiba $1/S$, koji prolazi točkama (X_F, Y_1) i (X_N, Y_0) . Tada se počevši od sastava pojne smjese crtaju pravokutni trokuti između radnog pravca i ravnotežne krivulje sve do željenog sastava rafinata.



Slika 7.10. Ravnotežni dijagrami (protustrujni kontakt faza): a) $Y = f(X)$, b) ternarni dijagram

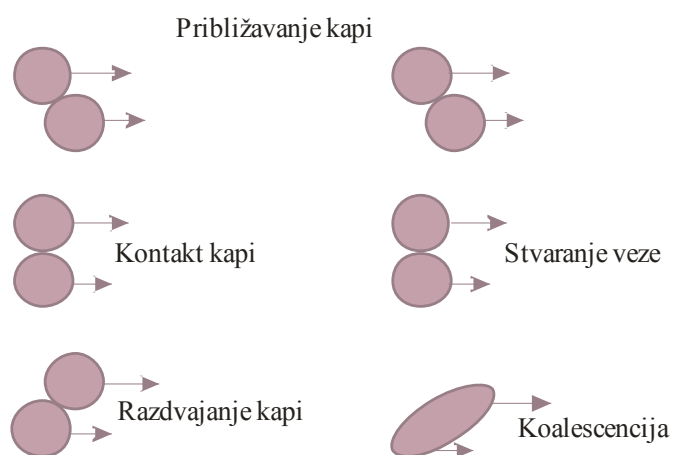
Ako se neki problem treba riješiti pomoću ternarnog dijagrama (slika 7.10. b), protoci su izraženi položajem točke M koja predstavlja fiktivni ukupni sastav smjese i određuju se korištenjem pravila poluge. Potrebni broj stupnjeva određuje se crtanjem veznih linija sve do postizanja željenog sastava

rafinata. Točka P naziva se ekstrakcijski pol i nalazi se u sjecištu pravca koji prolazi kroz točke F i E_1 te pravca kroz točke R_N i B. Kroz pol prolaze linije koje karakteriziraju sastav rafinata na nekom stupnju i sastav ekstrakta na sljedećem stupnju. Broj veznih linija određuje teoretski broj stupnjeva ekstrakcije.

Za dani ekstrakcijski faktor i isti broj koncentracijskih stupnjeva efikasniji je protustrujni način rada.

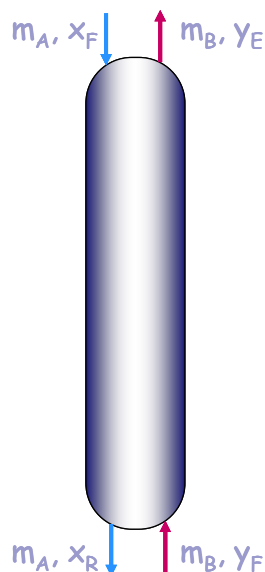
7.5.4. Kontinuirana kolonska ekstrakcija

Kod kontinuirane protustrujne kolonske ekstrakcije teža faza uvodi se na vrhu kolone, a lakša faza na dnu kolone. Pod utjecajem gravitacije, zatim teža faza struji prema dnu, a lakša prema vrhu kolone. Pri tome se jedna faza dispergira u kapljice i kao takva struji kroz drugu, kontinuiranu fazu kako bi se osigurala dobra turbulencija i velika međufazna površina za prijenos tvari. Disperzna faza (prisutna u obliku kapi) je uglavnom prisutna u manjem volumnom udjelu od kontinuirane faze. Miješanje je odgovorno za prevođenje jedne faze u kapljice, disperziju, koalescenciju te suspendiranje kapi u kontinuiranoj fazi. Nedovoljan intenzitet miješanja neće osigurati potpunu disperziju faze, a preintenzivno miješanje rezultat će stvaranjem emulzije koju je teško razdvojiti. Povećanje specifične međufazne površine ostvaruje se na različite načine, o čemu će se nešto više reći kasnije u poglavlju vezanom za ekstraktore. Kako kapljice struje kroz kontinuiranu fazu, otopljena komponenta zbog povoljnih hidrodinamičkih uvjeta prelazi iz primarnog u sekundarno otapalo. Brzina prijenosa tvari je veća ako je sustav sklon koalescenciji obzirom da se faze dodatno miješaju. Naime ako je sustav sklon koalescenciji, kapi će nakon što se približe spojiti, a koncentracije će im se izjednačiti. Kada takva veća kap dođe u područje većih smičnih naprezanja (npr. u blizinu miješala) ponovno će se dispergirati.



Slika 7.11. Koalescencija

Protustrujnim kontaktom faza ostvaruju se visoki koncentracijski gradijenti između ulaznih i izlaznih tokova, što rezultira rafinatom visoke čistoće.



Slika 7.12. Kontinuirana kolonska ekstrakcija

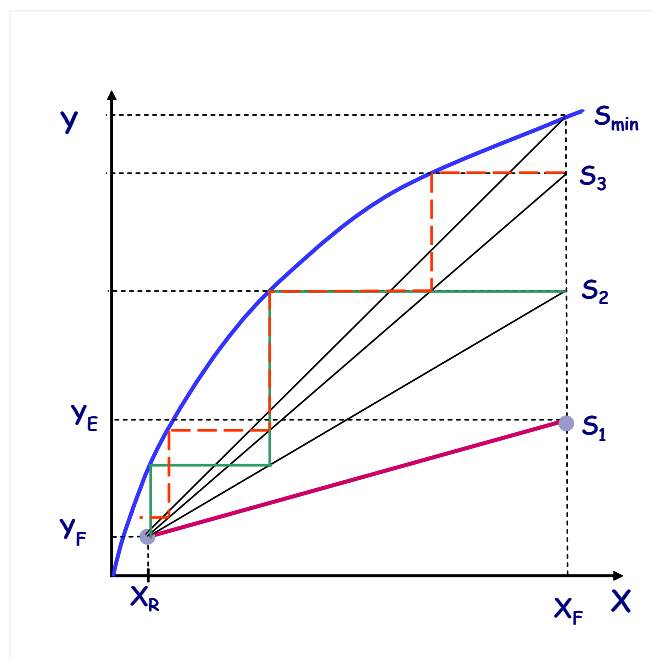
Bilanca tvari:

$$m_A X_F + m_B Y_F = m_A X_R + m_B Y_E \quad (7.15.)$$

Jednadžba radnog pravca:

$$Y_E = \frac{1}{S} \cdot (X_F - X_R) + Y_F \quad (7.16.)$$

Ravnotežni dijagram i odgovarajući radni pravac te način određivanja potrebnog broja koncentracijskih stupnjeva isti je kao i kod višestupnjevite protustrujne ekstrakcije (slika 7.10.). Na analogan se način i proces prikazuje u ternarnom dijagramu.



