

# RAVNOTEŽA I PRORAČUN BROJA STUPNJEVA U OPERACIJI EKSTRAKCIJE ČVRSTO-TEČNO

Vladan Mičić<sup>1</sup>, Žika Lepojević<sup>2</sup>, Aleksandar Tolić<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tehnološki fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup> Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

<sup>3</sup> Metalurško – tehnološki fakultet Podgorica, Univerzitet u Crnoj Gori, Crna Gora

ISSN 2232-755X

UDC: 633.17-152.75

DOI: 10.7251/GHTE1309067M

Stručni rad

U praksi ekstrakcije čvrsto – tečno posebnu primenu imaju unakrsni, protivstrujni i šaržno protivstrujni tipovi ekstrakcije pa je i ovde njima posvećena pažnja. Ukazano je na osnovne operacione principe ovih tipova ekstrakcije. Razmatrana je ravnoteža u sistemu čvrsto – tečno za koju se pretpostavlja da se može svesti na trokomponentni sistem, pri čemu se dati sistem prikazuje u pravouglom dijagramu. Umesto složenih numeričkih postupaka, koji u osnovi zahtevaju razvoj programa za elektronski računar, ovde je prikazan jednostavan grafički postupak proračuna broja realnih stupnjeva koji se zasniva na primeni modifikovane metode Ponchon Savarita. Dati postupak je prikazan za slučaj jednostepenog kontakta kao i za slučajeve višestepenog unakrsnog i protivstrujnog kontakta. Selektovan je primer proračuna višestepene ekstrakcije čvrsto – tečno i na njemu prikazana primena i korišćenje opisanog grafičkog postupka.

**Ključne reči:** ekstrakcija, ravnoteža, čvrsto, tečno, kontakt

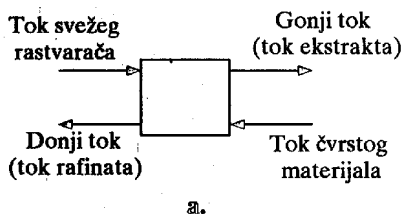
## 1. UVOD

U operaciji ekstrakcije čvrsto-tečno, koja se još često naziva operacija luženja, izdvajaju se iz čvrstog materijala jedna ili više komponenti pomoću odabranog rastvarača - ekstragensa. Stepem izdvajanja pojedinih komponenata, odnosno rastvoraka (ovaj termin se takođe često koristi), zavisi od osobina odabranog rastvarača.

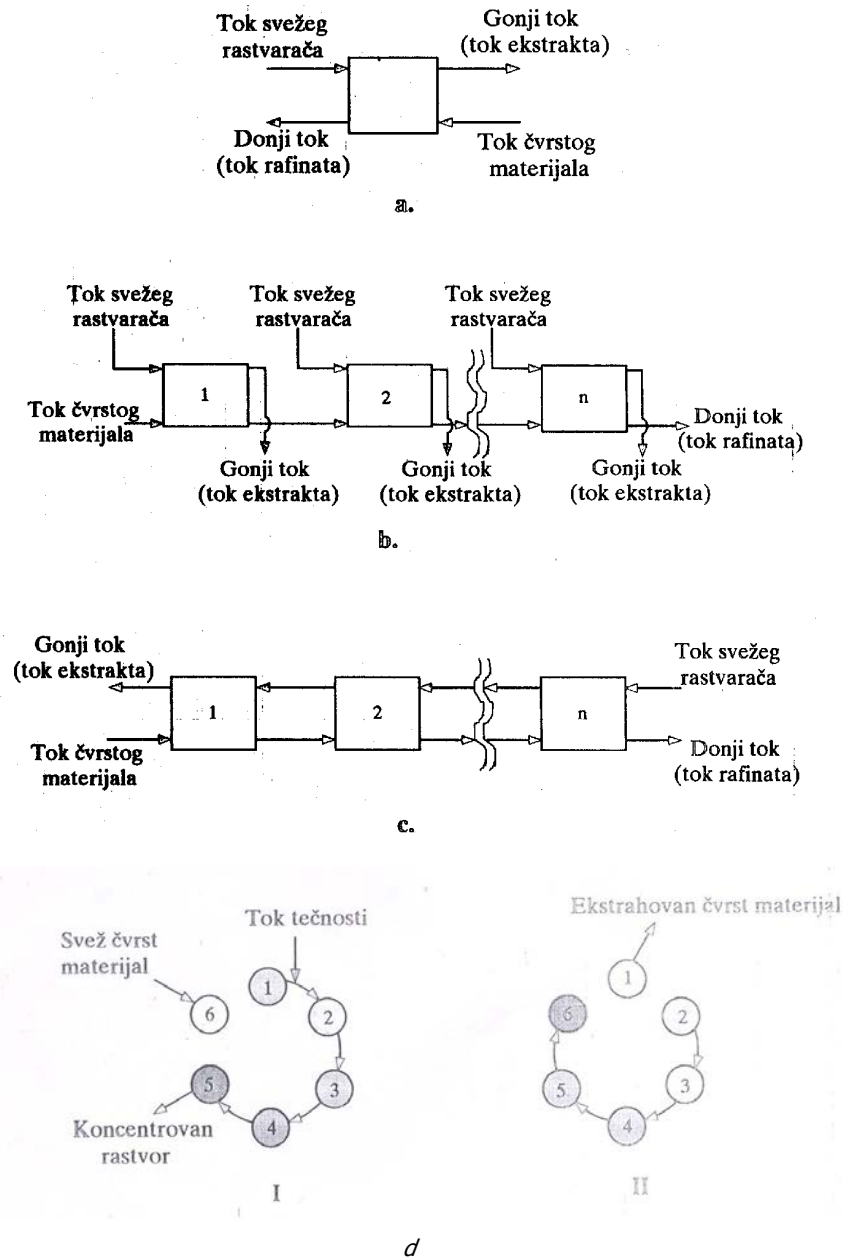
Operacija ekstrakcije čvrsto-tečno se svrstava, zajedno sa operacijom ekstrakcije tečno-tečno, u grupu separacionih operacija, koje se često nazivaju ekstrakcione operacije, tako da se može koristiti analogija prenosa koja važi za sve operacije prenosa mase, a posebno analogija sa operacijom ekstrakcije tečno-tečno.

## 2. TIPOVI OPERACIJA EKSTRAKCIJE ČVRSTO-TEČNO

Karakteristična su četiri tipa operacije ekstrakcije čvrsto-tečno i to: jednostepeni kontakt, unakrsni višestepeni kontakt, protivstrujni višestepeni kontakt i šaržni protivstrujni kontakt. Shematski prikaz tokova faza za sva četiri tipa, zajeno sa osnovnim oznakama i nazivima, dati su na slici 1.



\* Korespondentni autor: Vladan Mičić, Tehnološki fakultet Zvornik, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, e-mail: [micicvladan@yahoo.com](mailto:micicvladan@yahoo.com)



Slika 1. Tipovi operacije ekstrakcije čvrsto-tečno: a. jedinični stupanj; b. unakrsna operacija, c. protivstrujna operacija, d. šaržno-protivstrujna operacija  
 Figure 1. Types of solid-liquid extraction: a. single stage, b. cross operation, c. counter-current operation, d. batch-counter-current operation

Treba napomenuti da se u operaciji ekstrakcije čvrsto-tečno za tok rastvarača obogaćenog željenom komponentom - rastvorkom, češće koristi naziv gonji tok, odnosno tok ekstrakta kako je to uobičajeno u ekstrakciji tečno-tečno i analogno tome, tok u kome se nalazi čvrst materijal osiromašen rastvorkom, češće se naziva donji tok, odnosno tok rafinata [1-5]. Međutim, ovde će se ipak koristiti termini tok ili faza ekstrakta i tok ili faza rafinata, jer su analogni terminima u ekstrakciji tečno-tečno [6-8].

