

Analiza isparavanja i kristalizacije kalijeva nitrata iz vodene otopine u dvostupnjevatom isparivačkom sustavu i vakuumskom kristalizadoru

E. Karić* i N. Mustafić

Katedra za hemijsko inženjerstvo, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Tuzli
75 000 Tuzla, Bosna i Hercegovina

DOI: 10.15255/KUI.2018.008

KUI-40/2018

Prispjelo 9. travnja 2018.

Prihvaćeno 3. srpnja 2018.

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License



Sažetak

U ovom radu prikazana je računalna analiza razdvajanja soli iz dvokomponentnog elektrolitskog sustava. Elektrolitski sustav $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ primijenjen je kao "case study" za prikazivanje analize procesa isparavanja i kristalizacije. Sljedeći procesi uzeti su u obzir: dvostupnjeviti isparivački sustav i vakuumski kristalizador s adijabatskim hlađenjem. Razvijen je matematički model dvostupnjevito isparivačkog sustava i vakuumskog kristalizatora. Matematički model sastoji se od algebarskih jednadžbi. Predloženi model razvijen je u programu Microsoft Excel s VBA (*Visual Basic for Applications*). Razvijeni model omogućava analizu postojećeg ili dizajniranje novog procesa isparavanja i kristalizacije. Razvijeni model može biti primijenjen na bilo koji dvokomponentni elektrolitski sustav, ali zahtijeva unošenje fizikalno-kemijskih svojstava odgovarajućeg elektrolitskog sustava.

Ključne riječi

Elektrolitski sustav, isparivački sustav, vakuumska kristalizacija, matematički model

1. Uvod

Isparavanje predstavlja prijenos kapljevite hlapljive komponente u plinovitu fazu uslijed prijenosa topline.¹ Kristalizacija se primjenjuje u mnogim organskim i gotovo svim anorganskim, kemijskim proizvodnim postrojenjima gdje željeni proizvod predstavlja fino razdvojenu čvrstu supstanciju.¹ Oba navedena procesa zahtijevaju potrošnju pogonskih sredstava. Kombinacija procesa isparavanja i kristalizacije vrlo se često primjenjuje za izdvajanje soli iz višekomponentnih elektrolitskih sustava. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju procesu kristalizacije iz otopine svode se na osiguravanje minimalnog utroška energije i maksimalnog specifičnog kapaciteta kristalizatora u uvjetima dobivanja proizvoda potrebnog stupnja čistoće i raspodjele veličina čestica.² U radu *Jotanovića i Suljkanovića*² provedena je analiza procesa kristalizacije natrijeva klorida iz njegovih vodenih otopina u vakuumskom kristalizadoru s recirkulacijom suspenzije s ciljem razrade inženjerskih metoda proračuna odgovarajućeg mehanizma procesa kristalizacije.

U radu *Thomsena i sur.*³ prikazane su metode za rješavanje različitih tipova faznih dijagrama za vodene elektrolitske sustave s pouzdanim tehnikama za simulaciju, dizajn i optimizaciju frakcijskih procesa kristalizacije. Za sve proračune primijenili su prošireni model UNIQUAC.⁴

*Fitch*⁵ je opisao grafički prikaz metoda za dizajn frakcijskog procesa kristalizacije na temelju faznih dijagrama topljivosti. Za povećanje koncentracije otopine primjenjuje se višestupnjeviti isparivački sustav.⁶ U proizvodnji svježe vode procesom desalinizacije, energetske troškovi za višestupnjevito isparavanje su 20 – 30 % od ukupne cijene vode.⁷ U industrijskom mjerilu vakuumska kristalizacija jedna je od najčešće primjenjivanih kristalizacijskih tehnika, kako pri kristalizaciji individualnih komponenata tako i u procesima frakcijske kristalizacije iz višekomponentnih elektrolitskih sustava.⁸ U radu *Hillenbranda i Westerberga*⁹ razvijen je analitički alat za računanje minimalne potrošnje pogonskih sredstava u višestupnjevatom isparivačkom sustavu koji je toplinski integriran s procesnim tokovima. *Nishitani i Kunugita*¹⁰ istraživali su jednostupnjeviti isparivač u kombinaciji s kondenzatorom i izmjenjivačem topline, uz predgrijavanje pojnog toka parom iz isparivača. Radni uvjeti za sustav izabrani su na temelju ovisnosti godišnjih investicijskih troškova o godišnjoj potrošnji energije. U radu *Kumara i sur.*¹¹ dobiven je matematički model temeljen na linearnim i nelinearnim jednadžbama bilance tvari i energije, koji se može primijeniti za bilo koji broj stupnjeva isparavanja i za bilo koje polazne uvjete. S ciljem smanjenja potrošnje energije u procesu koncentriranja voćnog soka, u radu *Ruana i sur.*¹² razvijen je opći matematički model višestupnjevito isparivačkog sustava.