Slika 7.13. Utjecaj solvent odnosa na broj koncentracijskih stupnjeva

Na slici 7.13. prikazan je utjecaj solvent odnosa na potreban broj koncentracijskih stupnjeva i sastav ekstraktne faze. Vidi se da porastom solvent odnosa za željenu čistoću rafinata, nagib radnog pravca opada a broj koncentracijskih stupnjeva također opada. Naime, kako raste solvent odnos masa sekundarnog otapala sve je veća, pa sekundarno otapalo može primiti veću količinu otopljene komponente. Za minimalni solvent odnos, radni pravac siječe ravnotežnu krivulju u sastavu pojne smjese, a broj potrebnih koncentracijskih stupnjeva teži u beskonačnost. To je analogno, uvjetima provedbe destilacije uz minimalni refluksni omjer.

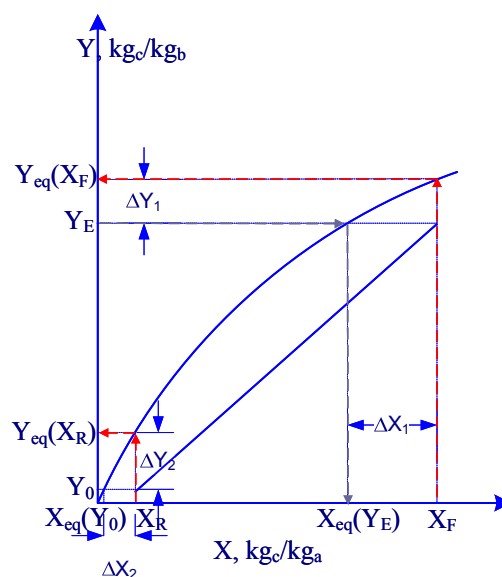
Minimalni solvent odnos može se izračunati iz bilance tvari:

$$m_A X_F + m_{B,\min} Y_F = m_A X_R + m_{B,\min} Y_{eq}(X_F) \quad (7.17.)$$

$$S_{\min} = \frac{(X_F - X_R)}{Y_{eq}(X_F) - Y_F} \quad (7.18.)$$

7.5.4.1. Određivanje pokretačke sile kod kolonske ekstrakcije

Pokretačka sila procesa prijenosa tvari može se izraziti obzirom na rafinatnu (jednadžba 7.17.) i ekstraktnu (jednadžba 7.18.) fazu, kao srednja logaritamska razlika lokalnih maksimalno mogućih pokretačkih sila na vrhu i dnu kolone. Maksimalno moguća razlika koncentracija odgovara razlici koncentracije jedne faze i odgovarajuće ravnotežne koncentracije u drugoj fazi na istom dijelu kolone (vrh ili dno). Tako da bi se odredila lokalna pokretačka sila obzirom na rafinatnu fazu, potrebno je očitati sa ravnotežnog dijagrama koncentracije koje su u ravnoteži sa ekstraktnom fazom. Za vrh kolone (prema slici 7.14.) gdje izlazi ekstraktna faza, očita se $X_{eq}(Y_E)$, a za dno kolone gdje ulazi ekstraktna faza, očita se $X_{eq}(Y_F)$. Na analogan se način odrede $Y_{eq}(X_F)$ te $Y_{eq}(X_R)$ ako se računa pokretačka sila obzirom na ekstraktnu fazu.



Slika 7.14. Određivanje pokretačke sile kod kolonske ekstrakcije

$$\Delta X_{LM} = \frac{(X_F - X_{eq}(Y_E)) - (X_R - X_{eq}(Y_F))}{\ln\left(\frac{(X_F - X_{eq}(Y_E))}{(X_R - X_{eq}(Y_F))}\right)} = \frac{\Delta X_1 - \Delta X_2}{\ln\left(\frac{\Delta X_1}{\Delta X_2}\right)} \quad (7.19.)$$

$$\Delta Y_{LM} = \frac{(Y_{eq}(X_F) - Y_E) - (Y_{eq}(X_R) - Y_F)}{\ln\left(\frac{(Y_{eq}(X_F) - Y_E)}{(Y_{eq}(X_R) - Y_F)}\right)} = \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{\ln\left(\frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}\right)} \quad (7.20.)$$

ovdje su:

ΔX i ΔY - ostvarena promjena koncentracije rafinatne, odnosno ekstraktne faze

ΔX_{LM} i ΔY_{LM} odgovarajuće pokretačke sile procesa prijenosa tvari.