Saglasno operaciji ekstrakcije tečno-tečno [6, 7], a i drugim operacijama prenosa mase [1, 2, 8], ukoliko su izlazni tokovi iz stupnja u međusobnoj ravnoteži, onda je takav stupanj ravnotežni odnosno idealan (ovaj termin ima potpunije značenje) [6], jer se u njemu postiže maksimalni prenos mase, tako da mu je efikasnost potpuna, odnosno 100% (ili 1 ukoliko se računa od 0 do 1). Pri tome se pretpostavlja da su faze bile dovoljno dugo u kontaktu i da su u stupnju obezbeđeni takvi uslovi mehaničke separacije faza, pri kojima odlazeći tokovi ne sadrže u sebi drugu fazu [1,

2]. Međutim, u praksi je efikasnost stupnja manja od 100%, kako zbog nedovoljnog vremena kontakta faza kada može doći do nedovoljnog rastvaranja rastvorka, tako i zbog toga što je često nepraktično težiti perfektnoj mehaničkoj separaciji faza - što znači da u praksi faza rafinata sadrži pored čvrste faze i nešto tečnosti u kojoj je rastvoren rastvorak. U slučaju kada dolazi do adsorpcije rastvorka u čvrstoj fazi, čak i u uslovima kada se postigne ravnoteža između faza, nedovoljno razdvajanje faza će rezultovati u smanjenu efikasnosti stupnja.

U praksi ekstrakcije čvrsto-tečno posebnu primenu imaju unakrsni, protivstrujni i šaržno protivstrujni tipovi ekstrakcije, te će se stoga ovde ukazati na osnovne operacione principe ovih tipova ekstrakcije. Pri unakrsnoj višestepenoj ekstrakciji čvrsto-tečno (slika 1 b), svež rastvarač se dovodi u svaki stupanj u kontakt sa čvrstim materijalom koji se nakon ekstrakcije transportuje u sledeći stupanj, pri čemu se čvrsti materijal kreće od prvog ka zadnjem stupnju. Kod ovog tipa ekstrakcije može se postići visoko izdvajanje rastvorka iz čvrstog materijala koji napušta zadnji stupanj odnosno finalnog rafinata.

Pri protivstrujnoj višestepenoj ekstrakciji čvrsto-tečno (slika 1 c), vrši se protivstrujno kretanje rastvarača i čvrstog materijala kroz bateriju stupnjeva, pri čemu se u svakom stupnju ostvaruje njihov kontakt. Kod ovoga tipa ekstrakcije može se postići visok sadržaj rastvorka u finalnom toku ekstrakta.

Pri šaržnoj protivstrujnoj višestepenoj ekstrakciji čvrsto-tečno (slika 1 d), koristi se Shank-ov sistem [1-4] operacija sa rastvorom i čvrstim materijalom u bateriji stupnjeva. Pri tome su značajne sledeće faze postupka:

Saglasno slici 1 dI, stupanj 6 je prazan, dok se u stupnjima 1-5 nalazi čvrst materijal u rastvaraču. Pošto se pretpostavlja da je ceo sistem bio prethodno u radu, to sledi: a) da je čvrst materijal u stupnju 5 najmanje ekstrahovan, jer je taj stupanj najkraće vreme u radu, a u stupnju 1 najviše ekstrahovan, jer je taj stupanj najduže u radu; b) da je svež rastvarač u stupnju 1 i da sadržaj rastvorka raste od stupnja 1 ka stupnju 5, pri čemu je u stupnju 5 rastvor u kontaktu sa praktično svežim čvrstim materijalom;

Nakon određenog vremena trajanja operacije ekstrakcije izvlači se rastvor iz stupnja 5, transportuje rastvor iz stupnja 4 u 5, iz 3 u 4, iz 2 u 3 i iz 1 u 2, i uvodi svež čvrst materijal u stupanj 6.

Saglasno slici 1 dII, ekstrahovani čvrst materijal se izvlači iz stupnja 1, a rastvor se prebacuje iz stupnja 5 u 6, iz 4 u 5 i iz 3 u 4, i dovodi svež rastvarač u stupanj 2;

Navedene faze se ponavljaju u više ciklusa.

Ovakav sistem operacije predstavlja simulaciju višekomponentne protivstrujne ekstrakcije, tako da nakon nekoliko ciklusa sadržaj rastvorka u tečnoj i čvrstoj fazi je veoma blizak odgovarajućim vrednostima sadržaja u protivstrujnoj višestepenoj ekstrakciji čvrsto-tečno. Međutim, broj stupnjeva koji se koristi u šaržnom tipu ekstrakcije i koji se u praksi kreće najčešće između 6-16, je uvek manji od broja stupnjeva koji se koriste u odgovarajućem protivstrujnom tipu ekstrakcije za određeni ekstrakcioni postupak [2].

### 3. RAVNOTEŽNI PODACI

U praksi ekstrakcije čvrsto-tečno u osnovi se koriste ravnotežni podaci dobijeni pri uslovima praktične ravnoteže, koji stoga obuhvataju, delimično ili potpuno, neefikasnosti stupnja, te se tako dobijeni podaci nazivaju praktični ravnotežni podaci [1, 2, 8]. Pri tome se polazi od pretpostavke da se posmatrani ekstrakcioni sistem čvrsto-tečno, može svesti na trokomponentni (uslovno označene sa A, B, C) - koji sadrži rastvarač A, nerastvornu čvrstu materiju B i komponentu koja se rastvara - rastvorak C. Dobijeni ravnotežni podaci mogu se prikazati u različitim tipovima dijagrama, pri čemu se u ekstrakciji čvrsto-tečno najčešće koriste pravougli dijagrami i pravougli trougaoni dijagrami, zbog mogućnosti slobodnog izbora razmere svake od ordinata.

U opštem slučaju koordinate pravouglog dijagrama, koji će ovde biti i jedino razmatran, prikazanog na slici 2, mogu se definisati sledećim izrazima:

$$X = \frac{X_C}{X_A + X_C} \quad \text{u fazi rafinata} \quad (1)$$

$$Y = \frac{Y_C}{Y_A + Y_C} \quad \text{u fazi ekstrakta} \quad (2)$$

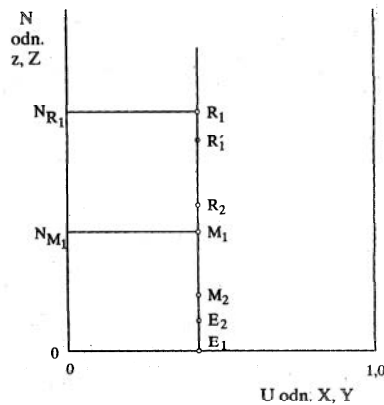
$$z = \frac{X_B}{X_A + X_C} \quad \text{u fazi rafinata} \quad (3)$$

$$Z = \frac{Y_B}{Y_A + Y_C} \quad \text{u fazi ekstrakta} \quad (4)$$

pri čemu je:

$X_A, X_B, X_C$  - sadržaj komponenta A, B i C u fazi rafinata, izražen u masenim udelima,

$Y_A, Y_B, Y_C$  - sadržaj komponenta A, B i C u fazi ekstrakta, izražen u masenim udelima.



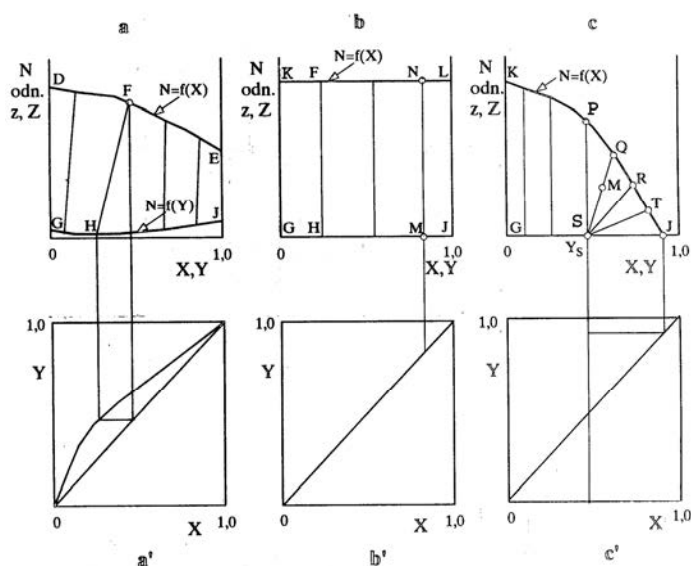
Slika 2. Pravougli dijagram za sistem čvrsto-tečno  
Figure 2. Rectangular diagram for solid-liquid system

Radi jednostavnosti označavanja u literaturi se često na mesto ordinata  $z, Z$  u pravouglim dijagramima koristi samo jedna oznaka i to vrlo često  $N$ , mada bi analogno ovom, trebalo da se i za koordinate  $X, Y$  koristi jedna oznaka (npr. neka to bude  $U$ ), što se inače ređe čini, ovde će se i ta mogućnost koristiti. Pri tome se mora imati u vidu da se i  $N$  i  $U$  odnose, ili na fazu ekstrakta, ili na fazu rafinata.