* Autor za dopisivanje: Ervin Karić
e-pošta: erwin.karic@untz.ba

Jednadžbe bilance tvari i energije opisane su u matičnom obliku s ciljem boljeg razumijevanja modela.¹²

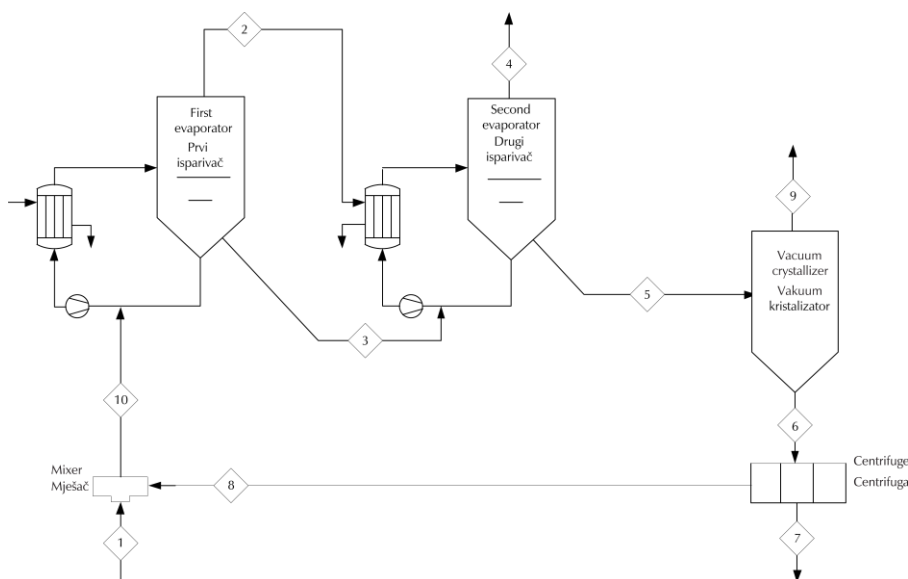
U ovom radu prikazan je razvoj matematičkog modela za razdvajanje soli iz dvokomponentnog elektrolitskog sustava $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Za razvijeni matematički model napravljen je procesni simulator u programu Microsoft Excel s VBA. Proces isparavanja predstavljen je u dva isparivačka stupnja i s ciljem uštede energije, generirana sekundarna para iz prvog isparivačkog stupnja upotrijebila se kao pogonsko sredstvo u drugom isparivačkom stupnju. Prikazana je bilanca tvari i energije isparivačkog i kristalizacijskog sustava. Također su prikazane specifične entalpije svakog procesnog toka. Model omogućava računanje potrošnje pogonskih sredstava, masenog protoka i specifične entalpije svakog procesnog toka, temperature i tlaka u prvom isparivačkom stupnju te površinu izmjene topline i prenesenu toplinu u svakom isparivačkom stupnju. Dostupno je vrlo malo literature koja opisuje kombinaciju procesa isparavanja i kristalizacije. Cilj rada bio je na konkretnom primjeru povezati navedene procese s matematičkim opisom oba procesa. Rezultati ovog rada mogu poslužiti kao smjernice za poboljšanje rada u navedenim procesima bez potrebe za skupim eksperimentima na samom postrojenju. Razvijeni model može biti primijenjen na bilo koji dvokomponentni elektrolitski sustav, ali zahtijeva unošenje fizikalno-kemijskih svojstava odgovarajućeg elektrolitskog sustava.

1.1. Teorijski dio

Procesni tok koji treba zbrinuti predstavlja višekomponentni elektrolitski sustav $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Parametri toka su sljedeći: protok $8,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sadržaj soli 0,078 množinskih udjela i temperatura $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Procesni sustav treba kreirati kao uniju dvaju podsustava: podsustava koncentriranja i podsustava kristalizacije. Podsustav koncentriranja treba koncipirati s ciljem dovođenja sustava do stanja zasićenja, pri čemu tlak isparavanja može poprimiti vrijednosti $0,1 \leq p \leq 1,0 \text{ bar}$. Kao procesne alternative podsustavu koncentriranja treba razmotriti izvođenje procesa isparavanja u dva stupnja, u rednoj vezi u odnosu na otopinu i s međusobno jednakim površinama za prijenos topline. Kao moguća kristalizacijska tehnika razmotrena je vakuumska kristalizacija. Tlak u kristalizatoru može poprimiti vrijednosti $0,005 \leq p \leq 0,1 \text{ bar}$. Sadržaj vlage u kristalnom produktu ne smije biti veći od 0,03 množinskih udjela. Na raspolaganju su energenti u dovoljnim količinama: zasićena vodena para tlaka 15,0 bar. Potrebno je odrediti potrošnju ogrjevne pare.

2. Matematički opis procesa

U skladu s formulacijom problema prikazanim u teorijskom dijelu može se izvesti procesna shema koja se sastoji od dva isparivačka stupnja i jednog vakuumnog kristalizatora, prikazana na slici 1.



Slika 1 – Shema procesa s dva isparivačka stupnja i jednim vakuumnim kristalizatorom: 1 – pojni tok, 2 – tok isparene vode u prvom isparivačkom stupnju, 3 – koncentrirani tok na izlazu iz prvog isparivačkog stupnja, 4 – tok isparene vode u drugom isparivačkom stupnju, 5 – koncentrirani tok na izlazu iz drugog isparivačkog stupnja, 6 – tok suspenzije, 7 – tok kristalnog produkta, 8 – tok matične otopine, 9 – tok sekundarne pare generirane u vakuu kristalizatoru, 10 – tok nakon miješanja tokova 1 i 8.

Fig. 1 – Scheme of the process with two evaporative stages and one vacuum crystallizer: 1 – feed flow, 2 – stream of evaporated water in the first evaporation step, 3 – outlet concentrated flow from the first evaporator stage, 4 – flow of evaporated water in the second evaporator stage, 5 – outlet concentrated flow from the second evaporator stage, 6 – suspension flow, 7 – crystal product flow, 8 – parent solution flow, 9 – secondary steam flow generated in the vacuum crystallizer, 10 – flow after mixing flows 1 and 8.

