

Modeliranje utjecaja ulaznih procesnih veličina u uparivaču na svojstva koncentrata soka naranče

Stojanović, Gorana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:887309>

Rights / Prava: [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK**

Gorana Stojanović

**MODELIRANJE UTJECAJA ULAZNIH PROCESNIH
VELIČINA U UPARIVAČU NA SVOJSTVA KONCENTRATA
SOKA NARANČE**

DIPLOMSKI RAD

Osijek, listopad, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek
Sveučilišni diplomski studij Procesno inženjerstvo

Zavod za procesno inženjerstvo
Katedra za modeliranje, optimiranje i automatizaciju
Franje Kuhača 18, 31000 Osijek, Hrvatska

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija
Tema rada je prihvaćena na VII redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini (2022./2023.) održanoj 2. svibnja 2023.
Mentor: prof. dr. sc. Damir Magdić, trajni izbor
Komentor: -

MODELIRANJE UTJECAJA ULAZNIH PROCESNIH VELIČINA U UPARIVAČU NA SVOJSTVA KONCENTRATA SOKA NARANČE

Gorana Stojanović, 0113143805

Sažetak:

Matematički model u MS Excelu primijenjen je za analizu utjecaja različitih procesnih veličina u uparivaču na količinu, udio suhe tvari i temperaturu koncentrata soka naranče. Model se temelji na bilancama mase i energije čija su rješenja određena primjenom Newton-Raphson-ove iterativne metode. U radu su provedene simulacije procesa uparavanja rijetkog soka u jednostrukom uparivaču i uparnoj stanici s tri stupnja uparavanja. Izračunati rezultati jasno pokazuju utjecaj ulaznih procesnih veličina na izlazne veličine procesa i omogućuju izbor najučinkovitijih procesnih uvjeta.

Ključne riječi: Uparivač, modeliranje, optimiranje, Newton-Raphson-ova metoda

Rad sadrži: 37 stranica
9 slika
8 tablica
16 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1.	Prof. dr. sc. Anita Pichler	predsjednik
2.	Prof. dr. sc. Damir Magdić, trajni izbor	član-mentor
3.	Prof. dr. sc. Mirela Kopjar, trajni izbor	član
4.	Prof. dr. sc. Sandra Budžaki	zamjena člana

Datum obrane: _____

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 18, Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

University Josip Juraj Strossmayer in Osijek
Faculty of Food Technology Osijek
University Graduate Study Process Engineering

Department of Process Engineering
Subdepartment of Modeling, Optimization, and Automation
Franje Kuhača 18, HR-31000 Osijek, Croatia

Scientific area: Biotechnical sciences
Scientific field: Food technology
Thesis subject: was approved by the Faculty of Food Technology Osijek Council at its session no. VII in the academic year (2022/2023) held on May 2, 2023.
Mentor: Damir Magdić, PhD, tenured prof.
Comentor: -

THE MODELING OF THE INFLUENCE OF INPUT PROCESS VARIABLES IN THE EVAPORATOR ON THE PROPERTIES OF THE ORANGE JUICE CONCENTRATE

Gorana Stojanović, 0113143805

Summary:

A mathematical model in MS Excel was applied to analyze the influence of different process quantities in the evaporator on the quantity, dry matter content and temperature of orange juice concentrate. The model is based on mass-energy balances whose solutions are determined using the Newton-Raphson iterative method. In this paper, simulations of the process of evaporation of thin juice were carried out in a single evaporator and a vaporization station with three degrees of evaporation. The calculated results clearly show the influence of the input process quantities on the process output quantities and allow the selection of the most efficient process conditions.

Key words: Evaporator, modelling, operating, Newton-Raphson method

Thesis contains: 37 pages
9 figures
8 tables
16 references

Original in: Croatian

Review and defense committee:

1.	<i>Anita Pichler</i> , PhD, prof.	chair person
2.	<i>Damir Magdić</i> , PhD, tenured prof.	supervisor
3.	<i>Mirela Kopjar</i> , PhD, tenured prof.	member
4.	<i>Sandra Budžaki</i> , PhD, prof	stand-in

Defense date: _____

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 18, Osijek.

DIPLOMSKI RAD JAVNO JE OBRANJEN DANA

2. listopada, 2024.

TE OCIJENJEN USPJEHOM

vrlo dobar (4)

Pred Povjerenstvom za obranu diplomskog rada:

1. **prof. dr. sc. Anita Pichler**

predsjednik

Pichler

(potpis)

2. **prof. dr. sc. Damir Magdić**

član

Magdić

(potpis)

3. **prof. dr. sc. Mirela Kopjar**

član

Kopjar

(potpis)

Ovaj diplomski rad posvećujem svojoj majci Mladenki i baki Ruži. Majci koja se svim silama borila kako bih imala život koji ona nije mogla imati, koja je moj kritičar, najveći navijač i najsnažniji oslonac u životu. Baki koja je mirna luka, vječna utjeha i optimist. Hvala Vam na svemu i nadam se da ste barem upola ponosne na mene kao što se ja ponosim Vama. Dida i ujo, uvijek ste tu u mislima sa mnom. T sve si nam.

Zahvaljujem se mentoru i profesoru doktoru znanosti Damiru Magdiću za pomoć pri pisanju ovog rada, za sve školske i životne lekcije kojih ću se držati u daljnjem profesionalnom i privatnom životu, bila mi je čast učiti od Vas.

Ništa ovu avanturu zvanu studiranje ne čini tako zanimljivom nego kada ju dijelite sa dobrim prijateljima, zato se želim zahvaliti i Vama; prijateljima iz djetinjstva, sa odbojke (349), gimnazije i fakulteta (posebno d.b.o.) koji ste se zajedno sa mnom veselili, tugovali i u konačnici bili uz mene na ovome putu. Sretna sam što Vas imam.