U ravnotežna smeša, koja predstavlja suspenziju čvrstog materijala iz koga se ekstrakcijom izdvaja rastvorak i tečnosti u kojoj se nalazi rastvorak rastvoren u rastvaraču, predstavljena je tačkom  $M$  na slici 2, pri čemu je sadržaj bistrog rastvora  $Y_1$  a odnos nerastvornog dela čvrstog materijala prema rastvoru  $N_{M_1}$  ( $z_{M_1}$ ). Ukoliko se pretpostavi da nema adsorpcije rastvorka na čvrstom materijalu i dozvoli smeši da se faze razdvoje (neka je vreme potrebno za razdvajanje faza  $\theta_1$ ), onda će se dobiti bistra tečnost, koja je na slici 2 prikazana tačkom  $E_1$  i ugušćena suspenzija, odnosno mulj, prikazana na slici 2 tačkom  $R_1$ , a koju čini nerastvoran čvrst materijal suspendovan u maloj količini rastvora, čiji je sastav isti kao i bistrte tečnosti, tako da je  $Y = X$ . Linija  $E_1R_1$  na slici 2 je vertikalna, a predstavlja spojnicu ravnoteže, odnosno spojnu liniju, jer spaja dve uravnotežene faze  $E_1$  i  $R_1$ . Inače, sastav ugušćene suspenzije, odnosno mulja, zavisi od dužine vremena razdvajanja faza, tako da se pri kraćem vremenu razdvajanja faza (neka je to  $\theta'_1$ , pri čemu je  $\theta'_1 < \theta_1$ ), dobija ugušćena faza, odnosno mulj, što je na slici 2 prikazano tačkom  $R'_1$ . To znači da se u ovom slučaju polazna smeša  $M_1$  razlaže na bistar rastvor  $E_1$  i gustu suspenziju, odnosno mulj,  $R'_1$ . Pošto sadržaj nerastvornog čvrstog materijala u ugušćenoj suspenziji (mulju) zavisi od početnog sadržaja suspenzije, to će se smeša  $M_2$ , prikazana na slici 2, razdvojiti nakon vremena  $\theta_1$  na gustu suspenziju, odnosno mulj,  $R_2$  i rastvor  $E_2$ , koji se nalazi na apscisnoj osi, jer sadrži čvrstu fazu, ili dispergovanu ili delimično rastvorenu.

Pošto razdvajanje faza zavisi od niza faktora, a prvenstveno od karakteristika taloženja (pre svega, od viskoziteta i gustine tečnosti u kojoj je čvrst materijal suspendovan, uz napomenu da ove osobine zavise od sastava rastvora), to se često pristupa dobijanju eksperimentalnih podataka o zavisnosti promene sadržaja ugušćene suspenzije od sadržaja rastvora, što ustvari predstavlja praktične ravnotežne podatke koji se mogu ucrtati u dijagram stanja i na osnovu njih mogu se konstruisati ravnotežne krive i spojnice ravnoteže. Međutim, ovi podaci moraju biti dobijeni pri eksperimentalnim uslovima koji odgovaraju uslovima rada realne operacije ekstrakcije, pri čemu treba obratiti posebnu pažnju na vreme kontakta, temperaturu, sadržaj faza, agitaciju i veličinu čestica čvrstog materijala.

Ovde će biti prikazana tri karakteristična tipa ravnoteže kod čvrsto-tečnih ekstrakcionih sistema (slika 3).



Slika 3. Tipovi ravnoteže u ekstrakcionom sistemu čvrsto-tečno  
Figure 3. Types of equilibrium in the solid-liquid extraction system

Na slici 3 a, prikazani su ravnotežni podaci za slučaj kada se rastvorak C neograničeno rastvara u rastvaraču A, tako da X i Y uzimaju vrednosti od 0 do 1,0. Primer takvog sistema je suncokretovo ulje C - suncokretovo brašno B - heksan A, a njega karakteriše neograničena rastvorljivost ulja u heksanu. Kriva DFE predstavlja sastave faze rafinata - pod uslovima koji se stvarno očekuju u praksi, a kriva GHJ predstavlja sastave faze ekstrakta, tako da se ovako dobijeni rezultati mogu smatrati praktičnim ravnotežnim podacima. Pošto sastav izdvojenog rastvora leži iznad  $N=0$ , odnosno iznad apscisne ose, to se može smatrati da je, ili čvrsta komponenta B delimično rastvorena u rastvaraču, ili da je vreme razdvajanja faza nedovoljno. Spojne linije (npr. FH) nisu vertikalne, što je posledica ili nedovoljnog vremena kontakta, ili pojave adsorpcije rastvorka C u nerastvornoj čvrstoj fazi B, ili rastvorljivosti rastvorka C u nerastvornom čvrstom materijalu B, čime se uzrokuje neujednačena raspodela rastvorka C između faza. Ravnotežni podaci prikazani u pravouglom dijagramu na slici 3a, mogu se projektovati u dijagram X, Y i dobiti ravnotežna kriva, kao što je prikazano na slici 3a'. Na slici 3b prikazani su podaci za slučaj kada ne dolazi do adsorpcije rastvorka C, tako da je sastav izdvojenog rastvora isti kao i sastav rastvora koji se nalazi u ugušćenoj suspenziji, odnosno mulju, te su spojne linije (npr. FH i NM) vertikalne, pa se ovako dobijeni podaci mogu smatrati idealnim ravnotežnim podacima. Iz tih razloga je ravnotežna kriva, prikazana na slici 3b', prava linija sa nagibom  $0,785 \text{ rad}$  ( $45^\circ$ ), tako da je koeficijent raspodele ( $m$ ), koji predstavlja odnos sadržaja rastvorka C u fazama ekstrakta i rafinata ( $m=Y/X$ ), jednak jedinici ( $m=1,0$ ). Pošto je linija KL, koja predstavlja sastave izdvojene faze rafinata horizontalna, to je postignut isti stepen taloženja čvrstog materijala pri svim sadržajima rastvorka. Analogno ovom ponašanju, pošto se linija GJ, koja predstavlja sastave izdvojene faze ekstrakta, poklapa sa apscisom dijagrama, to znači da je pri svim sadržajima rastvorka C dobijena bistra faza ekstrakta koja ne sadrži nerastvoran materijal B, niti suspendovan, niti rastvoren.

Na slici 3 c prikazan je slučaj kada rastvorak C ima određenu rastvorljivost ( $Y_s$ ) u rastvaraču A. Ovo znači da se ne može dobiti bistar rastvor, ukoliko je sadržaj rastvorka C veći od  $Y_s$ , jer se u toj oblasti spojne linije (na primer SP, SQ, ST) moraju da seku u tački S. To znači da će se ma koja smeša u oblasti desno od linije PS razdvojiti na bistar zasićen rastvor S i ugušćenu suspenziju (mulj) Q, čiji će sastav zavisiti od položaja tačke M. Tačka J na slici 3 c predstavlja sadržaj rastvorene čvrste materije B u rastvoru A+C. Pošto su spojnice levo od linije PS na slici 3 c vertikalne, to znači da u toj oblasti nema adsorpcije rastvorka od strane nerastvornog čvrstog materijala, pa je koeficijent raspodele ( $m=Y/X$ ) jednak jedinici ( $m=1,0$ ), a pošto se linija GS, koja u toj oblasti predstavlja sastave faze ekstrakta, poklapa sa apscisnom osom dijagrama, to znači da se u toj oblasti dobija bistra ekstraktna faza. Ravnotežna linija koja odgovara slici 3c, data je na slici 3c', a nju karakteriše uslov da je  $Y=X$ , odnosno da je koeficijent raspodele ( $m$ ) jednak jedinici ( $m=1,0$ ), znači, radi se o idealnoj ravnotežnoj raspodeli rastvorka u sistemu čvrsto-tečno.