Dodjeljuju se oznake za indekse koji se upotrebljavaju u simbolima za sadržaj soli u procesnim tokovima:

1 – KNO_3

2 – H_2O

Da bi se odredila temperatura i sadržaj KNO_3 u stanju zasićenja, potrebno je znati tlak para iznad vodene otopine KNO_3 . Tlak para, iznad zasićenih otopina KNO_3 , u ovisnosti o temperaturi prikazan je u tablici 1.

Tablica 1 – Tlak para, iznad zasićenih otopina KNO_3 , u ovisnosti o temperaturi¹³

Table 1 – Vapour pressure, above saturated KNO_3 solutions, depending on temperature¹³

$t/^\circ\text{C}$	p/mmHg
10,0	7,1
20,0	13,0
25,0	17,4
30,0	22,9
40,0	38,6
50,0	62,3
60,0	97,2
70,0	146,4
80,0	213,9
90,0	303,9
100,0	420,5
110,0	567,8
115,0	654,0
120,0	749,2

Za izračun temperature u kristalizadoru primijenjena je *Antoineova korelacija* prikazana jedn. (1):

$$\ln p(\text{mmHg}) = A - \frac{B}{t(^{\circ}\text{C}) + C} \quad (1)$$

Određivanje parametara *Antoineove korelacije* izvodi se u skladu s algoritamskim koracima prikazanim na slici 2.

Sustav jednažbi (2–13) primjenjuje se za određivanje *Antoineovih* parametara.

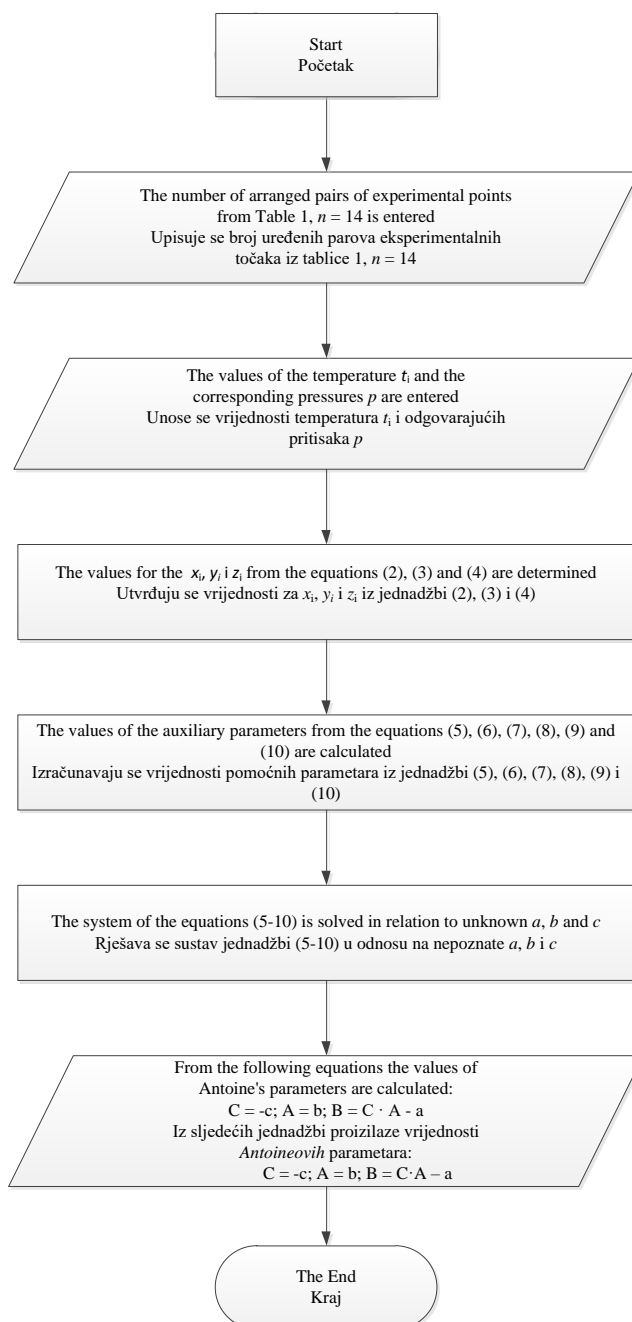
$$z_i = t_i \quad (2)$$

$$x_i = 1/\ln(p) \quad (3)$$

$$y_i = t_i/\ln(p) \quad (4)$$

$$AA = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n \quad (5)$$

$$BB = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (6)$$



Slika 2 – Algoritamski koraci za utvrđivanje Antoineovih parametara

Fig. 2 – Algorithmic steps for the determination of Antoine's parameters

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot z_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (7)$$

$$DD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (8)$$

$$EE = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (9)$$

$$FF = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n z_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (10)$$

$$b = \left(FF - \frac{BB}{AA} \cdot CC \right) / \left(EE - \frac{BB^2}{AA} \right) \quad (11)$$

$$a = (CC - b \cdot BB) / AA \quad (12)$$

$$c = \left(\sum_{i=1}^n z_i - a \cdot \sum_{i=1}^n x_i - b \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) / n \quad (13)$$

Za poznati tlak u kristalizatoru, temperatura kristalizatora i sadržaj soli u otopini određuju se iz jedn. (1) i (15):

$$c_1^{(8)} = 0,0979 + 0,0081 \cdot t_{kr} - 0,00002 \cdot t_{kr}^2 \quad (15)$$

Jedn. (15) predstavlja ovisnost sadržaja soli u stanju zasićenja o temperaturi.