„Samo Osijek, samo PTF!“

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	3
2.1. UPARAVANJE	4
2.1.1. Uparivači	4
2.1.2. Koncentriranje uparavanjem	5
2.1.3. Jednostupanjsko uparavanje i jednostruki uparivači	5
2.1.4. Trostupanjsko uparavanje i trostruki uparivači	7
2.1.5. Newton-Raphson-ova metoda iteracije	7
2.1.6. Sok naranče	8
2.1.7. Matematički model uparavanja soka naranče	8
2.2. MS EXCEL	13
3. EKSPERIMENTALNI DIO	14
3.1. ZADATAK	15
3.2. MATERIJALI I METODE	15
3.2.1. Simulacije procesa uparavanja u MS Excel-u	15
3.2.2. Modeliranje uparavanja rijetkog soka naranče	16
4. REZULTATI	17
4.1. MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – JEDNOSTRUKI UPARIVAČ	18
4.2. MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – TROSTRUKI UPARIVAČ	21
5. RASPRAVA	28
5.1. RASPRAVA REZULTATA MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – JEDNOSTRUKI UPARIVAČ	29
5.2. RASPRAVA REZULTATA MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – TROSTRUKI UPARIVAČ	30
6. ZAKLJUČCI	32
7. LITERATURA	35

Popis oznaka, kratica i simbola

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
c_p	specifična toplina soka	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
h	ukupan koeficijent prijenosa topline	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
i_p	entalpija zasićene vodene pare	$J\ kg^{-1}$
i_v	entalpija ukapljene vode	$J\ kg^{-1}$
Q_k	protok koncentriranog soka	$kg\ h^{-1}$
Q_p	maseni protok vodene pare	$kg\ h^{-1}$
Q_{so}	ulazni maseni protok soka	$kg\ h^{-1}$
Q_v	izlazni protok para soka	$kg\ h^{-1}$
S	površina izmjenjivača topline	m^2
T	temperatura uparavanja	$^{\circ}C$
T_k	temperatura koncentrata soka	$^{\circ}C$
T_{po}	temperatura ulazne pare	$^{\circ}C$
T_{so}	temperatura soka na ulazu	$^{\circ}C$
x	udio suhe tvari u koncentratu	$kg\ kg^{-1}$
x_o	udio suhe tvari u ulaznom soku	$kg\ kg^{-1}$

1. UVOD

Voda se iz voćnih sokova može ukloniti različitim metodama. Najraširenija metoda je tehnološka operacija uparavanja, a kojom se u svijetu proizvede više od 90% koncentriranog soka naranče (Balkan i sur., 2005).

Uparavanje je jedna od osnovnih jediničnih operacija koncentriranja kapljevina, a radi na principu otparavanja vode u uparivaču. Proces se provodi kontinuirano, a obzirom na termičku osjetljivost voćnih sokova potrebno je paziti da ne dođe do neželjenih promjena u samoj namirnici.

U ovom diplomskom radu, simulacijskim programom razvijenom na matematičkom modelu, napravljena je usporedba uparavanja rijetkog soka naranče u jednostrukom i trostrukom uparivaču. Matematički model razvijen je na temelju bilanci mase i energije za jednostruki i trostruki uparivač. Odnos ulaznih i izlaznih veličina u modelu opisan je nelinearnim jednadžbama, a za njihovo rješavanje korišten je postupak Newton-Raphson-ovih iteracija. Za različite ulazne veličine odabrani su rasponi vrijednosti i provedene su simulacije procesa za uparivač i uparnu stanicu. Rezultati su prikazani tablično te međusobno uspoređeni. Analiziranjem utjecaja ulaznih veličina na izlazne veličine (svojstva koncentrata) izvedeni su zaključci i odabrane su ulazne vrijednosti kojima se ostvaruje najveća efikasnost procesa i zadane koncentracije ugušćenog soka. Predložena su optimalna rješenja za oba tipa procesa uparavanja rijetkog soka.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. UPARAVANJE

Uparavanje je široko rasprostranjena jedinična operacija koncentriranja vodenih otopina. Proces je odavno poznat i nije se značajnije mijenjao tijekom vremena (Lovrić, 2003). Uklanjanje vode iz otopine provodi se zagrijavanjem otopine do temperature vrenja vode ili više temperature u prikladnoj posudi (isparivaču) i odvođenjem nastale pare. Toplina se dovodi kako bi se osigurala latentna toplina isparavanja, a metodama za povrat topline iz pare moguće je povećati ekonomičnost procesa (Coulson i sur., 1996).

Procesom uparavanja mogu se postići vrlo visoki udjeli suhe tvari u koncentratu koji se nalaze u rasponu od 50 do 80 % suhe tvari, ovisno o stupnju uparavanja i svojstvima ulazne sirovine (Lovrić, 2003).

Koncentrat u odnosu na početni rijetki sok ima veću viskoznost, gustoću, a ponekad sadrže kristalizirane oblike sastojaka te se dobiva para koja se odvodi kao nusprodukt i radi povećanja efikasnosti procesa najčešće se koristi se predgrijavanje ulaznog soka. U nekim proizvodnjama se izdvaja kao koristan nusprodukt i koristi za grijanje prostora, podizanje sadržaja topline materijalima u proizvodnom procesu ili za druge svrhe (Chawankul i sur., 2003; Lovrić, 2003).

2.1.1. Uparivači

Uparivači su uređaji pomoću kojih se odvaja tekuća komponenta iz smjese kako bi se dobila veća koncentracija otopljene tvari (Vanjur, 1974). U takvim uređajima toplina se najčešće prenosi s ogrjevne pare (koja kondenzira) preko čvrste stjenke na tekućinu koja dostiže točku vrelišta. Osnovna uloga uparivača kao dio opreme u proizvodnom procesu je izmjena topline te razdvajanje pare i koncentrirane otopine. Osnovni dijelovi uparivača su izmjenjivač topline, isparni prostor, separator, pumpe, cijevi i ventili.

Toplina koja se troši na uparavanje otopine može se koristiti i više puta. Kod jednostrukog uparavanja sekundarna para se ispuštala u atmosferu sve dok na proces nisu primijenjeni postupci optimiranja. Kod višestrukog se uparavanja sekundarna para jednog uparivača najčešće koristi kao ogrjevna para za sljedeći uparivač.

Izbor vrste i tipa uparivača za neki određeni proces ovisi o raznim čimbenicima, te se pri odabiru uparivača u obzir moraju uzeti vrsta i kvaliteta krajnjeg proizvoda. Odabire se najučinkovitija tehnologija za dostizanje željenih svojstava konačnoga proizvoda (Heldman i Hartel, 1998).

Postrojenja za uparavanje sastoje se od tri glavna dijela:

- izmjenjivač topline,
- odjeljivač tekućine i pare i
- kondenzator sekundarne pare (Lovrić, 2003).

2.1.2. Koncentriranje uparavanjem

Proces koncentriranja soka naranče provodi se kontinuirano.

Uparavanje je jedna od osnovnih tehnika koncentriranja tekuće hrane, to je klasičan i najčešće korišten postupak koji se temelji na dovođenju topline i odvođenju vodene pare koja nastaje. Koncentriranjem tekuće hrane najčešće se udio vode u namirnici smanjuje na 25-30%.

Sok naranče kao i ostali voćni sokovi smatraju se termički osjetljivim namirnicama te je potrebno paziti da ne dođe do procesa oksidacije, razgradnje, koagulacije ili polimerizacije pojedinih sastojaka (Koprivnjak, 2014).