#### 4. PRORAČUN BROJA STUPNJEVA

Analogno operaciji ekstrakcije tečno-tečno [6, 7] i drugim separacionim operacijama [1], proračun broja stupnjeva u operaciji ekstrakcije čvrsto-tečno zasniva se, ili na računskim, ili na grafičkim postupcima [1-5]. Od računskih postupaka najjednostavniji je analitički postupak, ali je njegova primena ograničena na jednostavne slučajeve ekstrakcije [1-4], dok su numerički postupci znatno složeniji, ali njihova primena nije ograničena uslovima ekstrakcije [1-4]. Postavljanjem programa na elektronskom računaru, korišćenje numeričkih postupaka se značajno pojednostavljuje. Međutim, u slučajevima kada programi i/ili elektronski računari nisu raspoloživi, korišćenje grafičkih postupaka postaje posebno značajno, jer njihova primena nije komplikovana, a ni ograničena uslovima ekstrakcije. Iz

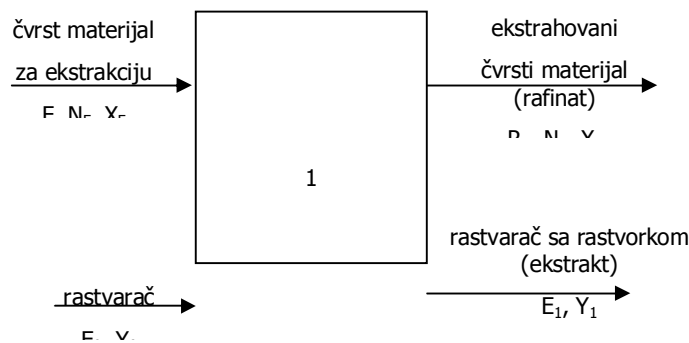
tih razloga ovde će se pokloniti pažnja grafičkom postupku proračuna broja stupnjeva. Pošto se u ekstrakciji čvrsto-tečno, najčešće koriste praktični ravnotežni podaci, to na osnovu njih proračunati ravnotežni stupnjevi neće biti idealni sa efikasnošću 100%, već sa nižom efikasnošću, koja će sa manjim ili većim stepenom odgovarati efikasnosti realnog stupnja, što naravno zavisi od uslova pri kojima su praktični ravnotežni podaci dobijeni.

#### 4.1. Grafički postupak proračuna broja stupnjeva

Analogno ekstrakciji tečno-tečno [6-8] i drugim separacionim operacijama [1], razvijeni su brojni postupci za grafički proračun broja stupnjeva u ekstrakciji čvrsto-tečno [1-5]. Međutim, često korišćeni postupak je ipak onaj koji se zasniva na primeni modifikovane metode Ponchon-Savarit-a [1-4], a koji koristi pravougli dijagram N,U. Iz tih razloga će i ovde pažnja biti poklonjena ovom postupku i on će biti posebno prikazan za jednostupni, višestepeni unakrsni i višestepeni protivstrujni tip ekstrakcije čvrsto-tečno.

##### 4.1.1. Jednostepeni kontakt

Jednostepeni kontakt sa materijalnim tokovima (ili količinama, ukoliko se ne radi o kontinualnom, već o šaržnom postupku) i njihovi sadržaji, dat je na slici 4. Pri tome je pretpostavljeno da se celokupna operacija ekstrakcije čvrsto-tečno, uključujući kako mešanje ulaznih faza u stupanj, tako i mehaničku separaciju odlazećih faza iz stupnja nakon ekstrakcije, obavlja u stupnju i da celokupna količina čvrstog materijala za koji se smatra da je nerastvoran ostaje u fazi rafinata.



Slika 4. Shematski prikaz jednostepene ekstrakcije čvrsto-tečno  
Figure 4. Diagram for single-stage solid-liquid extraction

U slučaju stacionarnog prenosa mase, mogu se postaviti sledeće bilansne jednačine:

a) za materijalne tokove faza:

$$F + E_0 = R_1 + E_1 = M_1 \quad (5)$$

b) za nerastvorni materijal B:

$$B = N_F F = R_1 N_1 \quad (6)$$

c) za rastvorak C:

$$F X_F + E_0 Y_0 = R_1 X_1 + E_1 Y_1 \quad (7)$$

d) za rastvarač A:

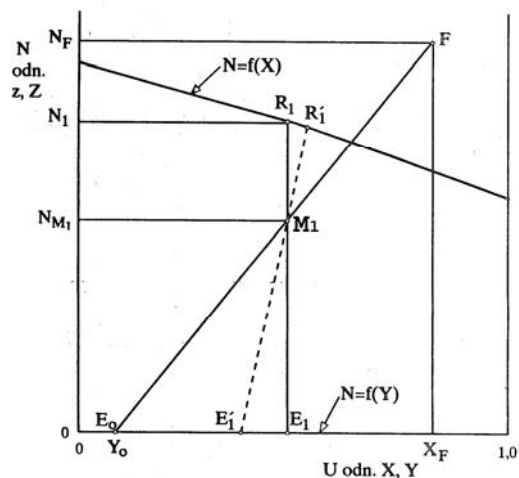
$$F(1 - X_F) + E_0(1 - Y_0) = R_1(1 - X_1) + E_1(1 - Y_1) \quad (8)$$

$M_1$  u jed. (5) predstavlja smešu dobijenu mešanjem faza F i  $E_0$ , koja se nakon uravnotežavanja faza razdvaja na faze  $E_1$  i  $R_1$  pri čemu je sastav ove smeše dat izrazima:

$$N_{M_1} = \frac{B}{F + E_0} = \frac{B}{M_1} \quad (9)$$

$$Y_{M_1} = \frac{F X_F + E_0 Y_0}{F + E_0} = \frac{F X_F + E_0 Y_0}{M_1} \quad (10)$$

Grafički prikaz određivanja izlaznih uravnoteženih faza ekstrakta i rafinata, koji se zasniva na izvedenim jednačinama, dat je na slici 5. Određivanjem izlaznih faza, određen je i sam stupanj. To znači da se postupak grafičkog određivanja stupnjeva u osnovi svodi na postupak određivanja izlaznih uravnoteženih faza iz stupnja.



Slika 5. Grafički prikaz jednostepene ekstrakcije čvrsto-tečno u pravouglom dijagramu  
Figure 5. Graphic representation of a single stage solid-liquid extraction in the rectangular diagram

Ulazne faze F i E<sub>0</sub> (ovde se pretpostavlja da E<sub>0</sub> u sebi sadrži nešto rastvorka, i to Y<sub>0</sub> se u stupnju dovode u kontakt formirajući smešu M<sub>1</sub>. Ova smeša mora biti na pravoj FE<sub>0</sub>, saglasno jed. (5), a njen položaj se određuje u dijagramu na osnovu pravila poluge, odnosno na osnovu jedne od sledećih jednačina:

$$F \times \overline{FE_0} = M_1 \times \overline{M_1E_0} \quad (11)$$

$$E_0 \times \overline{FE_0} = M_1 \times \overline{M_1F} \quad (12)$$

$$F \times \overline{M_1F} = E_0 \times \overline{M_1E_0} \quad (13)$$

pri čemu su:

$\overline{FE_0}$ ,  $\overline{M_1E_0}$ ,  $\overline{M_1F}$  - duži koje predstavljaju rastojanje na dijagramu od odgovarajućih tačaka.

Smeša M<sub>1</sub> se nakon kontakta u stupnju razdvaja na fazu ekstrakta E<sub>1</sub> i fazu rafinata R<sub>1</sub>. Ove faze se nalaze na spojnici ravnoteže E<sub>1</sub>R<sub>1</sub> jer su u međusobnoj ravnoteži. Pri tome E<sub>1</sub> mora biti na liniji N = f(Y), jer se na njoj nalaze sastavi uravnoteženih faza ekstrakta, a R<sub>1</sub> mora biti na liniji N = f(X), jer se na njoj nalaze sastavi uravnoteženih faza rafinata. Određivanjem sastava izlaznih faza iz stupnja u pravouglom dijagramu, određuje se sam stupanj.