Koncentracija soli u kristalnom produktu se određuje iz jednadžbe (16).

$$c_1^{(7)} = (1 - 0,03) \cdot c_1^{(kr)} + (0,03 \cdot c_1^{(8)}) \quad (16)$$

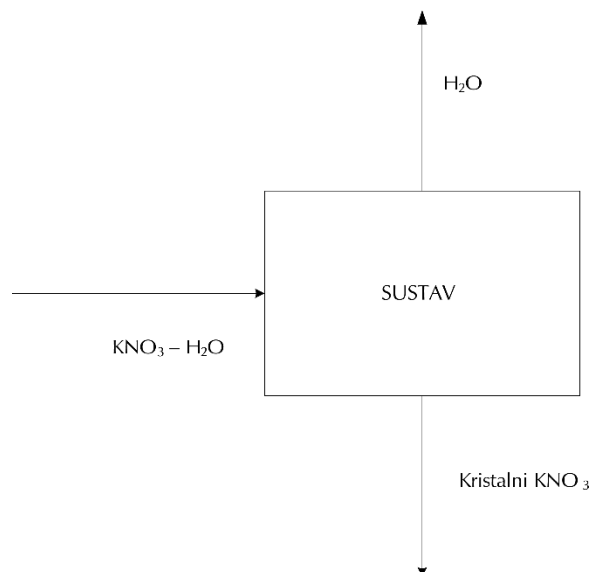
Za poznati tlak u drugom isparivaču temperatura u drugom isparivaču i sadržaj soli u koncentriranom toku određuju se iz jedn. (1) i (17).

$$c_1^{(8)} = 0,0979 + 0,0081 \cdot t_{isp} - 0,00002 \cdot t_{isp}^2 \quad (17)$$

U skladu s formulacijom problema prikazanom u teorijskom dijelu može se izvesti struktura cijelog sustava prikazana na slici 3.

Ukupna bilanca tvari prikazana je jedn. (18).

$$\bar{m}_1 = \bar{m}_w + \bar{m}_7 \quad (18)$$



Slika 3 – Struktura cijelog sustava

Fig. 3 – Structure of the entire system

Ukupna bilanca tvari u odnosu na KNO_3 prikazana je jedn. (19).

$$\bar{m}_1 \cdot c_1^{(1)} = \bar{m}_7 \cdot c_1^{(7)} \quad (19)$$

Bilanca tvari podsustava kristalizacije prikazana je jedn. (20).

$$\bar{m}_5 = \bar{m}_7 + \bar{m}_8 + \bar{m}_9 \quad (20)$$

Bilanca tvari podsustava kristalizacije u odnosu na KNO_3 prikazana je jedn. (21).

$$\bar{m}_5 \cdot c_1^{(5)} = \bar{m}_7 \cdot c_1^{(7)} + \bar{m}_8 \cdot c_1^{(8)} \quad (21)$$

Toplinska bilanca podsustava kristalizacije prikazana je jedn. (22).

$$\bar{m}_5 \cdot \hat{h}_5 + \bar{m}_7 \cdot q_{kr} = \bar{m}_8 \cdot \hat{h}_8 + \bar{m}_7 \cdot \hat{h}_7 + \bar{m}_9 \cdot \hat{H}_9 \quad (22)$$

Specifične entalpije toka kristalnog produkta i toka matične otopine za referentnu temperaturu: $t_{ref} = 0^\circ\text{C}$ prikazane su jedn. (23).

$$\hat{h}_i = \int_{t_{ref}}^{t_{kr}} c_{p,i}(t) dt \quad i = 7,8 \quad (23)$$

Specifična entalpija koncentriranog toka na izlazu iz drugog isparivača za referentnu temperaturu $t_{ref} = 0^\circ\text{C}$ prikazana je jedn. (24).

$$\hat{h}_5 = \int_{t_{ref}}^{t_{isp}} c_{p,5}(t) dt \quad (24)$$

Specifična entalpija toka generirane sekundarne pare za referentnu temperaturu $t_{ref} = 0 \text{ °C}$ prikazana je jedn. (25).

$$\hat{H}_9 = f(t_{kr}) \quad (25)$$

Bilanca tvari prvog isparivačkog stupnja prikazana je jedn. (26).

$$\bar{m}_1 + \bar{m}_8 = \bar{m}_2 + \bar{m}_3 \quad (26)$$

Bilanca tvari prvog isparivačkog stupnja u odnosu na KNO_3 prikazana je jedn. (27).

$$\bar{m}_1 \cdot c_1^{(1)} + \bar{m}_8 \cdot c_1^{(8)} = \bar{m}_3 \cdot c_1^{(3)} \quad (27)$$

Bilanca topline prvog isparivačkog stupnja prikazana je jedn. (28).

$$\bar{m}_1 \cdot \hat{h}_1 + \bar{m}_8 \cdot \hat{h}_8 + Q_{tr}^{(I)} = \bar{m}_2 \cdot \hat{H}_2 + \bar{m}_3 \cdot \hat{h}_3 \quad (28)$$

Temperatura isparavanja u prvom isparivačkom stupnju prikazana je jedn. (29).

$$t_{ispI} = t_w + dt \quad (29)$$

gdje I označava prvi isparivački stupanj.