7.5.4.2. Određivanje broja potrebnih koncentracijskih stupnjeva

Brzina prijenosa tvari po jedinici površine, odnosno gustoća toka tvari može se za rafinatnu i ekstraktnu fazu izraziti klasičnom kinetičkom jednadžbom:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{M}_c}{A} = K_R \cdot (x - x_{eq}) \cdot \rho_R \quad (7.21.)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{M}_c}{A} = K_E \cdot (y_{eq} - y) \cdot \rho_E \quad (7.22.)$$

Ovdje su:

m_c – gustoća toka prenesene tvari iz rafinatne u ekstraktnu fazu, kg/sm²

M_c – količina prenesene tvari iz rafinatne u ekstraktnu fazu, kg/s

K_R, K_E - koeficijenti prijenosa tvari u rafinatnoj i ekstraktnoj fazi, m/s

x, y, x_{eq}, y_{eq} - sastavi rafinatne i ekstraktne faze i odgovarajuće ravnotežne vrijednosti

ρ_R, ρ_E - gustoće rafinata i ekstrakta, kg/m³

Brzina prijenosa tvari u elementu visine dH :

$$d\dot{M}_c = K_R \cdot a \cdot (x - x_{eq}) \cdot \rho_R \cdot dH \cdot A_K \quad (7.23.)$$

$$d\dot{M}_c = K_E \cdot a \cdot (y_{eq} - y) \cdot \rho_E \cdot dH \cdot A_K \quad (7.24.)$$

Ovdje su:

a - specifična međufazna površina, m²/m³

dH - element visine kolone, m

A_K – površina poprečnog presjeka kolone, m²

Može se pisati da je:

$$dM_c = \dot{M}_A \cdot dx = \dot{M}_B \cdot dy \quad (7.25.)$$

Izjednačavanjem jednadžbi toka i bilancne jednadžbe, dobiva se izraz koji definira broj jedinica prijenosa tvari:

$$\dot{M}_A \cdot dx = K_R \cdot a \cdot (x - x_{eq}) \cdot \rho_R \cdot dH \cdot A_K \quad (7.26.)$$

$$\frac{K_R \cdot a \cdot \rho_R \cdot A_K}{\dot{M}_A} \cdot dH = \frac{dx}{(x - x_{eq})} \quad (7.27.)$$

Kako je volumni protok jednak:

$$\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho} \quad (7.28.)$$

Dobiva se:

$$\frac{K_R \cdot a \cdot A_K \cdot H}{\dot{V}_A} = \int_{x_R}^{x_F} \frac{dx}{(x - x_{eq})} = NTU_R \quad (7.29.)$$

Na analogan se način dolazi i do izraza za broj koncentracijskih stupnjeva (jedinica prijenosa tvari) za ekstraktnu fazu:

$$\frac{K_E \cdot a \cdot A_K \cdot H}{\dot{V}_B} = \int_{y_F}^{y_E} \frac{dy}{(y_{eq} - y)} = NTU_E \quad (7.30.)$$

Ovdje su:

V_A, V_B - volumni protoci rafinatne i ekstraktne faze.

$K_R \cdot a$ i $K_E \cdot a$ – koeficijenti kapaciteta kolone obzirom na rafinatnu i ekstraktnu fazu.

Poznavanjem ulaznih i izlaznih koncentracija obiju faza, kao i ravnotežu odabranog sustava, broj koncentracijskih stupnjeva, NTU, može se izračunati na sljedeći način:

$$NTU_R = \frac{X_F - X_R}{\Delta X_{lm}} \quad (7.31.)$$

$$NTU_E = \frac{Y_E - Y_F}{\Delta Y_{lm}} \quad (7.32.)$$

$\Delta X = X_F - X_R$ i $\Delta Y = Y_E - Y_F$ su ostvarene promjene koncentracija rafinatne i ekstraktne faze.

7.5.4.3. Visina jedinice prijenosa, HTU

Visina jedinice prijenosa, odnosno jednog koncentracijskog stupnja može se izračunati prema:

$$HTU_R = \frac{H}{NTU_R} = \frac{v_R}{K_R \cdot a} \quad (7.33.)$$

$$HTU_E = \frac{H}{NTU_E} = \frac{v_E}{K_E \cdot a} \quad (7.34.)$$

Ovdje su:

H – visina kolone, m

v_R, v_E – brzine strujanja rafinatne i ekstraktne faze, m/s.

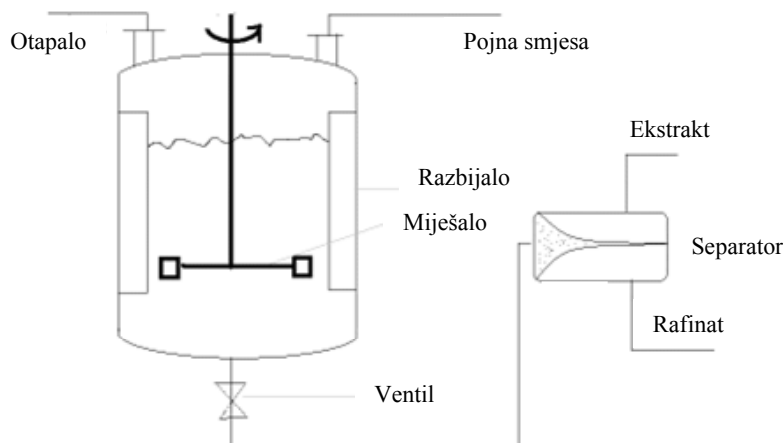
Brzina strujanja neke faze ovisi o volumnom protoku. Veća brzina strujanja rezultira većom visinom koncentracijskog stupnja, odnosno većom visinom kolone. S druge strane, povećati faktor kapaciteta

znači povećati specifičnu međufaznu površinu (nasipna punila, miješanje). Obzirom da su otpori prijenosu tvari različiti na strani rafinatne i ekstraktne faze brojevi koncentracijskih stupnjeva, odnosno njihove visine biti će različite. Kako je ukupna brzina prijenosa tvari ograničena sporijim procesom, NTU i HTU je potrebno računati obzirom na fazu koja pruža veći otpor.

7.6. Ekstraktori

Industrijska oprema može se klasificirati u stupnjevite i kolonske ekstraktore. U stupnjevitom ekstraktoru faze se dovode u kontakt, miješaju sve do postizanja ravnoteže nakon čega se separiraju. Prednosti su jednostavan dizajn, nema aksijalnog miješanja i visoka efikasnost stupnja. Takve jedinice su velike obzirom da se separacija odvija nakon svakog stupnja. Kontinuirani ekstraktori su kompaktni i zauzimaju znatno manje prostora.