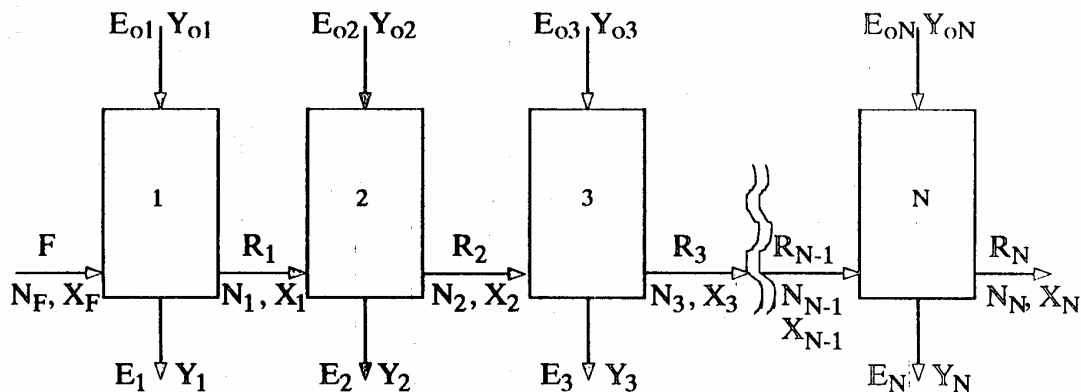
Treba napomenuti da se u principu do spojnice ravnoteže koja prolazi kroz određenu tačku (na dijagramu na slici 5 to je tačka M<sub>1</sub>) dolazi interpolacijom u dijagramu datih spojnice. Međutim, na dijagramu na slici 5 spojnice (osim E<sub>1</sub>R<sub>1</sub>) nisu ucrtane, da bi se grafički postupak konstrukcije učinio preglednijim.

U slučaju ako su ravnotežni podaci prikazani na slici 5, dobijeni eksperimentalno, nakon dugog vremena kontakta faza, može se pretpostaviti da do neefikasnosti može doći samo usled neadekvatne mehaničke separacije faza nakon ekstrakcije. Ukoliko bi se ekstrakcija vršila u realnom stupnju pod istim uslovima kao u pomenutom slučaju, ali samo sa kraćim vremenom kontakta faza u stupnju, onda sastavi izlaznih faza iz stupnja ne bi bili E<sub>1</sub> i R<sub>1</sub>, već E'<sub>1</sub> i R'<sub>1</sub>. To znači da će realni stupanj imati manju efikasnost od

ravnotežnog i ona se može izraziti na sledeći način, saglasno slici 5,  $\frac{X_F - X_1}{X_F - X_1'}$ .

#### 4.1.2. Višestepeni unakrsni kontakt

Shematski prikaz višestepene unakrsne ekstrakcije čvrsto-tečno, zajedno sa materijalnim tokovima faza (ili količinama, ukoliko se ne radi o kontinualnom, već o diskontinualnom - šaržnom postupku) i njihovim sadržajima, dat je na slici 6. Pri tome se pošlo od pretpostavke da se mešanje faza i njihovo mehaničko razdvajanje obavlja u stupnju, kao i da je čvrsta materija B nerastvorna i da stoga nije prisutna u fazi ekstrakta, koju čini bistar rastvor.

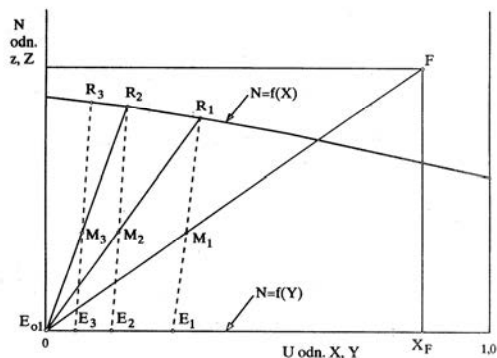


Slika 6. Shematski prikaz višestepene unakrsne ekstrakcije čvrsto-tečno ( $F$  - materijalni tok čvrstog materijala za ekstrakciju;  $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{0N}$  - materijalni tokovi rastvarača;  $R_1, R_2, R_3, R_{N-1}, R_N$  - materijalni tokovi čvrste materije nakon ekstrakcije, odnosno tok rafinata;  $E_1, E_2, E_3, E_N$  - materijalni tok rastvarača sa komponentom koja se ekstrahuje - rastvorkom, odnosno tok ekstrakta)

Figure 6. Schematic representation of multistage cross solid-liquid extraction ( $F$  - flow of solid extraction material;  $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{0N}$  - flow of solvents;  $R_1, R_2, R_3, R_{N-1}, R_N$  - flow of solid material after extraction;  $E_1, E_2, E_3, E_N$  - flow of solvent with extracted component - solute)

Grafički postupak proračuna stupnjeva u višestepenoj unakrsnoj ekstrakciji čvrsto-tečno, kao i u ekstrakciji tečno-tečno [6], svodi se na ponavljanje postupka za određivanje jediničnog stupnja. Određivanjem uravnoteženih faza koje izlaze iz stupnja određuje se stupanj.

Grafički postupak za određivanje tri stupnja kod višestepene unakrsne ekstrakcije čvrsto-tečno, prikazan je na slici 7, pri čemu je pretpostavljeno da se u svaki stupanj uvodi čist rastvarač ( $Y_{01}=Y_{02}=Y_{03}=0$ ). Preme ovom postupku se na osnovu sastava ulaznih faza u 1. stupanj  $E_{01}$  i  $F$ , konstruiše prava  $E_{01}F$ , a koristeći pravilo poluge se određuje položaj smeše  $M_1$  na pravoj  $E_{01}F$ . Konstrukcijom spojnice ravnoteže  $E_1R_1$  kroz tačku  $M_1$  (na osnovu raspoloživih spojnice koje obuhvataju tačku  $M_1$ , ali koje na dijagramu na slici 7 nisu ucrtane, zbog preglednosti konstrukcije grafičkog postupka), određuju se uravnotežene faze  $E_1$  i  $R_1$  koje izlaze iz stupnja 1, čime je stupanj 1 i definisan.



Slika 7. Grafički prikaz konstrukcije broja stupnjeva pri višestepenoj unakrsnoj ekstrakciji čvrsto-tečno (prikazana je konstrukcija tri stupnja, i to 1, 2 i 3;  $E_{0i}$  uzima vrednosti  $E_{01}, E_{02}, E_{03}$  za stupnjeve 1, 2, 3)

Figure 7. Graphic representation of construction stages at multistage cross solid-liquid extraction (construction is shown in three stages, 1, 2 and 3;  $E_{0i}$  takes the value of  $E_{01}, E_{02}, E_{03}$  for stages 1, 2, 3)

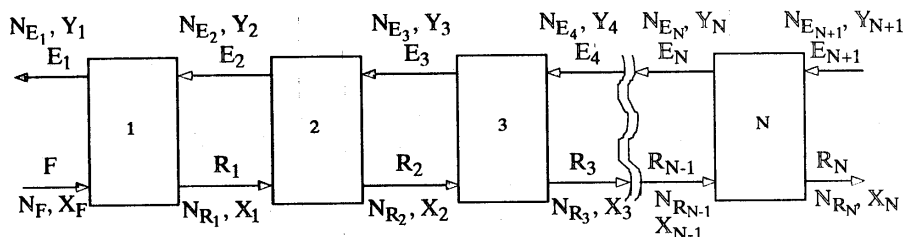


Na osnovu ulaznih tokova  $E_{02}$   $E_{0i}$  i  $R_1$  u stupanj 2, konstruiše se linija  $R_1E_{02}$   $R_1E_{0i}$ , na kojoj se određuje položaj smeše  $M_2$ , koristeći pravilo poluge. Konstrukcijom spojnice ravnoteže  $E_2R_2$ , kroz tačku  $M_2$ , određuju se uravnotežene faze koje izlaze iz "stupnja 2, čime je stupanj 2 određen.

Analogan postupak se primenjuje i za stupanj 3, gde se na osnovu ulaznih faza  $E_{03}$   $E_{0i}$  i  $R_2$ , konstruiše prava  $R_2E_{03}$   $R_2E_{0i}$  i na njoj određuje smeša  $M_3$ . Konstrukcijom spojnice ravnoteže  $R_3E_3$  kroz tačku  $M_3$ , određuju se uravnotežene faze  $E_3$  i  $R_3$ , koje izlaze iz stupnja 3, čime se određuje i sam stupanj 3.

#### 4.1.3. Višestepeni protivstrujni kontakt

Shematski prikaz višestepene protivstrujne ekstrakcije čvrsto-tečno zajedno sa materijalnim tokovima i njihovim sadržajima, dat je na slici 8. Pri tome je pretpostavljeno, da je čvrst materijal nerastvoran i da se ne gubi u rafinatnoj fazi, kao i da se kontakt faza i mehaničko razdvajanje faza obavlja u stupnju.