Vrijednost za veličinu površine prijenosa topline prvog isparivačkog stupnja dana je jedn. (30).

$$A_1 = \frac{Q_{tr}^{(I)}}{K_1 \cdot \Delta t_{sr}^{(I)}} \quad (30)$$

Vrijednost koeficijenta prijenosa topline u prvom isparivačkom stupnju K_1 je pretpostavljena i iznosi $1200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Srednja temperaturna razlika prvog isparivačkog stupnja prikazana je jedn. (31).

$$\Delta t_{sr}^{(I)} = t_{tp} - t_{ispI} \quad (31)$$

Povišenje vrelišta prikazano je jedn. (32).

$$dt = 29,669 \cdot c_1^{(3)2} - 6,2011 \cdot c_1^{(3)} + 1,6308 \quad (32)$$

Potrošnja ogrjevne pare prikazana je jedn. (33).

$$Q_{tr}^{(I)} = \bar{m}_{op} \cdot \Delta \hat{H}_v^{(I)} \quad (33)$$

Količina prenesene topline u drugom isparivačkom stupnju prikazana je jedn. (34).

$$Q_{tr}^{(II)} = \bar{m}_2 \cdot \Delta \hat{H}_v^{(t_{ispI})} \quad (34)$$

Bilanca tvari drugog isparivačkog stupnja prikazana je jedn. (35).

$$\bar{m}_3 = \bar{m}_4 + \bar{m}_5 \quad (35)$$

Bilanca tvari drugog isparivačkog stupnja u odnosu na KNO_3 prikazana je jedn. (36).

$$\bar{m}_3 \cdot c_1^{(3)} = \bar{m}_5 \cdot c_1^{(5)} \quad (36)$$

Bilanca topline drugog isparivačkog stupnja prikazana je jedn. (37).

$$\bar{m}_3 \cdot \hat{h}_3 + Q_{tr}^{(II)} = \bar{m}_5 \cdot \hat{h}_5 + \bar{m}_4 \cdot \hat{H}_4 \quad (37)$$

Srednja temperaturna razlika u drugom isparivačkom stupnju proizlazi iz jedn. (38).

$$Q_{tr}^{(II)} = K_{II} \cdot A_{II} \cdot \Delta t_{sr}^{(II)} \quad (38)$$

Vrijednost koeficijenta prijenosa topline u drugom isparivačkom stupnju K_{II} pretpostavljena je i iznosi $900 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Temperatura isparavanja iz prvog isparivačkog stupnja proizlazi iz jedn. (39).

$$\Delta t_{sr}^{(II)} = t_{ispI} - t_{ispII} \quad (39)$$

Sustav jednadžbi je riješen u programu Microsoft Excel s VBA.

3. Rezultati i rasprava

Rješavanjem sustava jednadžbi (2–13) dobivaju se vrijednosti parametara u *Antoineovoj korelaciji* ($A = 15,53$, $B = 2842,06$, $C = 199,31$). Tlak u prvom isparivačkom stupnju iznosi 0,78 bar. Preostali rezultati prikazani su u tablici 2.

S ciljem povećanja sadržaja soli na ulazu u prvi isparivač, tok matične otopine miješa se s polaznim tokom prije ulaza u prvi isparivački stupanj. Rezultati su dobiveni metodom iteracije. Temperatura u prvom isparivačkom stupnju uzeta je kao prva iterativna varijabla i pretpostavljena joj je neka vrijednost veća od temperature u drugom isparivačkom stupnju na zadanom tlaku. Kao druga iterativna varijabla uzet je sadržaj soli u koncentriranom toku prvog isparivačkog stupnja i pretpostavljena joj je neka vrijednost veća od sadržaja soli u toku 1. Pomoću jedn. (36) provedena je provjera druge iterativne varijable, dok je pomoću jedn. (39) provedena provjera prve iterativne varijable. Potrošnja ogrjevne pare u prvom isparivačkom stupnju iznosi $4777,83 \text{ kg h}^{-1}$, dok u drugom isparivačkom stupnju nema potrošnje ogrjevne pare s obzirom na to da

se kao pogonsko sredstvo upotrebljava generirana sekundarna para iz prvog isparivačkog stupnja. Miješanjem polaznog toka sa sadržajem soli od 0,078 množinskih udjela i toka matične otopine sa sadržajem soli od 0,230 množinskih udjela dobiva se tok 10 sa sadržajem soli od 0,130 množinskih udjela. Miješanje navedenih tokova ima cilj povećati sadržaj soli u toku koji ulazi u prvi isparivački stupanj. Navedeni tokovi mogu se miješati samo ukoliko je sadržaj soli u toku matične otopine veći od sadržaja soli u polaznom sustavu.

Tablica 2 – Rezultati rješenja sustava jednačbi (13–39)
Table 2 – Results of the solution for the system of equations (13–39)

Generirana sekundarna para prvog isparivačkog stupnja – tok 2 Generated secondary vapour of the first evaporator stage – stream 2	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	4288,16
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	2662,53
Koncentrirani tok prvog isparivačkog stupnja – tok 3 Concentrated flow of the first evaporator stage – stream 3	
protok toka, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	10562,44
sadržaj soli iskazan množinskim udjelom (1) salt content expressed in multiplier share (1)	0,27
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	353,04
Generirana sekundarna para drugog isparivačkog stupnja – tok 4 Generated secondary vapour of the second evaporator stage – stream 4	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	3679,17
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	2586,75
Koncentrirani tok drugog isparivačkog stupnja – tok 5 Concentrated flow of the second evaporator stage – stream 5	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	6883,27
sadržaj soli iskazan množinskim udjelom (1) salt content expressed in multiplier share (1)	0,29
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	135,98
Tok kristalnog produkta – tok 7 Crystal product flow – stream 7	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	528,61
sadržaj soli iskazan množinskim udjelom (1) salt content expressed in multiplier share (1)	0,98
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	131,41