Iako je uparavanje široko rasprostranjeno i dalje postoji niz prepreka koje treba svladati tijekom proizvodnje završnog produkta, odnosno koncentrata soka. Neki od neželjenih procesa su gubitak tvari arome (najčešći problem kod koncentriranja voćnih sokova), zatim toplinsko oštećenje proizvoda, stvaranje taloga na ogrjevnim tijelima i neki drugi. Zbog navedenih problema ne postoji jedan uređaj koji bi zadovoljio zahtjevima, već ima niz aparturnih i procesnih rješenja koji se biraju prema karakteristikama proizvoda (Lovrić, 2003).

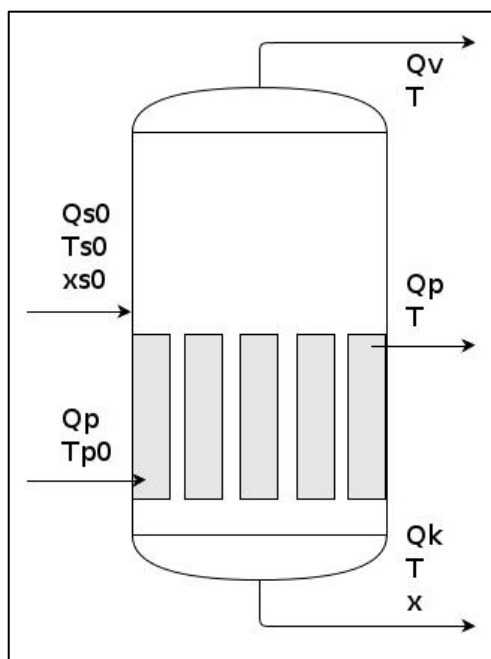
Uparavanjem se ukloni jedan dio vode iz rijetkoga soka. Smanjenjem sadržaja vode postiže se veća koncentracija svih ostalih sastojaka (Alves i Coelhoso, 2006). Koncentrirana otopina, zbog manjega sadržaja vode, postaje manje pogodna za razvoj mikroorganizama. Sokovi se proizvode kao bistri sok, a zatim se početni proizvod koncentrira odnosno uparava (Mitić, 1999).

2.1.3. Jednostupanjsko uparavanje i jednostruki uparivači

Jedan od najstarijih načina uparavanja je jednostupanjsko uparavanje kod kojega se para uvodi u sustav zagrijavajući proizvod u parnoj komori, voda iz proizvoda isparava stvarajući paru i ostavljajući iza sebe koncentriraniju otopinu, zatim se para uklanja iz isparivača i kondenzira natrag u vruću vodu. Vrući kondenzat koji nastaje nakon kondenzacije pare sadrži značajnu

količinu energije koja se može ponovno iskoristiti i tako povećati učinkovitost procesa uparavanja (Heldman i Hartel, 1998).

Jednostruki uparivači se koriste kada je dostupna jeftina opskrba parom, kada je protok nizak, kada je para toliko onečišćena da se ne može ponovno upotrijebiti te kada se moraju koristiti skupi materijali za izradu. Način rada jednostrukih uparivača može biti šaržni, polu-šaržni, kontinuirano-šaržni ili kontinuirani. Iz bilance mase soka i bilance topline može se izračunati koliko je topline potrebno dovesti u jednostruki uparivač (Coulson i sur., 1996).



Slika 1 Shematski prikaz jednostrukog uparivača (Magdić, 2023)

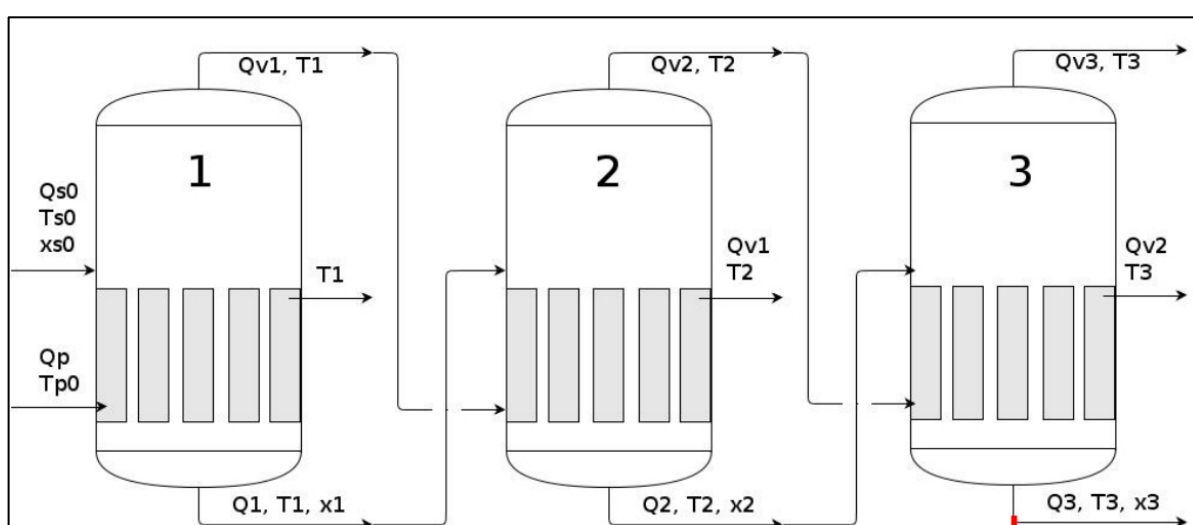
Uparivač s kratkim okomitim cijevima, tzv. Robertov uparivač je najčešće komercijalno korišten tip uparivača za nekorozivne otopine srednjeg viskoziteta kao što su šećerni sok, voćni sok, maltozni ekstrakt i dr.

Sastavljen je od kratkih uskih cijevi i široke povratne cijevi uvaljane u dva cijevna dna. Ogrjevna para struji u prostoru oko cijevi kroz koje se pumpa otopina s malim udjelom suhe tvari (Ibarz i Barbosa-Canovas, 2002).

Prednosti Robertovog uparivača su te da su jeftini u izvedbi i održavanju, ne zahtijevaju veliku visinu prostora te se postiže zadovoljavajući koeficijent prolaza topline kod uparavanja rijetkih otopina.