Slika 8. Shematski prikaz višestepene protivstrujne ekstrakcije čvrsto-tečno  
( $F$  - materijalni tok ulaznog čvrstog materijala za ekstrakciju;  $E_{N+1}$  - materijalni tok ulaznog rastvarača;  $R_1$   $R_2$   $R_3$   $R_{N-1}$   $R_N$  - materijalni tokovi čvrste materije u manjem ili većem stepenu ekstrahovane, odnosno materijalni tokovi rafinata iz stupnjeva 1, 2, 3,  $N-1$ ,  $N$ ;  $E_1$   $E_2$   $E_3$   $E_4$   $E_N$   $E_{N+1}$  - materijalni tokovi rastvarača sa većim ili manjim sadržajem komponente koja se ekstrahuje, odnosno materijalni tokovi ekstrakta iz stupnjeva 1, 2, 3, 4,  $N$ ; saglasno pretpostavci o nerastvorljivosti čvrste faze i bistroj tečnoj fazi, odnosno fazi rastvarača sa rastvorkom, sledi da je  $N_{E_1} = N_{E_2} = N_{E_3} = N_{E_4} = N_{E_N} = N_{E_{N+1}} = 0$ , što znači da su sve faze  $E$  na apscisnoj osi pravouglog dijagrama)

Figure 8. Schematic representation of multistage counter-current solid-liquid extraction  
( $F$  – flow of inlet solid extraction material,  $E_{N+1}$  – flow of inlet solvent;  $R_1$   $R_2$   $R_3$   $R_{N-1}$   $R_N$  – flow of solid material in lower or higher degree extracted, flow of raffinate streams in stages 1, 2, 3,  $N-1$ ,  $N$ ;  $E_1$   $E_2$   $E_3$   $E_4$   $E_N$   $E_{N+1}$  – flow of solvent with higher or lower content of extracted component, or flow of extract in stages 1, 2, 3, 4,  $N$ ; in accordance with assumption of insolubility of solid phase and the clear liquid phase or phase of solvent with the solute, it follows that  $N_{E_1} = N_{E_2} = N_{E_3} = N_{E_4} = N_{E_N} = N_{E_{N+1}} = 0$ , which means that all phases are  $E$  on  $x$  – axis of the rectangular diagram)

Polazeći od slike 8 i pretpostavljajući stacionaran prenos mase u bateriji stupnjeva, mogu se pretpostaviti sledeće bilansne jednačine:

a) za materijalne tokove na krajevima protivstrujne baterije:

$$F + E_{N+1} = R_N + E_1 = M \quad (14)$$

b) za rastvorak  $C$  u tokovima na krajevima protivstrujne baterije:

$$F \cdot X_F + E_{N+1} \cdot Y_{N+1} = R_N \cdot X_N + E_1 \cdot Y_1 = M \cdot X_M \quad (15)$$

pri čemu  $M$  označava materijalni tok smeše, koja se dobija iz materijalnih tokova  $F$  i  $E_{N+1}$ , a koja se nakon završene celokupne operacije u bateriji razdvaja na materijalne tokove  $R_N$  i  $E_1$ . Pri tome je sastav toka  $M$  određen sledećim izrazima:

$$N_M = \frac{B}{F + E_{N+1}} = \frac{B}{M} \quad (16)$$

$$X_M = \frac{FX_F + E_{N+1}Y_{N+1}}{F + E_{N+1}} = \frac{FX_F + E_{N+1}Y_{N+1}}{M} \quad (17)$$

Saglasno jed. (14),  $M$  mora da bude na liniji koja spaja ulazne tokove  $F$  i  $E_{N+1}$ , kao i na liniji koja spaja izlazne tokove  $R_N$  i  $E_1$ , što znači da se  $M$  nalazi na preseku ovih linija. Pri tome treba imati u vidu da su izlazni tokovi  $R_N$  i  $E_1$  ravnotežni ( $R_N$  sa  $E_N$ , a  $E_1$  sa  $R_1$ ) i da se moraju nalaziti na ravnotežnim linijama ( $R_N$  na  $N = f(X)$ , a  $E_1$  na  $N = f(Y)$ ).

Jed. (14) se može napisati i u obliku:

$$F - E_1 = R_N - E_{N+1} = P \quad (18)$$

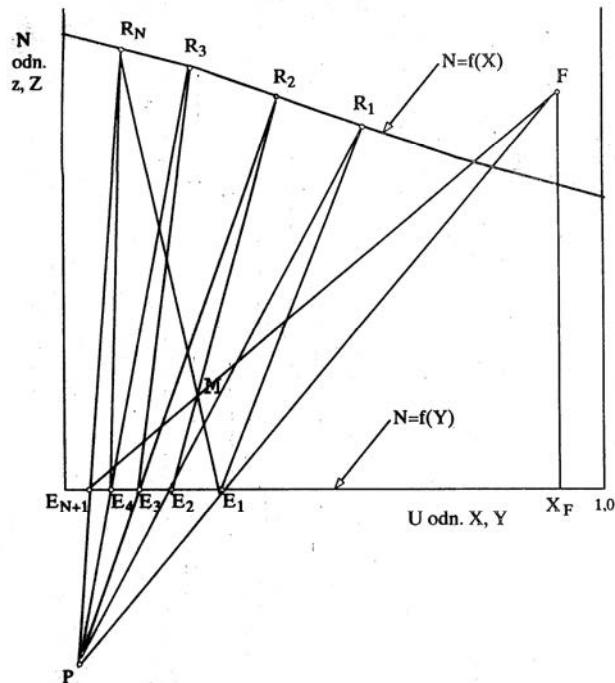
gde je sa P označena razlika između R i E u svakom stupnju. Tako, za stupanj 2 ona glasi:

$$F-E_1 = R_1-E_2 = P \quad (19)$$

a za stupanj 3:

$$F-E_1 = R_2-E_3 = P \quad (20)$$

Postupak grafičkog određivanja tačke P i broja stupnjeva u pravouglom dijagramu, dat je na slici 9.



Slika 9. Grafički prikaz konstrukcije broja stupnjeva pri protivstrujnoj ekstrakciji čvrsto-tečno  
Figure 9. Graphic representation of construction stage numbers in counter-current solid-liquid extraction

Tačka P na slici 9 je određena na preseku linija  $FE_1$  i  $R_N E_{N+1}$ . Konstrukcijom spojnice ravnoteže kroz tačku  $E_1$  koja se nalazi na spojnici  $E_1 R_1$ , određuje se  $R_1$ , a time i stupanj 1. Analogno ovom postupku, konstruiše se linija  $R_1 P$ , određuje  $E_2$  u preseku  $R_1 P$  i apscise, konstruiše spojnica ravnoteže  $E_2 R_2$  kroz tačku  $E_2$  i time određuje  $R_2$ , a samim tim i stupanj 2. Ovaj postupak se dalje ponavlja, sve dok se ne dostigne sastav izlaznog toka  $R_N$  iz stupnja N (na slici 9,  $R_N$  ustvari predstavlja  $R_4$ , dok  $E_{N+1}$  predstavlja  $E_5$ ).

Određeni stupnjevi po opisanom postupku na osnovu idealnih ravnotežnih podataka su idealni ili teorijski stupnjevi. Međutim, stupnjevi određeni na osnovu praktičnih ravnotežnih podataka su pre realni, nego idealni, jer je efikasnost stupnja, delimično ili potpuno uključena u praktične ravnotežne podatke, tako da u tom slučaju broj određenih stupnjeva mora biti celobrojna veličina. Ukoliko se to pri proračunu ne postigne, potrebno je određeno podešavanje sadržaja izlaznih tokova ili količine rastvarača, što zahteva primenu metode probe i greške.

Opisani grafički postupak, kao i prethodno opisani postupci za jednostepeni i višestepeni kontakt, dozvoljavaju primenu i na slučajevima kada čvrst materijal B nije potpuno nerastvoran [1], kao i na slučajevima kada prvi stupanj, ili bilo koji stupanj, moraju da rade pod posebnim ekstrakcionim uslovima [1, 3].

#### 4.1.4. Primer proračuna broja stupnjeva

Ovde je selektovan primer protivstrujne višestepene ekstrakcije čvrsto-tečno i na njemu je prikazana primena opisanog grafičkog postupka [1].