7.6.1. Miješalica-separator



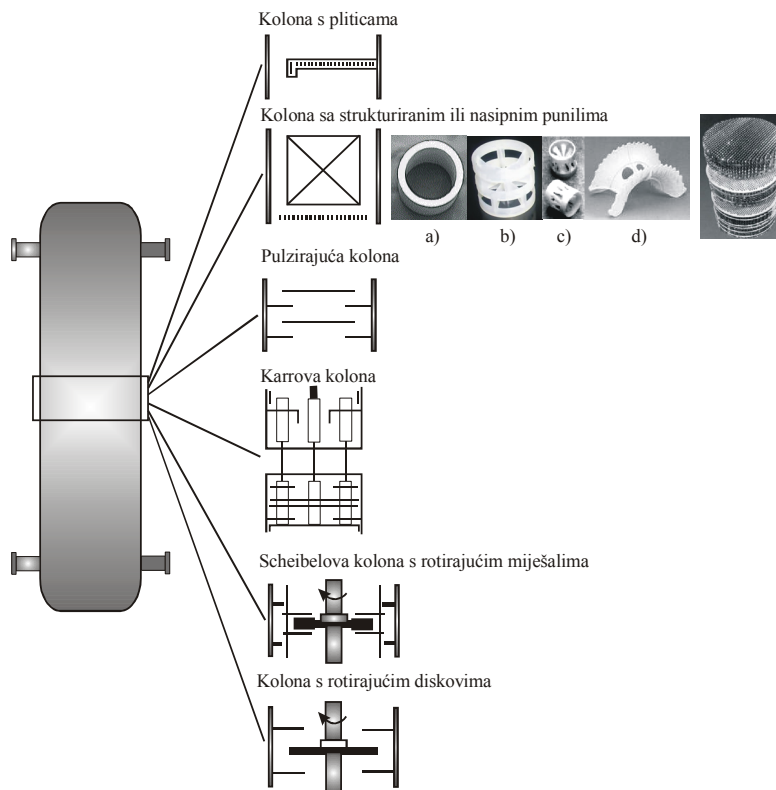
Slika 7.15. Miješalica-separator

Ovi se uređaji mogu koristiti kao jednostupnjeviti šaržni ili rade u kontinuiranom kaskadnom višestupnjevitom kontaktu. Miješalica-separator je vertikalna posuda opremljena propelerskim ili turbinskim miješalom. Faze se uvode na vrhu a izvode na dnu miješalice. U separatoru faza razdvajaju se rafinatna i ekstraktna faza. Osnovni nedostatak je veličina miješalice, zbog velikih volumena koji se moraju pročititi. Prednosti su velika efikasnost, fleksibilnost, mogućnost pročišćavanja otopina velikih viskoznosti, i velik kapacitet. Najčešće se koriste u metalnoj industriji gdje je potrebno intenzivno miješanje i dugo vrijeme zadržavanja.

7.6.2. Kolonski ekstraktori

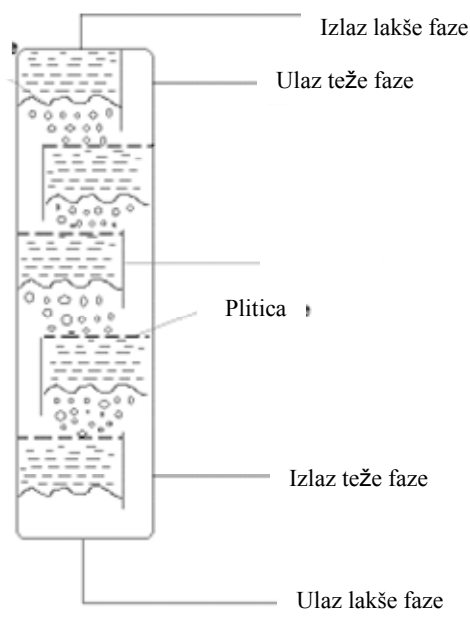
Mogu se koristiti za većinu sustava. Unutrašnjost kolona ispunjena je punilima, pliticama ili raspršivačima koji služe za povećanje površine izmjene tvari. Osim navedenih (statičkih) načina povećanja specifične međufazne površine, često se koriste i kolone s različitim načinima mehaničkog

miješanja. U takve se kolone ubrajaju kolone s miješalima, rotirajućim diskovima i pulzacijske kolone. Uobičajene izvedbe kolonskih ekstraktora prikazane su na slici 7.16. Pri izboru punila mora se odabrati materijal koji će kontinuirana faza dobro močiti. Tijekom strujanja dolazi do promjene protoka i fizikalnih svojstava faza, pa detaljan proračun to mora uzeti u obzir.



Slika 7.16. Izvedbe kolonskih ekstraktora

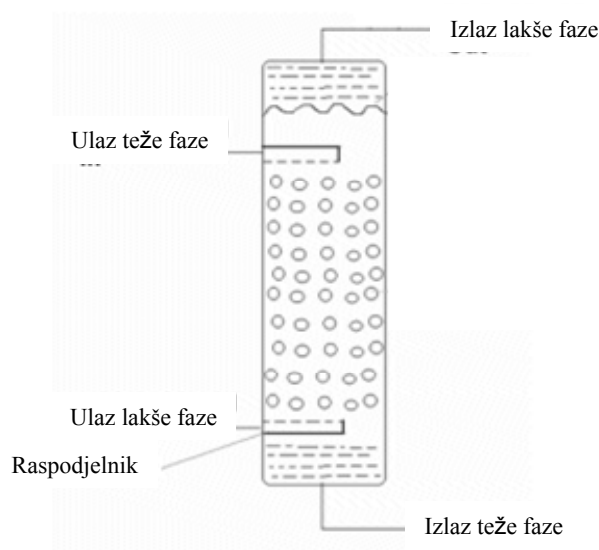
Kolone s pliticama



Slika 7.17. Kolona s pliticama

Višestupnjeviti protustrujni kontaktori u kojima se kontinuirana faza miješa u aksijalnom smjeru. Do disperzije dolazi na svakom stupnju čime je osiguran dobar prijenos tvari. Vrlo su djelotvorne pogotovo sa sustavima malih površinskih napetosti obzirom na efikasnost. Otvori na pliticama su veličine 1,5 to 4,5 mm na pliticama 150-600 mm. Položaj plitica je isti kao u kolonama za separaciju plinovito-kapljevito. Lakša se faza uvodi na dnu kolone a teža na vrhu, prolazi kroz otvore na pliticama čime se stvaraju fine kapljice. Kapljice prolaze kroz kontinuiranu fazu dolazi do koalescencije u sloju ispod gornje plitice i ponovno se dispergiraju pri prolasku kroz pliticu. Teža kontinuirana faza uvodi se na vrhu kolone, prolazi duž svake plitice i slijeva na sljedeću pliticu.