2.1.4. Trostupanjsko uparavanje i trostruki uparivači

Princip višestrukog uparavanja, u ovom slučaju trostupanjskog, je da se sekundarnom parom iz prvog uparivača uparava smjesa u drugom uparivaču, a sekundarnom parom iz drugog uparivača uparava se smjesa u trećem uparivaču. U svakom idućem uparivaču temperatura soka je viša, manji je sadržaj vode te je potrebna i manja količina topline za njeno otparavanje. Ovakvim postupkom uparavanja rijetkog soka znatno se smanjuje utrošak ogrjevne pare po 1 kg isparene vode. Odavno se koristi u šećeranama, mljekarama, tvornicama voćnih sokova itd. (Coulson i sur., 1996).



Slika 2 Shematski prikaz serijskog spoja tri uparivača (Magdić, 2023)

2.1.5. Newton-Raphson-ova metoda iteracije

Postupak za približno rješavanje jednadžbe $F(x) = 0$ u skupu realnih brojeva iteracijom. Slijed aproksimacija (x_k) točnoga rješenja x^* zadaje se \rightarrow induktivnim postupkom s početnom \rightarrow iteracijom x_1 i s uvjetom: $x_{k+1} = x_k - \frac{F(x_k)}{F'(x_k)}$ za sve $k = 1, 2, 3, \dots$

gdje su $F(x_k)$ =vrijednost funkcije u točki x_k , a $F'(x_k)$ =vrijednost derivacije funkcije u toj točki (Magdić, 2023).

Sljedeća vrijednost funkcije izračunava se kao razlika između početne vrijednosti i omjera funkcije i njene derivacije. Newton-Raphson-ova metoda ima kvadratnu konvergenciju, ali u

nekim područjima izračunavanja ne izračunava konvergentan niz rješenja te nije uvijek primjenjiva (Zeboudj i sur., 2005).

Slično se ovom iterativnom metodom rješavaju i nelinearni sustavi. Metoda je dobila ime po I. Newtonu i J. Raphsonu.

2.1.6. Sok naranče

Naranča je suptropska biljka iz porodice *Rutaceae*, roda *Citrus*. Ono je zimzeleno drvo visine do 12 m, cvjetovi su mirisni bijele boje, a plod je sočan i ukusan sa karakterističnom crvenkastom ili žućkastom korom, te sadrži veliki postotak vitamina C. (Car, 2017)



Slika 3 Naranča (Web 1)

Cijeđenjem plodova naranče proizvodi se rijetki sok bogat vitaminima. Radi lakšeg transporta i duljeg očuvanja kakvoće, iz rijetkog soka se uklanja dio vode. Ovaj postupak može se provesti različitim metodama (Alves, 2006; Bozkir, 2022), a uparavanje je jedna od najstarijih i često korištenih u prehrambenoj industriji (Poljski, 2016).

2.1.7. Matematički model uparavanja soka naranče

Matematički model stacionarnih stanja procesa uparavanja određen je slijedećim bilancama:

- ukupnom bilancom mase uparivača,
- bilancom mase suhe tvari,
- ukupnom bilancom energije topline i
- bilancom energije vodene pare.

Složenost procesa uparavanja je posljedica kompleksnosti određivanja koeficijenata prijenosa topline zbog promjenjivog udjela suhe tvari tijekom procesa. Maseni udio suhe tvari bitno utječe na slijedeća termofizička svojstva: specifičnu toplinu, koeficijent toplinske vodljivosti i toplinski difuzivitet, a bitno utječe i na reološka svojstva koncentrata. Funkcionalna ovisnost tih parametara o udjelu suhe tvari određuje se regresijskim modelima na osnovu eksperimentalnih istraživanja u laboratorijskim uvjetima. Stacionarna stanja za uparivač prikazan na **Slici 1** određena su slijedećim bilancama:

$$\text{ukupna bilanca mase uparivača} \quad Q_{s0} + Q_p = Q_1 + Q_v + Q_p \quad (1)$$

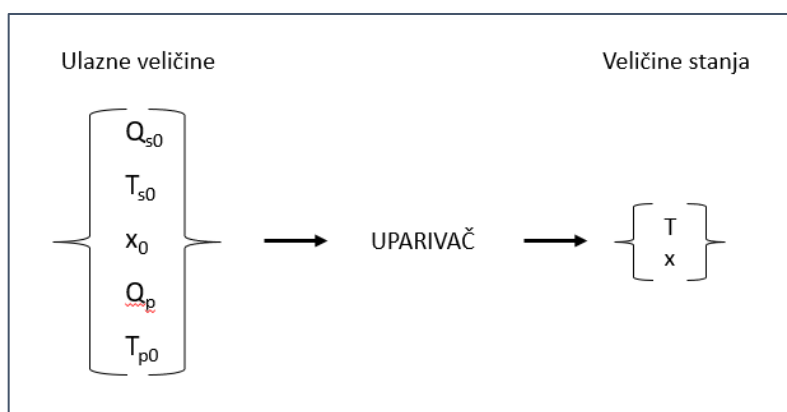
$$\text{bilanca mase suhe tvari} \quad Q_{s0} \cdot x_0 = Q_1 \cdot x \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ukupna bilanca energije topline} \quad Q_{s0} \cdot c_p(x_0) \cdot T_{s0} + Q_p \cdot i_p(T_{p0}) &= Q_1 \cdot c_p(x) \cdot T + \\ Q_p \cdot i_v(T) & \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{bilanca energije za vodenu paru} \quad Qh(x) \cdot S \cdot (T_{p0} - T) = Q_p \cdot (i_p(T_{p0}) - i_v(T)) \quad (4)$$

U bilancama (3 i 4) naznačeno je da su specifične topline soka $c_p(x)$ i ukupan koeficijent prijenosa topline $h(x)$ funkcije masenog udjela suhe tvari u soku. Entalpije zasićene vodene pare i ukapljene vode označene su u bilancama sa $i_p(T)$ i $i_v(T)$. Površina izmjenjivača topline S je također bitan parametar i pretpostavljeno je da je ona ista za sve tri uparne stanice.

Model stacionarnih stanja prikazan je shematski na **Slici 4**. Jednadžbama (1-4) jednoznačno su zadane ulazne veličine u koncentratu, određena temperatura uparavanja T i udio suhe tvari x .



Slika 4 Sustavni prikaz ulaznih veličina i veličina stanja materijala/soka (Magdić, 2023)

Među izlaznim veličinama (Q_p , T_p , Q_s , T_s , x) izabrane su veličine koje opisuju stanje koncentrata (temperatura koncentrata, T i udio suhe tvari, x) i one su važne za kontrolu i optimalnu provedbu procesa uparavanja.