##### Specifikacija zadatka

Seme soje treba ekstrahovati sa heksanom da bi se iz njega izdvojilo sojino ulje. Sloj sojinog semena visine 0,3 m (debljina ljuske je 0,25 mm), treba ekstrahovati u protivstrujnom toku na ekstraktoru sa beskonačnom trakom, pri čemu vreme ceđenja čvrstog materijala, koje se obavlja između segmenata trakastog ekstraktora, odnosno između

stupnjeva, iznosi 6 min. Eksperimentalni podaci dati u tabeli 1 pokazuju da i nakon 6 min čvrst materijal sadrži rastvor i da njegov sadržaj zavisi od sadržaja ulja.

*Tabela 1. Zavisnost sadržaja rastvora u rafiniranoj fazi od sadržaja ulja u rastvoru*  
*Table 1. Dependence of solution content in raffinate phase on oil content in the solution*

Sadržaj ulja u rastvoru, % m/m Content of oil in solution, % m/m	0	20	30
Sadržaj rastvora u rafinatu po nerastvornoj čvrstoj komponenti u kg/kg Content of solution in raffinate with respect to insoluble solid component in kg/kg	0,58	0,66	0,70

Seme soje na ulazu u ekstraktor sadrži 20% ulja, a nakon izvršene ekstrakcije treba da sadrži 0,5% ulja. Materijalni tok rastvarača treba da bude na ulazu u ekstraktor 1 kg svežeg heksana. Rastvarač, koji se odvaja ceđenjem od semena soje, ne sadrži suspendovan čvrst materijal, izuzev u fazi finalnog ekstrakta, koja izlazi iz stupnja 1 (slika 8), a u kojoj se nalazi 10% nerastvornog čvrstog materijala. Postavlja se pitanje koliko je stupnjeva potrebno za ovaj slučaj ekstrakcije.

### ***Izračunavanje ravnotežnih podataka***

Preračunavanjem podataka iz tabele 1 dobijaju se ravnotežni podaci X, N, koji su dati u tabeli 2.

*Tabela 2. Ravnotežni podaci*  
*Table 2. Equilibrium data*

X maseni udeo ulja u rastvoru u fazi rafinata weight part of oil in the solution in raffinate fase	I/N kg rastvora sadržanog u rafinatu/ kg nerastvornog čvrstog materijala kg solution in raffinate/kg of insoluble solid material	N	X/N kg ulja/kg nerastvornog čvrstog materijala kg oil/kg insoluble solid material
0	0,58	1,724	0
0,20	0,66	1,515	0,132
0,30	0,70	1,429	0,210

### *Definisanje toka ulaza semena soje*

Iz specifikacije zadatka sledi da je:

$F = 0,20$  kg ulja u polaznom čvrstom materijalu;

$B = 0,80$  kg nerastvorne čvrste materije u polaznom čvrstom materijalu;

Na osnovu vrednosti B i F izračunava se  $N_F$ :

$$N_F = \frac{0,8}{0,2} = 4 \text{ kg nerastvornog čvrstog materijala / kg ulja.}$$

### *Definisanje toka ulaznog rastvarača*

Iz specifikacije zadatka sledi da je:

$E_{N+1} = 1,0$  kg heksana;

$Y_{N+1} = 0$  masenih udela ulja.

### *Definisanje toka finalnog rafinata*

Iz specifikacije zadatka sledi da u toku izlaznog ekstrahovanog čvrstog materijala, odnosno finalnog rafinata, treba da bude 0,005 kg ulja i 0,995 kg nerastvornog čvrstog materijala u 1 kg čvrste materije.

Na osnovu ovih podataka sledi:

$$\frac{X}{N} = \frac{0,005}{0,995} = 0,00503 \text{ kg ulja / kg čvrstog materijala.}$$

Izračunata vrednost  $X/N$  se ne nalazi u tabeli 2, a samim tim ni odgovarajuća vrednost za  $N$ , pa se te vrednosti moraju dobiti metodom interpolacije raspoloživih vrednosti u tabeli 2. Budući da je razlika između vrednosti koje se interpolišu velika, to su moguće i značajne greške. Ovo bi se moglo izbeći korišćenjem međuvrednosti, koje se mogu dobiti iz eksperimenata. Vrednost  $N$ , odnosno  $N_N$ , određena interpolacijom iznosi:

$N_N = 1,716$  kg nerastvornog čvrstog materijala / kg rastvora.

Iz polaznih podataka sledi da je količina zaostalog čvrstog materijala u finalnom ekstraktu, odnosno misceli:  $0,8 \times 0,1 = 0,08$  kg, a količina čvrstog materijala u finalnom rafinatu:  $0,8 \times 0,9 = 0,72$  kg

Na osnovu dobijenih vrednosti može se izračunati  $R_N$ :

$$R_N = \frac{0,72}{1,716} = 0,420 \text{ kg zaostalog rastvora}$$

Iz dobijenih podataka sledi da je:

količina zaostalog ulja:  $0,00503 \times 0,72 = 0,00362$  kg;

količina zaostalog heksana:  $0,420 - 0,00362 = 0,416$  kg;

$$X_N = \frac{0,00362}{0,420} = 0,0086 \text{ kg ulja /kg zaostalog rastvora.}$$

*Definisanje toka finalnog ekstrakta odnosno miscele*

Na osnovu dobijenih podataka sledi da je:

količina heksana:  $1 - 0,416 = 0,584$  kg;

količina ulja:  $0,2 - 0,00362 = 0,196$  kg;

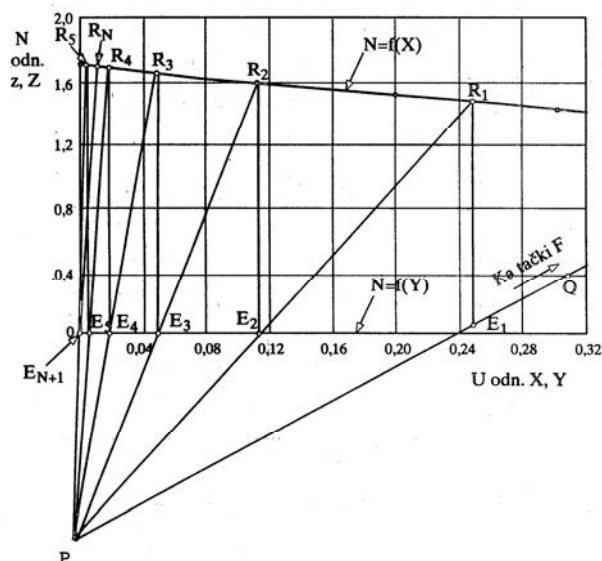
$E_1 = 0,584 + 0,196 = 0,780$  kg bistre miscele;

$$Y_1 = \frac{0,196}{0,780} = 0,252 \text{ kg ulja /kg bistre tečnosti;}$$

$$N_{E1} = \frac{0,08}{0,780} = 0,1027 \text{ kg nerastvorne čvrste materije / kg rastvora}$$

*Grafički proračun broja stupnjeva*

Grafički proračun broja stupnjeva u pravouglom dijagramu prikazan je na slici 10.



Slika 10. Grafička konstrukcija broja stupnjeva za izabrani primer ekstrakcije čvrsto-tečno ( $F$  - tačka nije ucrtana u dijagram, jer su njene koordinate izvan dijagrama;  $Q$  - pomoćna tačka, čije su koordinate izračunate na osnovu koordinata tačaka  $E_1$  i  $F$ , jer se ona mora nalaziti na liniji  $E_1F$ ; krugovima su označene ravnotežne tačke koje su ucrtane na osnovu vrednosti datih u tabeli 2)

Figure 10. Graphical construction of stage numbers for the chosen example of solid-liquid extraction ( $F$  - the point is not shown in the diagram, since its coordinates are without the diagram;  $Q$  - auxiliary point, whose coordinates are calculated from the coordinates of the points  $E_1$  and  $F$ , as it must be on the line  $E_1F$ ; circles are marked with the equilibrium point which are drawn from the values given in Table 2)

U dijagramu na slici 10 ucrtane su ravnotežne tačke prema ravnotežnim podacima iz table 2.