Tok matične otopine – tok 8 Parent solution flow – stream 8	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	5105,10
sadržaj soli iskazan množinskim udjelom (1) salt content expressed in multiplier share (1)	0,23
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	33,34
Generirana sekundarna para vakuumske kristalizatora – tok 9 Concentrated flow of the vacuum crystallizer – stream 9	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	1249,56
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	2523,18
Tok nakon miješanja tokova 1 i 8 – tok 10 Flow after mixing flows 1 and 8 – stream 10	
protok, kg h^{-1} flow, kg h^{-1}	14850,6
sadržaj soli iskazan množinskim udjelom (1) salt content expressed in multiplier share (1)	0,13
specifična entalpija, kJ kg^{-1} specific enthalpy, kJ kg^{-1}	79,68
Prvi isparivački stupanj First evaporator stage	
količina prenesene topline, kJ h^{-1} amount of transferred heat, kJ h^{-1}	$2,5 \cdot 10^7$
površina za prijenos topline, m^2 surface for heat transfer, m^2	161,44
temperatura, $^{\circ}\text{C}$ temperature, $^{\circ}\text{C}$	85,01
srednja temperaturna razlika, $^{\circ}\text{C}$ medium temperature difference, $^{\circ}\text{C}$	35,15
potrošnja ogrijevne pare, kg h^{-1} consumption of heating steam, kg h^{-1}	4777,83
Drugi isparivački stupanj Second evaporator stage	
količina prenesene topline, kJ h^{-1} amount of transferred heat, kJ h^{-1}	$1,9 \cdot 10^7$
površina za prijenos topline, m^2 surface for heat transfer, m^2	161,44
temperatura, $^{\circ}\text{C}$ temperature, $^{\circ}\text{C}$	48,17
srednja temperaturna razlika, $^{\circ}\text{C}$ medium temperature difference, $^{\circ}\text{C}$	36,80

Količina prenesene topline u prvom isparivačkom stupnju veća je u odnosu na količinu prenesene topline u drugom isparivačkom stupnju, pa se znatno više soli koncentrira (od 0,13 do 0,27 množinskih udjela) u prvom nego u drugom isparivačkom stupnju. U drugom isparivačkom stupnju dolazi do koncentriranja soli od 0,27 do 0,29 množinskih udjela. Za grijanje prvog isparivačkog stupnja upotrebljava

se ogrjevna para ($4777,83 \text{ kg h}^{-1}$), dok se kao ogrjevni medij u drugom isparivačkom stupnju upotrebljava generirana sekundarna para iz prvog isparivačkog stupnja s protokom od $3228,16 \text{ kg h}^{-1}$, što također objašnjava veću količinu transferirane topline u prvom isparivačkom stupnju. Razvijeni model omogućava analizu postojećeg ili dizajniranje novog isparivačkog i kristalizacijskog procesa. Razvijeni model može biti primijenjen na bilo koji dvokomponentni elektrolitski sustav, ali zahtijeva unošenje fizikalno-kemijskih svojstava odgovarajućeg elektrolitskog sustava. Daljnja istraživanja trebaju ići u smjeru optimizacije procesa s ciljem dobivanja optimalne vrijednosti potrošnje ogrjevnog pare. S obzirom na to da je koeficijent prolaza topline pretpostavljen, daljnja istraživanja mogu ići u smjeru određivanja koeficijenta prolaza topline na osnovu materijala od kojeg je izrađen izmjenjivač topline i na osnovu njegovih dimenzija. Kreirani procesni simulator za analizu i simulaciju dvostupnjevito isparivačkog sustava i vakuumske kristalizatora ne može se primjenjivati za jednostupnjevi isparivački sustav i vakuumski kristalizator, kao ni na trokomponentni elektrolitski sustav, što predstavlja ograničenje.

4. Zaključak

S ciljem smanjenja potrošnje energije u dvostupnjevito isparivačkom sustavu potrebno je iskoristiti generiranu sekundarnu paru prvog isparivačkog stupnja kao ogrjevni medij u drugom isparivačkom stupnju. Miješanje toka matične otopine s polaznim tokom prije ulaza u isparivački stupanj također smanjuje potrošnju energije s obzirom na to da se miješanjem povećava sadržaj soli. Rješavanje matematičkog modela kombinacije procesa isparavanja i kristalizacije u programu Microsoft Excel s VBA omogućava analizu i simulaciju navedenih procesa za bilo koje druge poznate varijable. Nedostatak kreiranog procesnog simulatora je u tome što se može primijeniti samo za dvostupnjevito isparavanje i nema mogućnost primjene za trokomponentni elektrolitski sustav

Popis kratica i simbola

List of abbreviations and symbols

A	– parametar u Antoineovoj korelaciji, – – parameter in Antoine's correlation, –
A_I	– površina za prijenos topline prvog isparivačkog stupnja, m^2 – heat transfer area of the first evaporator stage, m^2
A_{II}	– površina za prijenos topline drugog isparivačkog stupnja, m^2 – heat transfer area of the second evaporator stage, m^2