Zbog neprestane nelinearne promjene udjela suhe tvari u soku nije potrebno niti je prikladno izračunavati precizne vrijednosti udjela. Stoga su upotrijebljeni slijedeći linearni regresijski modeli za koeficijent prijenosa topline, specifičnu toplinu i termodinamičke funkcije:

$$h(x) = h_0 - h_1 \cdot x \quad (5)$$

$$c_p(x) = c_{ps} \cdot x + c_{pl} \cdot (1 - x)$$

$$i_p(x) = i_{p0} + i_{p1} \cdot T$$

$$i_v(T) = i_{v0} + i_{v1} \cdot T$$

Valjanost ovih regresijskih modela je ograničena na područje vrijednosti veličina stanja (T i x) u okolini stacionarnog stanja. Udaljavanje vrijednosti podataka od područja vrijednosti stacionarnog stanja procesa izračunavaju se vrijednosti manje točnosti.

Radi pojednostavljenja modela bilance **(1-4)** transformiramo u dvije nelinearne jednadžbe tako da se izlazni protoci koncentrata i para soka naranče izraze kao funkcije ulaznog protoka i udjela suhe tvari. Opisanim postupkom izvedu se slijedeće nelinearne jednadžbe:

$$f_1(x, T) = Q_{s0} \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x}\right) \cdot i_p(T) + Q_{s0} \cdot \left(\frac{x_0}{x} \cdot c_p(x) \cdot T + Q_p \cdot i_v(T)\right) - Q_{s0} \cdot c_p(x_0) \cdot T_{s0} - Q_p \cdot i_p(T_{p0}) \quad (6)$$

$$f_2(x, T) = Q_p \cdot (i_p(T_{p0}) - i_v(T)) - h(x) \cdot S \cdot (T_{p0} - T) \quad (7)$$

Jednadžbe se rješavaju Newton-Raphson-ovom iterativnom metodom. Tijekom iteracija potrebno je odrediti elemente Jacobijeve matrice i rješavati sistem linearnih jednadžbi sa dvije nepoznanice. Iteraciona formula za izračun temperature koncentrata i udjela suhe tvari u koncentratu glasi:

$$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ T_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \\ T_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial T} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial T} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1(x_k, T_k) \\ f_2(x_k, T_k) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Postupak započinje sa pretpostavljenim vrijednostima varijabli (x_1, T_1) i iteracije se nastavlja dok se ne postigne zanemariva ili dopuštena razlika vrijednosti u tri uzastopne iteracije.

Na temelju rezultata sustava jednadžbi (8) za izabrane vrijednosti ulaznih veličina i parametara možemo izračunati efikasnost (djelotvornost) uparavanja (E). Definirana je kao omjer mase para soka naranče po jedinici mase utrošene vodene pare.

$$E_{\left(\frac{\text{masa para soka naranče}}{\text{masa vodene pare}}\right)} = \frac{Q_v}{Q_p}$$

Bilance mase i energije za serijski spoj tri uparne stanice (**Slika 2**) imaju slijedeći oblik:

ukupne bilance mase za pojedinu uparnu stanicu:

uparivač (1):

$$Q_{s0} + Q_p = Q_{v1} + Q_{l1} + Q_p \quad (9)$$

uparivač (2):

$$Q_{l1} + Q_{v1} = Q_{v2} + Q_{l2} + Q_{v1} \quad (10)$$

uparivač (3):

$$Q_{l2} + Q_{v2} = Q_{v3} + Q_{l3} + Q_{v2} \quad (11)$$

bilanca suhe tvari:

uparivač (1):

$$Q_{s0} \cdot X_0 = Q_{l1} + x_1 \quad (12)$$

uparivač (2):

$$Q_{l1} \cdot X_1 = Q_{l2} + x_2 \quad (13)$$

uparivač (3):

$$Q_{l2} \cdot X_2 = Q_{l3} + x_3 \quad (14)$$

ukupne bilance energije:

uparivač (1):

$$Q_{s0} \cdot c_p(x_0) \cdot T_{s0} + Q_p \cdot i_p(T_{p0}) = Q_{v1} \cdot i_p(T_1) + Q_{l1} \cdot c_p(x_1) \cdot T_1 + Q_p \cdot i_v(T_1) \quad (15)$$

uparivač (2):

$$Q_{l1} \cdot c_p(x_1) \cdot T_1 + Q_{v1} \cdot i_p(T_1) = Q_{v2} \cdot i_p(T_2) + Q_{l2} \cdot c_p(x_2) \cdot T_2 + Q_{v1} \cdot i_v(T_2) \quad (16)$$

uparivač (3):

$$Q_{l2} \cdot c_p(x_2) \cdot T_2 + Q_{v2} \cdot i_p(T_2) = Q_{v3} \cdot i_p(T_3) + Q_{l3} \cdot c_p(x_3) \cdot T_3 + Q_{v3} \cdot i_v(T_3) \quad (17)$$

bilance energije za vodenu paru:

uparivač (1):

$$h(x_1) \cdot S \cdot (T_{p0} - T_1) = Q_p \cdot (i_p(T_{p0}) - i_v(T_1)) \quad (18)$$

uparivač (2):

$$h(x_2) \cdot S \cdot (T_1 - T_2) = Q_{v1} \cdot (i_p(T_1) - i_v(T_2)) \quad (19)$$

uparivač (3):

$$h(x_3) \cdot S \cdot (T_2 - T_3) = Q_{v2} \cdot (i_p(T_2) - i_v(T_3)) \quad (20)$$

Bilance se rješavaju postupno, počevši s jednadžbama za prvu uparnu stanicu. Jednadžbe **(9, 12, 15 i 18)** svedu se na dvije nelinearne jednadžbe, i primijeni se iterativni postupak **(8)**. Rješenja su varijable (x_1, T_1) koje omogućuju rješavanje bilanci **(10, 13, 16 i 19)** za drugu uparnu stanicu. Na izračunate vrijednosti primijeni se ponovo iterativni postupak i izračunava rješenje i za treću uparnu stanicu.

Povezivanjem uparnih stanica postiže se znatno bolja ekonomičnost procesa budući da se koristi toplina akumulirana u koncentratu i parama soka naranče. Povećanje efikasnosti procesa možemo odrediti izračunavanjem pojedinačnih efikasnosti za povezane uparivače $(E_1, E_2 i E_3)$ i ukupne vrijednosti efikasnosti procesa uparavanja (E) za uparnu stanicu s tri serijski povezana uparivača:

$$E_1 = \frac{Q_{v1}}{Q_p} \quad (21)$$

$$E_2 = \frac{Q_{v2}}{Q_{v1}} \quad (22)$$

$$E_3 = \frac{Q_{v3}}{Q_{v2}} \quad (23)$$

$$E = \frac{Q_{v3}}{Q_p} \quad (24)$$

Matematički model preuzet je iz literature (Magdić, 2023).