Kolone s raspršivanjem



Slika 7.18. Kolona s raspršivanjem

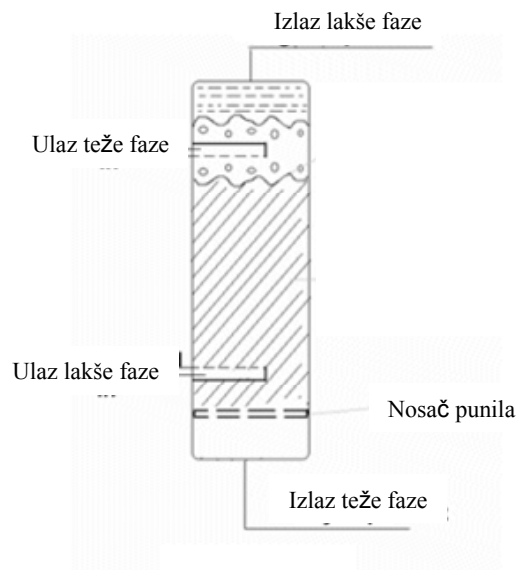
Ovi se uređaji sastoje od prazne kolone s otvorima za ulazne i izlazne struje obje faze. Obzirom da se radi o praznoj koloni dolazi do strujanja u aksijalnom smjeru zbog čega nije moguće ostvariti više od dva koncentracijska stupnja. Kod takvih kolona bilo koja faza može biti disperzna faza. Ukoliko je lakša faza disperzna, lakša se faza uvodi preko mlaznice na dnu kolone, kapljice struje kroz kontinuiranu fazu i pri vrhu kolone dolazi do koalescencije.

Ako je teža faza disperzna, ona se uvodi na vrhu kolone također preko mlaznice, a do koalescencije dolazi na dnu kolone gdje se teža faza izvodi van. Osnovna je prednost ovakvih kolona jednostavna izvedba i mogućnost velikih protoka. Nedostatak je miješanje u aksijalnom smjeru te potreba za visokim kolonama kako bi se ostvario željeni stupanj separacije. Zbog preslabe turbulencije ovakve kolone imaju malu efikasnost.

Kolone s punilima

U kolonama s punilima lakša je faza dispergirana u težoj kontinuiranoj fazi. Kolona je ispunjena nasipnim punilima različitih geometrijskih oblika koja drži nosač punila (plitica).

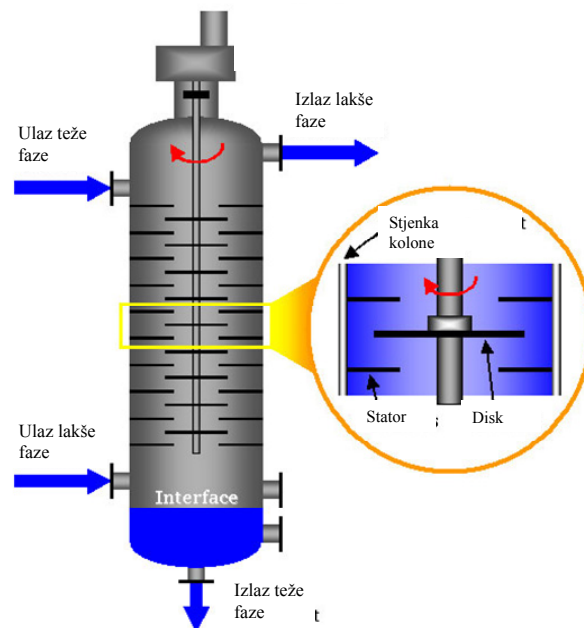
Veći udio šupljina ispunjen je kontinuiranom fazom koja struji prema dnu kolone. Ostali dio šupljina ispunjen je kapljicama koje struje prema vrhu gdje dolazi do koalescencije. Materijal za punila mora biti odabran tako da ga dobro moči kontinuirana faza. Punila osiguravaju veliku površinu izmjene tvari između faza koje su u kontaktu. Brzina prijenosa tvari veća je nego u kolonama s raspršivanjem obzirom da punila umanjuju recirkulaciju kontinuirane faze u koloni. Međutim, kolone s punilima nisu pogodne za nečiste faze, suspenzije te viskozne otopine.



Slika 7.19. Kolona s punilima

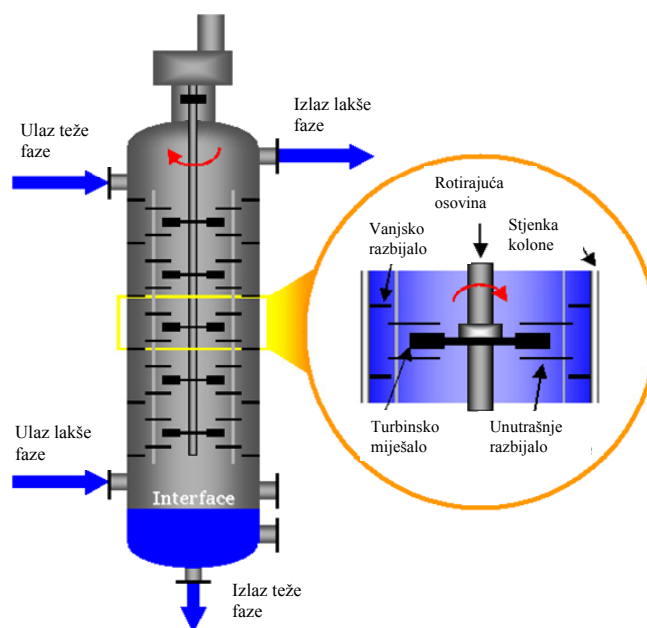
Kolona s rotirajućim diskovima

U ovim se kolonama miješanje ostvaruje pomoću rotirajućih diskova koji rade sa znatno većim intenzitetom miješanja od turbinskih miješala. Diskovi rotiranjem ostvaruju visok stupanj turbulencije pri čemu se kapljevina dispergira i usmjerava prema stjenci kolone. Značajke ovih kolona su visoka efikasnost, mali radni troškovi te zadovoljavajući kapacitet. Osnovni je nedostatak što se ne može koristiti za agresivne kapljevine zbog opasnosti uništavanja unutrašnjih dijelova kolone.