B	– parametar u Antoineovoj korelaciji, – – parameter in Antoine's correlation, –
C	– parametar u Antoineovoj korelaciji, – – parameter in Antoine's correlation, –
$c_1^{(1)}$	– sadržaj soli u polaznom toku iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the feed flow expressed in multiplier share, 1
$c_1^{(3)}$	– sadržaj soli u koncentriranom toku prvog isparivačkog stupnja iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the concentrated flow of the first evaporator stage expressed in multiplier share, 1
$c_1^{(5)}$	– sadržaj soli u koncentriranom toku drugog isparivačkog stupnja iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the concentrated flow of the second evaporator stage expressed in multiplier share, 1
$c_1^{(8)}$	– sadržaj soli u toku matične otopine iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the parent solution flow expressed in multiplier share, 1
$c_1^{(7)}$	– sadržaj soli u toku kristalnog produkta iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the crystal product flow expressed in multiplier share, 1
$c_1^{(kr)}$	– sadržaj soli u toku kristala iskazan množinskim udjelom, 1 – salt content in the crystal flow expressed in multiplier share, 1
$c_{p,1}$	– specifični toplinski kapacitet polaznog sistema, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – specific heat capacity of the feed system, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_{p,3}$	– specifični toplinski kapacitet koncentriranog toka prvog isparivačkog stupnja, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – specific heat capacity of the concentrated flow of first evaporator stage, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_{p,5}$	– specifični toplinski kapacitet koncentriranog toka drugog isparivačkog stupnja, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – specific heat capacity of the concentrated flow of second evaporator stage, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_{p,7}$	– specifični toplinski kapacitet kristalnog produkta, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – specific heat capacity of the crystal flow, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
dt	– povišenje temperature vrelišta u prvom isparivačkom stupnju, $^{\circ}\text{C}$ – boiling temperature rise in the first evaporator stage, $^{\circ}\text{C}$
\hat{h}_1	– specifična entalpija polaznog toka, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the feed flow, kJ kg^{-1}

\hat{H}_2	– specifična entalpija generirane sekundarne pare prvog isparivačkog stupnja, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the generated secondary vapour of the first evaporator stage, kJ kg^{-1}	\bar{m}_6	– protok suspenzije, kg h^{-1} – suspension flow, kg h^{-1}
\hat{h}_3	– specifična entalpija koncentriranog toka prvog isparivačkog stupnja, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the concentrated flow of the first evaporator stage, kJ kg^{-1}	\bar{m}_7	– protok kristalnog produkta, kg h^{-1} – crystal product flow, kg h^{-1}
\hat{H}_4	– specifična entalpija generirane sekundarne pare drugog isparivačkog stupnja, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the generated secondary vapour of the second evaporator stage, kJ kg^{-1}	\bar{m}_8	– protok generirane sekundarne pare vakuumskog kristalizatora, kg h^{-1} – flow of the generated secondary vapour of the second evaporator stage
\hat{h}_5	– specifična entalpija koncentriranog toka drugog isparivačkog stupnja, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the concentrated flow of the second evaporator stage, kJ kg^{-1}	\bar{m}_9	– protok matične otopine, kg h^{-1} – parent solution flow, kg h^{-1}
\hat{h}_6	– specifična entalpija toka suspenzije, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the suspension flow, kJ kg^{-1}	\bar{m}_w	– količina ukupno isparene vode, kg h^{-1} – amount of total water evaporated, kg h^{-1}
\hat{h}_7	– specifična entalpija kristalnog produkta, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the crystal product flow, kJ kg^{-1}	\bar{m}_{op}	– protok ogrjevne pare, kg h^{-1} – heating steam flow, kg h^{-1}
\hat{H}_8	– specifična entalpija generirane sekundarne pare vakuumskog kristalizatora, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the generated secondary vapour of the vacuum crystallizer, kJ kg^{-1}	ρ	– tlak, mmHg – pressure, mmHg
\hat{h}_9	– specifična entalpija matične otopine, kJ kg^{-1} – specific enthalpy of the parent solution flow, kJ kg^{-1}	p_{ispI}	– tlak u prvom isparivačkom stupnju, bar – pressure in the first evaporator stage, bar
K_I	– koeficijent prolaza topline u prvom isparivačkom stupnju, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ – heat transfer coefficient in the first evaporator stage, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	p_{ispII}	– tlak u drugom isparivačkom stupnju, bar – pressure in the second evaporator stage, bar
K_{II}	– koeficijent prolaza topline u drugom isparivačkom stupnju, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ – heat transfer coefficient in the second evaporator stage, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	q_{kr}	– specifična toplina kristalizacije, kJ kg^{-1} – specific heat of crystallization, kJ kg^{-1}
\bar{m}_1	– protok polaznog toka, kg h^{-1} – feed flow, kg h^{-1}	$Q_{tr}^{(I)}$	– količina transferirane topline u prvom isparivačkom stupnju, kJ h^{-1} – amount of transferred heat in the first evaporator stage, kJ h^{-1}
\bar{m}_2	– protok generirane sekundarne pare prvog isparivačkog stupnja, kg h^{-1} – flow of the generated secondary vapour of the first evaporator stage, kg h^{-1}	$Q_{tr}^{(II)}$	– količina transferirane topline u drugom isparivačkom stupnju, kJ h^{-1} – amount of transferred heat in the second evaporator stage, kJ h^{-1}
\bar{m}_3	– protok koncentriranog toka prvog isparivačkog stupnja, kg h^{-1} – flow of the concentrated flow of the first evaporator stage, kg h^{-1}	t_{ispI}	– temperatura u prvom isparivačkom stupnju, °C – temperature in the first evaporator stage, °C
\bar{m}_4	– protok generirane sekundarne pare drugog isparivačkog stupnja, kg h^{-1} – flow of the generated secondary vapour of the second evaporator stage, kg h^{-1}	t_{ispII}	– temperatura u drugom isparivačkom stupnju, °C – temperature in the second evaporator stage, °C
\bar{m}_5	– protok koncentriranog toka drugog isparivačkog stupnja, kg h^{-1} – flow of the concentrated flow of the second evaporator stage, kg h^{-1}	t_{ref}	– referentna temperatura, °C – reference temperature, °C
		t_w	– temperatura generirane sekundarne pare, °C – temperature of the generated secondary vapour, °C
		t_{op}	– temperatura ogrjevne pare, °C – heating steam temperature, °C
		x_i	– pomoćna varijabla kojom se izražava vrijednost $1/\ln(p)$, mmHg^{-1} – auxiliary variable that expresses value of the $1/\ln(p)$, mmHg^{-1}
		y_i	– pomoćna varijabla kojom se izražava vrijednost $t_i/\ln(p)$, °C mmHg^{-1} – auxiliary variable that expresses value of the $t_i/\ln(p)$, °C mmHg^{-1}
		z_i	– pomoćna varijabla kojom se izražava temperatura, °C