2.2. MS EXCEL

Microsoft (MS) Excel je računalni program za rad s tablicama. Koristi se za organizaciju, analizu i vizualizaciju podataka putem tablica i grafikona. Omogućuje korisnicima izvođenje različitih matematičkih i statističkih izračuna, korištenje funkcija i formula, te izradu grafikona i pivot tablica.

Pogodan je za izradu matematičkih veza među podacima, njihovo modeliranje i vizualizaciju rezultata grafikonima, shemama i slikama.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

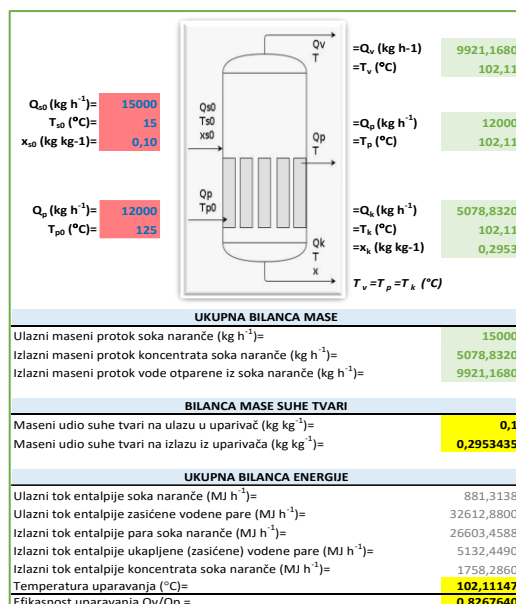
Zadatak rada je je primjenom matematičkog modela u MS Excelu analizirati utjecaj različitih procesnih veličina u uparivaču na udio suhe tvari, količinu i temperaturu koncentrata soka naranče. Model treba temeljiti na bilancama mase i energije čija su rješenja određena primjenom Newton-Raphson-ove iterativne metode. U radu je pretpostavljeno da će nelinearni model biti prikladan za simulacije procesa. Cilj rada je odrediti svojstva rijetkog soka i ulazne vrijednosti procesnih veličina koje proces uparavanja rijetkog soka čine najučinkovitijim.

3.2. MATERIJALI I METODE

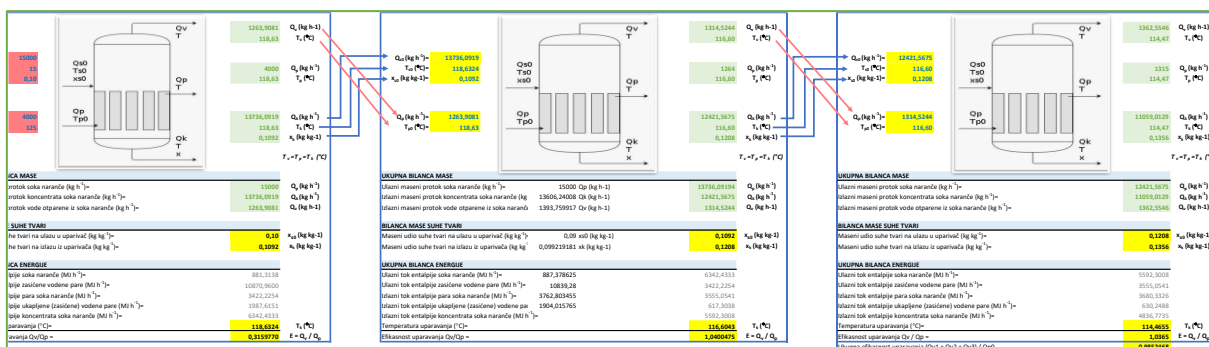
Pomoću računalnog programa MS Excel korištenjem dvanaest simulacija za jednostruki uparivač i deset simulacija za trostruki uparivač, dobivene su različite izlazne vrijednosti za različite kombinacije i promjene ulaznih procesnih veličina.

3.2.1. Simulacije procesa uparavanja u MS Excel-u

U računalnom programu MS Excel izrađene su simulacija procesa jednostrukog i trostrukog uparavanja rijetkog soka na temelju opisanog matematičkog modela. Na Slikama 5 i 6 prikazani su dijelovi MS Excel simulacija.



Slika 5 Prikaz dijela simulacije za jednostruki uparivač (Magdić, 2023)



Slika 6 Prikaz dijela simulacije za trostruki uparivač (Magdić, 2023)

3.2.2. Modeliranje uparavanja rijetkog soka naranče

Kako bi se provjerio utjecaj ulaznih procesnih veličina u jednostrukom i trostrukom uparivaču na svojstva koncentrata rijetkog soka naranče odabran je određeni raspon za svaku ulaznu procesnu veličinu te se kroz određeni broj simulacija on mijenjao kako bi se dobila najveća efikasnost samog procesa. Odabrani su rasponi ulaznih veličina primjenjivi u procesima, a za koje Newton-Raphson-ova metoda izračunava konvergentan niz rješenja.

Kod jednostrukog uparivača odabrane su vrijednosti za provjeru utjecaja masenog protoka soka na ulazu u rasponu od 15000 kg h^{-1} do 20000 kg h^{-1} , za temperaturu soka na ulazu u rasponu od 15 °C do 20 °C , za udio suhe tvari u ulaznom soku $0,09-0,14 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka, za maseni protok vodene pare između 12000 kg h^{-1} i 13000 kg h^{-1} , te za temperaturu vodene pare u rasponu od 120 °C do 125 °C .

Za trostruki uparivač, zbog više međusobnih interakcija procesnih veličina mogući su drugačiji rasponi za odabir vrijednosti ulaznih veličina. Za ulazni maseni protok soka vrijednosti se nalaze u rasponu od 15000 kg h^{-1} i 20000 kg h^{-1} , što je isto kao i kod jednostrukog uparivača. Rasponi ostalih procesnih veličina su promijenjeni. Za temperaturu soka na ulazu određen je raspon od 5 °C do 25 °C , za udio suhe tvari u soku $0,05-0,14 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka i za temperaturu vodene pare $115-125 \text{ °C}$. Za maseni protok vodene pare odabrane vrijednosti se nalaze između 4000 kg h^{-1} i 6200 kg h^{-1} i trostruko su manje od onih kod jednostrukog uparivača jer se uparena voda izdvojena iz rijetkog soka koristi kao ogrjevna para u sljedećim uparivačima.

Svrha modeliranja bila je analizirati utjecaj ulaznih procesnih veličina na konačnu efikasnost uparavanja te međusobna usporedba i određivanje najpovoljnijih uvjeta uparavanja za proizvodnju koncentrata traženih svojstava.