Slika 7.20. Kolona s rotirajućim diskovima

Kolona s rotirajućim miješalima

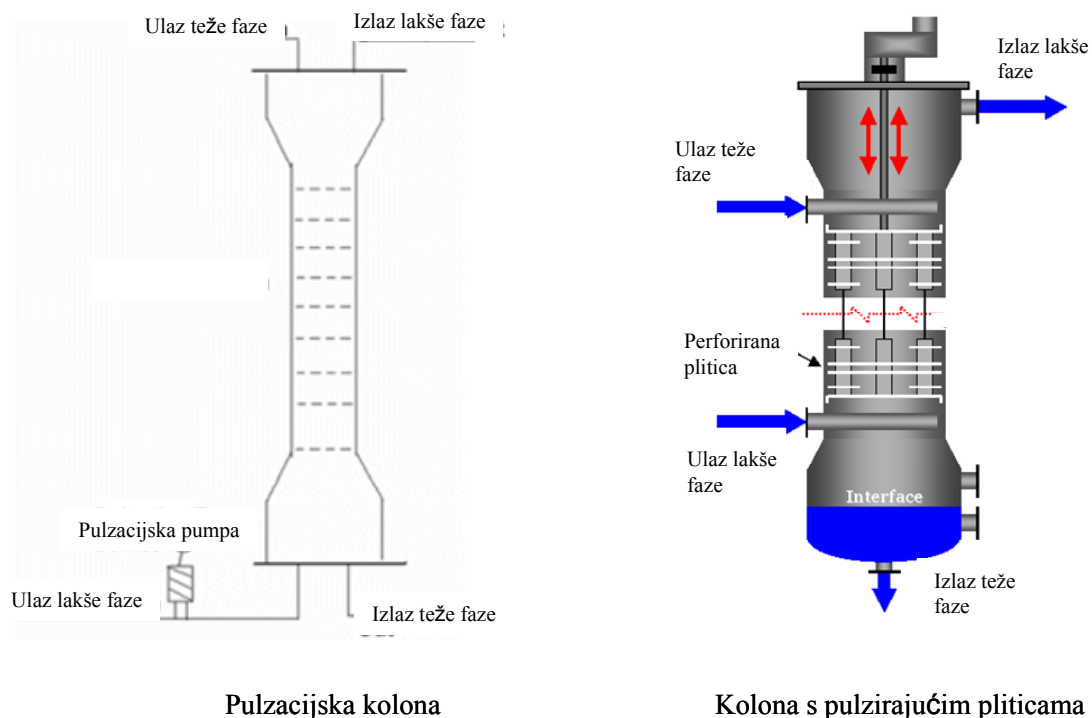


Slika 7.21. Kolona s rotirajućim miješalima

Bolji kontakt faza i povećanje specifične međufazne površine ostvaruje se turbinskim miješalima postavljenim na definiranoj međusobnoj udaljenosti. Kao i ostale kolone s miješanjem imaju mogućnost prilagodbe unutrašnje geometrije varijabilnim procesnim uvjetima (visok stupanj fleksibilnosti). Miješanje u radijalnom smjeru je kontrolirano, a efikasnost uređaja je velika.

Pulzirajuće kolone

Pulzacija cijelog sadržaja kolone ostvaruje se pulzacijskom pumpom. Pulzacijska kolona sa sitastim pliticama je kolona ispunjena velikim brojem perforiranih plitica čije su perforacije manje od onih u kolonama koje ne pulziraju (promjera 1,5-3,0 mm). Zbog pulzacija lakša se faza dispergira. Kolona nema pokretnih dijelova, udio miješanja u aksijalnom smjeru je zanemarljiv, a efikasnost je visoka. Pulzacijska kolona zahtjeva samo 1/3 koncentracijskih stupnjeva u usporedbi sa statičkom kolonom. Osim plitica može biti ispunjena i nasipnim punilima. Poseban slučaj je kolona s pulzacijskim pliticama (Karrova kolona) kod koje pulziraju perforirane plitice. Povećava se turbulencija i specifična međufazna površina. Uspješna i za male površinske napetosti.



Pulzacijska kolona

Kolona s pulzirajućim pliticama

Slika 7.22. Pulzirajuće kolone

Centrifugalni ekstraktori

Prednost ovih ekstraktora je velika brzina miješanja i vrlo kratko vrijeme zadržavanja. Uglavnom rade u jednom stupnju, iako u novije vrijeme i kao višestupnjeviti. Pogodni su za sustave kod kojih je razlika gustoća manja od 4%. Ostvaruju se velike međufazne površine i mali otpori prijenosu tvari (Farmaceutska industrija).



Slika 7.23. Centrifugalni ekstraktor

7.6.3. Faktori koji utječu na odabir uređaja

Pri odabiru ekstraktora mora se uzeti u obzir: potreba za višestupnjevitim radom, svojstva fluida, procesni uvjeti. U tablici 7.2. dane su osnovne karakteristike različitih vrsta ekstraktora.