- auxiliary variable that expresses value of the temperature, °C
- $\Delta\hat{H}_V^{(I)}$ – latentna toplina isparavanja ogrjevnice pare, kJ kg⁻¹
- latent heat of evaporation of the heating steam, kJ kg⁻¹
- $\Delta\hat{H}_V^{(tisp)}$ – latentna toplina isparavanja generirane sekundarne pare prvog isparivačkog stupnja, kJ kg⁻¹
- latent heat of evaporation of the generated secondary vapour of the first evaporator stage, kJ kg⁻¹
- $\Delta t_{sr}^{(I)}$ – srednja temperaturna razlika u prvom isparivačkom stupnju, °C
- medium temperature difference in the first evaporator stage, °C
- $\Delta t_{sr}^{(II)}$ – srednja temperaturna razlika u drugom isparivačkom stupnju, °C
- medium temperature difference in the second evaporator stage, °C

Literatura

References

1. *J. D. Seader, E. J. Henley, S. K. Roper*, Separation process principles, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998., str. 13.
2. *M. Jotanović, M. Suljkanović*, Analiza kristalizacije natrijum hlorida iz rastvora u vakuum kristalizeru sa recirkulacijom suspenzije, Hem. Ind. **63** (2009) 95–100, doi: <https://doi.org/10.2298/HEMIND0902095J>.
3. *K. Thomsen, P. Rasmussen, R. Gani*, Simulation and optimization of fractional crystallization processes, Chem. Eng. Sci. **53** (1998) 1551–1564, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00447-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00447-8).
4. *K. Thomsen, P. Rasmussen, R. Gani*, Correlation and prediction of thermal properties and phase behaviour for a class of aqueous electrolyte systems, Chem. Eng. Sci. **51** (1996) 3675–3683, doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00418-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00418-1).
5. *B. Fitch*, How to design fractional crystallization processes, Ind. Eng. Chem. **62** (1970) 6–33, doi: <https://doi.org/10.1021/ie50732a004>.
6. *P. Sharan, S. Bandyopadhyay*, Integration of thermo-vapor compressor with multiple-effect evaporator, App. Energy **184** (2016) 560–573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.037>.
7. *M. Busch, W. E. Mickols*, Reducing energy consumption in seawater desalination, Desalination **165** (2004) 299–312, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.035>.
8. *M. Suljkanović, M. Jotanović, E. Ahmetović, N. Ibrić*, Multivariant simulator for vacuum cooling processes of three component electrolyte systems, Hem. Ind. **64** (2010) 21–33, doi: <https://doi.org/10.2298/HEMIND1001021S>.
9. *J. B. Hillenbrand, A. W. Westerberg*, The synthesis of multiple-effect evaporator systems using minimum utility insights – I. A cascaded heat representation, Comput. Chem. Eng. **12** (1988) 611–624, doi: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(88\)80003-6](https://doi.org/10.1016/0098-1354(88)80003-6).
10. *H. Nishitani, E. Kunugita*, The optimal flow-pattern of multiple effect evaporator systems, Comput. Chem. Eng. **3** (1979) 261–268, doi: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(79\)80044-7](https://doi.org/10.1016/0098-1354(79)80044-7).
11. *D. Kumar, V. Kumar, V. P. Singh*, Modeling and dynamic simulation of mixed feed multi-effect evaporators in paper industry, Appl. Math. Model. **37** (2013) 384–397, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.02.039>.
12. *Q. Ruan, H. Jiang, M. Nian, Z. Yan*, Mathematical modeling and simulation of countercurrent multiple effect evaporation for fruit juice concentration, J. Food Eng. **146** (2015) 243–251, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.015>.
13. *P. Dingemans, L. L. Dijkgraaf*, The vapour pressure of saturated solutions of sodium nitrate in water, Recl. Trav. Chim. Pays-Bas **67** (1948) 231–234, doi: <https://doi.org/10.1002/recl.19480670308>.

SUMMARY

Analysis of Evaporation and Crystallization of Potassium Nitrate from Water Solution in Two-stage Evaporation System and Vacuum Crystallizer

Ervin Karić and Nesib Mustafić*

Computational analysis of salt separation from two-component electrolytic system is presented. A case study of an electrolytic system $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ was used to illustrate the analysis of evaporation and crystallization. The following processes are considered: two-stage evaporation system and vacuum crystallizer with adiabatic cooling. A mathematical model of the two-stage evaporation system and vacuum crystallizer was developed. The mathematical model is comprised of algebraic equations. The proposed model was developed in Microsoft Excel with VBA (*Visual Basic for Applications*). The developed model enables analysis of existing or design of new evaporation and crystallization processes. The developed model can be applied for any two-component electrolyte system, but requires the input of physicochemical properties related to corresponding electrolyte system.

Keywords

Electrolytic system, evaporation system, vacuum crystallization, mathematical model

*Department of Chemical Engineering, Faculty of Technology,
University of Tuzla, 75 000 Tuzla
Bosnia and Herzegovina*

Received April 4, 2018

Accepted July 3, 2018