4. REZULTATI

4.1. MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – JEDNOSTRUKI UPARIVAČ

Proveden je veliki broj simulacija uparavanja u jednostrukom uparivaču od kojih su rezultati za 12 simulacija prikazani u **Tablicama 1 i 2**.

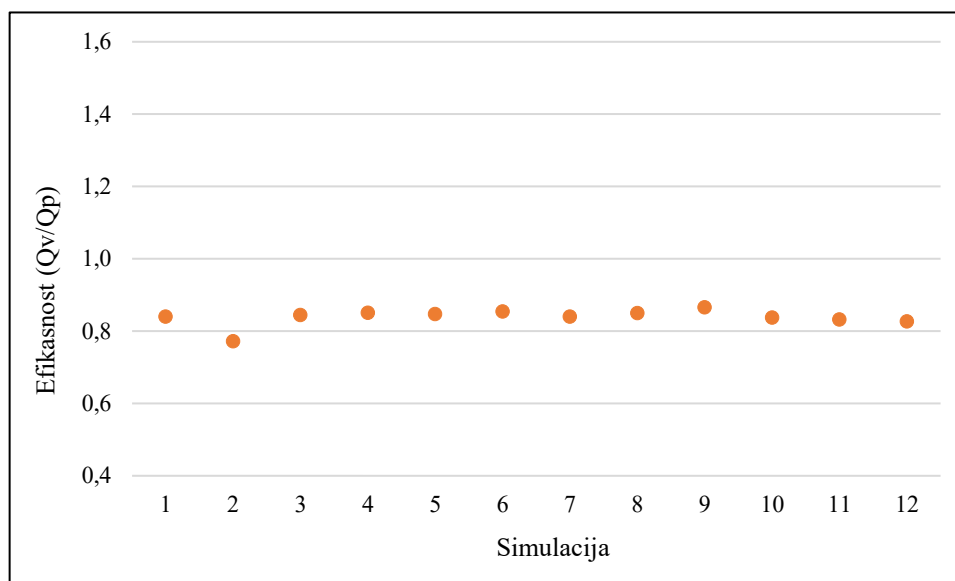
Tablica 1 Simulacije (1-6) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u jednostrukom uparivaču

Simulacija						
	1	2	3	4	5	6
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	20000	15000	15000	15000	15000
Tso (°C) [15-20]	15	15	17	20	15	15
x (kg kg ⁻¹) [0,09-0,14]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14
Qp (kg h ⁻¹) [12000-13000]	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Tp (°C) [120-125]	120	120	120	120	120	120
UKUPNA BILANCA MASE						
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	20000,00	15000,00	15000,00	15000,00	15000,00
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	10074,80	9264,00	10129,26	10211,09	10158,92	10252,46
Koncentrat, Qk (kg h ⁻¹)	4925,20	10736,00	4870,74	4788,91	4841,08	4747,54
BILANCA SUHE TVARI						
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14
x (kg kg ⁻¹)	0,3046	0,1863	0,3080	0,3132	0,3718	0,4423
UKUPNA BILANCA ENERGIJE						
Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	1175,09	998,82	1175,09	869,18	857,05
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	32517,84	32517,84	32517,84	32517,84	32517,84	32517,84
Supara (MJ h ⁻¹)	26930,36	24796,36	27074,77	27291,66	27130,68	27350,79
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	4864,54	4978,59	4860,89	4855,20	4787,93	4696,01
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	1604,26	3917,97	1581,00	1546,06	1468,42	1328,09
Tk (°C)	96,78	99,05	96,71	96,60	95,26	93,43
(Qv/Qp)	0,840	0,772	0,844	0,851	0,847	0,854
PROVJERA BILANCI TOPLINE						
(1+2) - (3+4+5) = 0	DA	DA	DA	DA	DA	DA

Tablica 2 Simulacije (7-12) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u jednostrukom uparivaču

Simulacija						
	7	8	9	10	11	12
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	15000	15000	15000	15000	15000
Tso (°C) [15-20]	15	15	15	15	15	15
x (kg kg ⁻¹) [0,09-0,14]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Qp (kg h ⁻¹) [12000-13000]	12000	12400	13000	12000	12000	12000
Tp (°C) [120-125]	120	120	120	121	123	125
UKUPNA BILANCA MASE						
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	15000,00	15000,00	15000,00	15000,00	15000,00
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	10074,80	10537,26	11256,50	10044,18	9982,78	9921,17
Koncentrat, Qk (kg h ⁻¹)	4925,20	4462,74	3743,50	4955,82	5017,22	5078,83
BILANCA SUHE TVARI						
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
x (kg kg ⁻¹)	0,3046	0,3361	0,4007	0,3027	0,2990	0,2953
UKUPNA BILANCA ENERGIJE						
Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	881,31	881,31	881,31	881,31	881,31
Para ulaz (MJ h ⁻¹)	32517,84	33601,77	35227,66	32536,85	32574,86	32612,88
Supara (MJ h ⁻¹)	26930,36	28141,08	30009,30	26865,48	26734,98	26603,46
Para izlaz (MJ h ⁻¹)	4864,54	4947,46	5026,25	4918,19	5025,38	5132,45
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	1604,26	1394,55	1073,42	1634,49	1695,82	1758,29
Tk (°C)	96,78	95,26	92,31	97,85	99,98	102,11
(Qv/Qp)	0,840	0,850	0,866	0,837	0,832	0,827
PROVJERA BILANCI TOPLINE						
(1+2) - (3+4+5) = 0	DA	DA	DA	DA	DA	DA

Izračunate efikasnosti za proces uparavanja rijetkog soka u jednostrukom uparivaču prikazane su grafički na **Slici 7**.



Slika 7 Efikasnost uparavanja rijetkog soka naranče u jednostrukom uparivaču

4.2. MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – TROSTRUKI UPARIVAČ

Radi usporedbe efikasnosti proces uparavanja i odabira optimalnih uvjeta uparavanja u trostrukoj uparnoj stanici provedene su simulacije za slične ulazne vrijednosti, rezultati za 12 simulacija prikazani u **Tablicama 3-8**.