Na osnovu ovih tačaka konstruisane su na dijagramu ravnotežna linija  $Y=f(X)$  i spojnice ravnoteže, koje su vertikalne, što znači da je koeficijent raspodele ( $m = Y/X$ ) jednak jedinici ( $m = 1,0$ ), pa je  $Y = X$ . Tačka  $E_1$  na slici 10 predstavlja zamućenu miscelu i zbog toga se ne nalazi na apscisnoj osi, već iznad nje na rastojanju  $NE_1$ . Tačka  $F$  na slici 10 nije nacrtana, jer se njene koordinate nalaze van dijagrama, ali je zato određena pomoćna tačka  $Q$ , koja se nalazi na liniji koja spaja tačke  $F$  i  $E_1$ . Na osnovu ovog uslova i pretpostavljene vrednosti za jednu koordinatu tačke  $Q$ , a to je  $N_Q = 0,40$ , izračunata je druga koordinata tačke  $Q$  i ona je  $U_Q = 0,309$ . Ucrtavanjem tačke  $Q$  sa koordinatama  $0,309; 0,40$  u dijagram, konstruiše se linija  $QE_1$  koja se poklapa sa linijom  $FE_1$ .

Na osnovu raspoloživih koordinata, u dijagram na slici 10 se ucrtavaju tačke  $R_N (0,0086; 1,718)$  i  $E_{N+1} (0; 0)$  i konstruiše linija  $R_N E_{N+1}$ . Tačka  $P$  u dijagramu na slici 10 je određena u preseku linija  $QE_1$ , i  $R_N E_{N+1}$ .

U dijagramu na slici 10 nije se mogla ucrtati tačka  $M$ , koja bi se morala nalaziti na preseku linija  $FE_{N+1}$  i  $R_N E_1$ , a ni tačka  $F$  iz istih razloga nije ucrtana, jer za konstrukciju broja stupnjeva tačke  $M$  i  $F$  nisu neophodne. Grafička konstrukcija broja stupnjeva prikazana je na slici 10. Konstruisanjem spojnice ravnoteže kroz tačku  $E_1$  određena je tačka  $R_1$  kao ravnotežna tačka (ona mora da je na liniji  $N=f(X)$ ), čime je određen i stupanj 1. Povlačenjem linije  $R_1P$ , određuje se tačka  $E_2$ , koja se nalazi u preseku ove linije i apscise, a konstruisanjem spojnice ravnoteže kroz tačku  $E_2$ , određuje se tačka  $R_2$  (ona mora da bude na ravnotežnoj liniji  $N=f(X)$ ), čime je određen stupanj 2. Analogno ovome, određene su  $E_3$  i  $R_3$ ,  $E_4$  i  $R_4$ ,  $E_5$  i  $R_5$ , čime su određeni stupnjevi 3, 4, 5.

Pošto je sastav finalnog rafinata  $R_N$  između vrednosti  $R_4$  i  $R_5$  (slika 10), to znači da se potreban broj stupnjeva nalazi između 4 i 5, pa iz razloga sigurnosti treba usvojiti 5 stupnjeva. Međutim, egzatniji pristup proračunu, zahtevao bi da se sada pristupi manjim izmenama, ili u količini rastvarača ili u sadržaju neekstrahovanog ulja u finalnom rafinatu, kad bi se broj stupnjeva sveo na 4 ili 5. Pri tome treba smanjivati ili količinu rastvarača ili sadržaj ulja u finalnom rafinatu da bi se dobilo 5 stupnjeva, odnosno treba povećavati naznačene veličine da bi se dobilo 4 stupnja.

## 5. ZAKLJUČAK

Ekstrakcija kao difuziona operacija u kojoj se vrši prenos jedne ili više komponenata iz jedne faze, dvofaznog sistema, u drugu fazu sa ciljem razdvajanja jedne ili više komponenata od druge ili drugih komponenata nalazi najširu primenu u hemijskoj, naftnoj, farmaceutskoj, petrohemijskoj, nuklearnoj i metalurškoj industriji te je stoga predmet interesovanja mnogih istraživača. Heterogeni sistemi koji se koriste u ekstrakciji i koji su u osnovi dvofazni, mogu biti tečno-tečni i čvrsto – tečni. Ovde je razmatrana čvrsto – tečna ekstrakcija.

Polazeći od činjenice da u praksi ekstrakcije čvrsto – tečno posebnu primenu imaju unakrsni, protivstrujni i šaržno protivstrujni tipovi ekstrakcije, njima je posvećena pažnja i ukazano je na osnovne operacione principe ovih tipova ekstrakcije. Prikazan je grafički postupak koji koristi pravougli dijagram N, U.

Na primeru ekstrakcije semena soje sa heksanom protivstrujnom višestepenom ekstrakcijom, prikazana je primena opisanog grafičkog postupka. Nađeno je da se potreban broj stupnjeva nalazi između 4 i 5 pa se iz razloga sigurnosti predložilo usvajanje 5 stupnjeva. Ukoliko bi se želelo pristupiti tačnijem proračunu čime bi se postigla i veća ekonomičnost rada, odnosno ukoliko bismo hteli dobiti ceo broj (4 ili 5), moralo bi se ići ka promenama ili u količini rastvarača ili u sadržaju ne ekstrahovanog ulja. Smanjivanjem količine ili rastvarača ili ulja u rafinatu dobilo bi se 5 stupnjeva dok bi se povećanjem njihovih količina dobilo 4 stupnja.

NAPOMENA: Ovaj rad je posvećen pokojnom profesoru dr Branislavu Pekiću, direktoru Instituta za mikrobiološke procese i primenu hemiju, Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu.

## 6. LITERATURA

1. Treybal, R.E.: Mass Transfer Operations, 3rd Ed., McGraw-Hill International Book Co., New York (1968) p. 717-765.
2. Perry, R.H. and C.H. Chilton,: Chemical Engineers' Handbook, 5th Ed., International Student Edition, McGraw-Hill Kogakushe, Ltd., Tokyo (1973) p. 173 -178.
3. Pavlov, K. F., P.G. Romankov, A.A. Noskov: Examples and Problems to the Course of Unit Operations of Chemical Engineering, Mir Publishers, Moscow (1979) p. 384-422.
4. Batuner, L. M.: Procesy i apparaty organskogo sinteza i biokhimičkoj tehnologii, Himija, Moskva (1966) p. 375-388.
5. Grizo, A.: Luženje, Hemijsko-tehnološki priručnik (N. Radošević, ured.), Knjiga 5, Hemijsko inženjerstvo, IRO Rad, Beograd (1987) str. 494-505.
6. Tolić, A.: Operacija ekstrakcije tečno-tečno, treće izdanje, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad (1996) str. 45 – 48.
7. Pekić, B., i D. Miljković: Hemija i tehnologija kardi-toničnih glikozida, Tehnološki Fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad (1980) str. 34 – 41.
8. Lo, T.C., M. H. I. Baird, C. Hanson: Hand Book of Solvent Extraction, John Wiley and Sons, Inc., New York (1983) p. 32 – 34.
9. Sherwood, Th. K., R. L. Pigford, Ch.R Wilke: Mass Transfer McGraw – Hill Book Company, New York (1975) p. 100 – 115.

## **EQUILIBRIUM AND CALCULATION OF THE NUMBER OF STAGES IN SOLID-LIQUID EXTRACTION OPERATION**

Vladan Mičić<sup>1</sup>, Žika Lepojević<sup>2</sup>, Aleksandar Tolić<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Technology Zvornik, University of East Sarajevo, RS, B&H

<sup>2</sup> Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad, Serbia

<sup>3</sup> Faculty of Metallurgy and Technology, University of Montenegro, Montenegro

*In practice of the solid-liquid extraction operation, cross, counterflow and batch-counterflow extraction types have special application. That is why they have special importance in this paper. The fundamental operating principles of these extraction types are described. In this paper we discuss the equilibrium in the solid-liquid systems that can be reduced to a three-component system. This system is showed in the rectangular diagram.*

*Instead of complex numerical methods, which require electronic computer with special programs, we used a simple graphical procedure for calculation of the number of real stages. This procedure is based on Ponchon Savarita modified method. Our graphical method is shown for the case of single-stage contact as well as in cases of multiple cross and counterflow contacts. For the selected example, the calculation of multistage solid-liquid extraction and application and using our graphical method are described.*

**Key words:** extraction, balance, solid, liquid, contact

*Rad primljen: 29. 08. 2013.*

*Rad prihvaćen: 17. 10. 2013.*