Tablica 7.2. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta ekstraktora

Ekstraktor	Prednosti	Nedostaci
Miješalica-separator	Efikasne Dobar kontakt faza Višestupnjeviti rad	Puno prostora zauzima Visoki investicijski troškovi Visoki radni troškovi
Kolone bez miješanja	Mali investicijski troškovi Mali radni troškovi	Velika visina kolone Teško uvećanje procesa Manja efikasnost od šaržne
Kolone s miješanjem	Dobra disperzija Mali investicijski troškovi Višestupnjeviti rad	Zahtjeva velike razlike gustoća Ne može raditi uz velike omjere protoka
Centrifugalni ekstraktori	Mala razlika gustoća Kratko vrijeme zadržavanja	Visoki investicijski troškovi Visoki radni troškovi Skupo održavanje Mali broj stupnjeva

Svojstvo	Miješalica-separator	Centrifugalni ekstraktori	Kolone bez miješanja	Kolone s miješanjem
Broj stupnjeva	Mali	Mali	Srednji	veliki
Protoci	Veliki	Mali	Srednji	Srednji
Vrijeme zadržavanja	Vrlo veliko	Vrlo malo	Srednje	Srednji
Napetost površine	Srednja do velika	Srednja do velika	Srednja do velika	Srednja do velika
Viskoznost	Bez ograničenja	Srednja do velika	Srednja do velika	Bez ograničenja
Razlika gustoća	Bez ograničenja	Srednja do velika	Srednja do velika	Bez ograničenja
Prostor koji zauzima	veliki	srednje	mali	mali

7.6.4. Optimalan rad ekstraktora

Osnovna funkcija ekstraktora je da dobro izmiješa dvije faze u svrhu postizanja stabilne disperzije, te da na kraju separira smjesu. Prilikom projektiranja i optimiranja rada ekstraktora u obzir se moraju uzeti: miješanje i razdvajanje faza.

Miješanje

Potreban intenzitet miješanja definiran je fizikalnim svojstvima fluida kao što su viskoznost, površinska napetost i razlika gustoća dvije faze. Potrebno je osigurati točno definiranu brzinu vrtnje miješala. Naime, preslabo miješanje rezultira lošim hidrodinamičkim uvjetima te stvaranjem prevelikih kapljica zbog čega je međufazna površina premala. Posljedica toga je mala brzina prijenosa tvari i mala efikasnost stupnja separacije. S druge strane preintenzivnim miješanjem, iako se smanjuju otpori prijenosu tvari tijekom ekstrakcije, mogu nastati premalene kapljice ili emulzija koja se teško razdvaja. Nastale kapljice nisu jednolike veličine, već imaju određenu raspodjelu veličina kapi. Ravnoteža je definirana najvećom kapljicom, a najmanja kap kontrolira brzinu taloženja. Zbog toga preintenzivno miješanje često rezultira težom separacijom faza.

Statičke kolone se oslanjaju na konfiguraciju unutrašnjosti kolone (punila, plitice) te brzine strujanja fluida kroz šupljine zbog čega nastaje turbulencija i disperzija. Kolone s miješanjem puno su fleksibilnije jer se intenzitet miješanja može mijenjati. Do pada efikasnosti dolazi zbog miješanja u aksijalnom smjeru. Kako bi se smanjilo aksijalno miješanje ugrađuju se razbijala. Osim toga važno je izbjeći temperaturne gradijente kako bi se spriječio doprinos aksijalnom miješanju zbog toplinskih struja.

Separacija faza

Karakteristike taloženja također ovise o svojstvima fluida i intenzitetu miješanja. Ako se miješanje prekine, dolazi do razdvajanja (taloženja) u šaržnim ekstraktorima. U kolonama postoje sekcije u kojima je osigurano taloženje ili su izvan kolone postavljeni separatori. Ukoliko dolazi do stvaranja emulzija za separaciju faza mora biti osigurano dovoljno vrijeme. Emulzije se stvaraju zbog preintenzivnog miješanja ili zbog nečistoća i aditiva koji smanjuju površinsku napetost. Ponekad se dodaju koagulanti kako bi se spriječila ili umanjila emulzifikacija. U kolonama s miješanjem zadovoljavajuća raspodjela veličina kapi može se postići pri manjim intenzitetima miješanja pa je opasnost od stvaranja emulzija manja.

Odabir faze koja će biti kontinuirana a koja disperzna ima veliki utjecaj na stvaranje emulzija. Inverzijom faza ili promjenom radne temperature često je moguće izbjeći stvaranje emulzija.

Faza manje viskoznosti (manji otpori prijenosu količine gibanja) uglavnom se odabire za kontinuiranu fazu. Faza većeg protoka može se dispergirati čime se osigurava velika međufazna površina i turbulencija. To se osigurava odabirom materijala od kojeg je izrađena kolona i punila. Vodena faza dobro moći metalne površine a organska faza nemetalne. Promjena protoka duž kolone također se može uzeti u obzir. U šaržnim uređajima faza koja je prisutna u većem volumenu predstavlja kontinuiranu fazu.

POPIS SIMBOLA

a	- specifična međufazna površina, m^2/m^3
A	- površina, m^2
B	- brzina nukleacije, broj nukleusa/ m^3s
B	- molni protok donjeg produkta destilacije, mol/s
c	- masena ili molna koncentracija, kg/m^3 , mol/m^3
c_p	- specifični toplinski kapacitet, J/kgK
d	- promjer kolone, m
D	- difuzijski koeficijent, m^2/s
D	- molni protok destilata, mol/s
E	- toplinska efikasnost sušionika
E	- ekstrakcijski faktor
F	- sila, N
F	- molni protok pojne smjese, mol/s
g	- specifični protok suhog zraka, kg_{sz}/kg_w
G	- linearna brzina rasta, m/s
G	- površinski maseni protok, kg/m^2s
ΔG	- slobodna Gibbsova energija, J/kg
h, H	- entalpija kapljevine i pare, J/kg
H	- visina kolone, m
H	- Henryjeva konstanta, mmHg
HTU	- visina jedinice prijenosa, m
k	- koeficijent prijenosa tvari, m/s
k_g	- konstanta rasta kristala
K	- ukupni koeficijent prijenosa tvari, m/s
K	- koeficijent prolaza topline, W/m^2K
K^*	- koeficijent raspodjele
$K \cdot a$	- koeficijent kapaciteta kolone, 1/s
ℓ	- debljina stjenke, m
L	- duljina, m
L	- linearna dimenzija kristala, m
L	- refluks, mol/s
m	- masa, kg
\dot{m}	- maseni protok, kg/s
$\dot{m} \cdot c_p$	- vodena vrijednost fluida, W/K
M	- molna masa, kg/kmol
\dot{n}	- molni protok, mol/s
N	- broj stupnjeva
NTU	- broj jedinica prijenosa (broj koncentracijskih stupnjeva)
p	- parcijalni tlak, Pa
P	- ukupni tlak, Pa
$q(x)$	- funkcija raspodjele veličina čestica ili pora
\underline{Q}	- toplinski tok, W
$\underline{Q}(x)$	- komulativna funkcija raspodjele veličina čestica ili pora
r	- polumjer, m
R	- plinska konstanta (8,314 J/K mol)
R	- refluksni omjer
R	- regeneracija
R	- gustoća toka vlage, kg/m^2s
R_f	- Fouling faktor, otpor naslaga
R_G	- masena brzina rasta, kg/m^2s
S	- omjer prezasićenosti

S	- solvent odnos, kg/kg
t	- vrijeme, s
T	- temperatura, °C, K
v	- brzina, m/s
v	- specifični volumen, m ³ /kg
V	- volumni protok, m ³ /s
x	- maseni ili molni udio teže faze
x	- linearna dimenzija (veličina čestice), m
X	- maseni ili molni odnos komponente u težoj fazi, kg/kg, mol/mol
X	- sadržaj vlage materijala, kg _v /kg _{sm}
X_B	- vezana vlaga, kg _v /kg _{sm}
X_{NB}	- nevezana vlaga, kg _v /kg _{sm}
X_T	- ukupni sadržaj vlage materijala, kg _v /kg _{sm}
X_{kr}	- omjer molnih masa nehidratizirane i hidratizirane soli
y	- maseni ili molni udio lakše faze
Y	- maseni ili molni odnos komponente u lakšoj fazi, kg/kg, mol/mol
Y	- apsolutna vlažnost zraka, kg _v /kg _{sz}
$Y\%$	- postotna vlažnost zraka
W	- brzina vrtnje miješala, s ⁻¹

Grčka slova:

α	- volumni faktor oblika
α	- relativna hlapivost
α	- relativni koeficijent raspodjele
α	- koeficijent prijelaza topline, W/m ² K
β	- površinski faktor oblika
δ	- debljina graničnog sloja, m
ε	- poroznost
γ	- masena koncentracija, kg/m ³
λ	- latentna toplina isparavanja, J/kg
λ	- koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
λ_k	- toplina kristalizacije, J/kg, J/mol
ρ_T	- gustoća suspenzije, kg/m ³
ρ	- gustoća, kg/m ³
σ	- relativna prezasićenost, relativna pothladenost
q	- specifični utrošak topline u teoretskom sušioniku, kJ/kg _v
η	- viskoznost, Pas
φ	- relativna vlažnost zraka

Indeksi:

0	- početni
az	- adijabatsko zasićenje
az	- azeotrop
A	- primarno otapalo
B	- sekundarno otapalo
B	- donji produkt
c	- kritični
d	- difuzija
D	- destilat
eff	- efektivni
eq	- ravnotežni
E	- ekstrakt

F	- pojna smjesa
g	- koeficijent rasta
G	- granica faza
G	- plin
H	- hladni fluid
i	- komponenta i
isp	- isparavanje
iz	- izlaz
j	- stupanj
I	- faza I
II	- faza II
k	- kristal
kond	- kondenzator
K	- kristal
L	- kapljevina
max	- maksimalno
min	- minimalno
MT	- mokri termometar
n	- broj koncentracijskog stupnja
op	- ogrjevna para
p	- tlak
r	- ugradnja u kristalnu rešetku
R	- rosište
R	- rafinat
sm	- suhi materijal
sr	- srednji
std	- referentno otapalo
sz	- suhi zrak
S	- površina
ST	- suhi termometar
T	- teoretski
T	- topli fluid
uk	- ukupni
ul	- ulaz
v	- vrelište
v	- voda
vz	- vlažni zrak
V	- para
V	- volumen
Y	- apsolutna vlažnost

POPIS LITERATURE

- ▶ R.S.Brodkey, H.C.Hershey, Transport phenomena, A Unified Approach, McGraw-Hill Book company, New York,
- ▶ J.M. Coulson and J.F.Richardson, Chemical Engineering, Vol two, Pergamon Press, Oxford, 1978
- ▶ A.W.Francis, Liquid-liquid equilibriums, Interscience publishers, New York, 1963
- ▶ C.J.Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1978
- ▶ J.H.Lienhard, A Heat Transfer Textbook
- ▶ W.L.McCabe, J.C.Smith, Unit operations of chemical engineering, McGraw-Hill Book company, New York, 1967
- ▶ A.S. Mujumdar, Handbook of industrial drying, Marcel Dekker, Inc, new York, 1995
- ▶ A.S.Myerson, Handbook of industrial crystallization, Butterworth-Heinemann, Woburn, 2002
- ▶ K.F.Pavlov, P.G.Romanov, A.A.Noskov, Examples and problems to the course of unit operations of chemical engineering, Mir publishers, Moscow, 1979
- ▶ D.R.Pitts, L.E.Sissom, Theory and problems of heat transfer, McGraw-Hill Book company, New York, 1977
- ▶ K.Ražnjevič, Termodinamičke tablice, Narodna tehnika Hrvatske, Zagreb, 1989
- ▶ A. Sander, Predavanja iz Toplinskog procesnog inženjerstva
- ▶ K.Satler, H.J.Feindt, Thermal Separation Processes – Principles and Design, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1995
- ▶ J.D.Seader, E.J.Henley, Separation process principles, John Wiley&Sons, Inc., Danvers, 2006
- ▶ A.H.P.Skelland, Diffusional mass transfer, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1974
- ▶ R.E.Treybal, Liquid Extraction, McGraw-Hill Book company, New York, 1963
- ▶ F.H.H.Valentin, Absorption in gas-liquid dispersions: Some aspects of Bubble technology, E.&F.N.Spon Ltd, London, 1967
- ▶ Chemical engineers' handbook, McGraw-Hill Book company, New York, 1963
- ▶ Kemijski priručnik