Tablica 3 Simulacije (1-2) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

	1. simulacija			2. simulacija			
	I	II	III	I	II	III	
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13586,56	12116,77	Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	20000	19456	18883
Tso (°C) [5-25]	15	113,5888	111,3009	Tso (°C) [5-25]	15	113,63	112,76
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,110403	0,123795	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,10	0,11
Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1413,436	1469,79	Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	544	573,62
Tp (°C) [115-125]	120	113,5888	111,3009	Tp (°C) [115-125]	120	114	112,76
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13586,56	12116,77	Sok, Qso (kg h ⁻¹)	20000,00	19456,25	18882,63
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1413,436	1469,79	1522,644	Supara, Qv (kg h ⁻¹)	543,75	573,62	604,24
Qk (kg h ⁻¹)	13586,56	12116,77	10594,13	Qk (kg h ⁻¹)	19456,25	18882,63	18278,39
BILANCA SUHE TVARI							
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,110403	0,123795	xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1028	0,1059
x (kg kg ⁻¹)	0,110403	0,123795	0,141588	x (kg kg ⁻¹)	0,1028	0,1059	0,1094
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	6001,68	5195,932	Sok (MJ h ⁻¹)	1175,09	8642,66	8306,00
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	3815,802	3962,613	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	1467,98	1547,82
Supara (MJ h ⁻¹)	3815,802	3962,613	4099,278	Supara (MJ h ⁻¹)	1467,98	1547,82	1629,58
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1903,112	658,9368	670,3192	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1903,73	256,82	268,72
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	6001,68	5195,932	4388,948	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	8642,66	8306,00	7955,52
Tk (°C)	113,5888	111,3009	108,8824	Tk (°C)	113,63	112,76	111,84
(Qv/Qp)	0,353	1,040	1,036	(Qv/Qp)	0,136	1,055	1,053
(Q3/Qp)		1,101		(Q3/Qp)		0,430	

Tablica 4 Simulacije (3-4) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

3. simulacija				4. simulacija			
	I	II	III		I	II	III
Q_{so} (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13533,66	12008,96	Q_{so} (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13454,31	11847,24
T_{so} (°C) [5-25]	17	113,5867	111,2108	T_{so} (°C) [5-25]	20	113,5835	111,0752
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,110835	0,124907	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,111488	0,126612
Q_p (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1466,337	1524,707	Q_p (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1545,689	1607,072
T_p (°C) [115-125]	120	113,5867	111,2108	T_p (°C) [115-125]	120	113,5835	111,0752
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Q_{so} (kg h ⁻¹)	15000,00	13533,66	12008,96	Sok, Q_{so} (kg h ⁻¹)	15000,00	13454,31	11847,24
Supara, Q_v (kg h ⁻¹)	1466,34	1524,71	1579,22	Supara, Q_v (kg h ⁻¹)	1545,69	1607,07	1664,05
Q_k (kg h ⁻¹)	13533,66	12008,96	10429,73	Q_k (kg h ⁻¹)	13454,31	11847,24	10183,19
BILANCA SUHE TVARI							
x_o (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1108	0,1249	x_o (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1115	0,1266
x (kg kg ⁻¹)	0,1108	0,1249	0,1438	x (kg kg ⁻¹)	0,1115	0,1266	0,1473
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	998,82	5976,41	5141,53	Sok (MJ h ⁻¹)	1175,09	5938,51	5060,05
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	3958,61	4110,45	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	4172,83	4332,16
Supara (MJ h ⁻¹)	3958,61	4110,45	4251,14	Supara (MJ h ⁻¹)	4172,83	4332,16	4478,74
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1903,08	683,05	694,18	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1903,02	719,13	729,80
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5976,41	5141,53	4306,66	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5938,51	5060,05	4183,68
T_k (°C)	113,59	111,21	108,70	T_k (°C)	113,58	111,08	108,42
(Q_v/Q_p)	0,367	1,040	1,036	(Q_v/Q_p)	0,386	1,040	1,035
(Q₃/Q_p)	1,143			(Q₃/Q_p)	1,204		

Tablica 5 Simulacije (5-6) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

5. simulacija				6. simulacija			
	I	II	III		I	II	III
Q_{so} (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13547,2	12036,2	Q_{so} (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13507,7	11955,6
T_{so} (°C) [5-25]	15	113,48	111,08	T_{so} (°C) [5-25]	15	113,36	110,85
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,12	0,14	0,15	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,14	0,10	0,18
Q_p (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1452,84	1510,93	Q_p (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1492,27	1552,16
T_p (°C) [115-125]	120	113,48	111,08	T_p (°C) [115-125]	120	113,36	110,85
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Q_{so} (kg h ⁻¹)	15000,00	13547,17	12036,24	Sok, Q_{so} (kg h ⁻¹)	15000,00	13507,73	11955,57
Supara, Q_v (kg h ⁻¹)	1452,825	1510,93	1565,337	Supara, Q_v (kg h ⁻¹)	1492,269	1552,16	1608,164
Q_k (kg h ⁻¹)	13547,17	12036,24	10470,91	Q_k (kg h ⁻¹)	13507,73	11955,57	10347,41
BILANCA SUHE TVARI							
x_o (kg kg ⁻¹)	0,12	0,1329	0,14954	x_o (kg kg ⁻¹)	0,14	0,155467	0,17565
x (kg kg ⁻¹)	0,132869	0,1495	0,1719	x (kg kg ⁻¹)	0,155467	0,17565	0,202949
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	869,18	5885,329	5058,272	Sok (MJ h ⁻¹)	857,05	5768,935	4920,612
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	3921,885	4072,996	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	4028,09	4183,568
Supara (MJ h ⁻¹)	3921,885	4072,996	4213,347	Supara (MJ h ⁻¹)	4028,09	4183,568	4327,681
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1901,249	675,9461	686,8624	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1899,31	692,8446	703,2076
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5885,329	5058,272	4231,059	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5768,935	4920,612	4073,291
T_k (°C)	113,4776	111,0784	108,5317	T_k (°C)	113,3618	110,8459	108,1629
(Q_v/Q_p)	0,363	1,040	1,036	(Q_v/Q_p)	0,373	1,040	1,036
(Q₃/Q_p)	1,132			(Q₃/Q_p)	1,163		

Tablica 6 Simulacije (7-8) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

7. simulacija				8. simulacija			
	I	II	III		I	II	III
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13587	12117	Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13445,79	11829,88
Tso (°C) [5-25]	15	113,59	111,30	Tso (°C) [5-25]	15	113,3671	110,8439
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,11	0,12	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,1	0,111559	0,126798
Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1413	1469,79	Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4133	1554,207	1615,912
Tp (°C) [115-125]	120	114	111,30	Tp (°C) [115-125]	120	113,3671	110,8439
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13586,56	12116,77	Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000	13445,79	11829,88
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1413,44	1469,79	1522,64	Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1554,207	1615,912	1673,148
Qk (kg h ⁻¹)	13586,56	12116,77	10594,13	Qk (kg h ⁻¹)	13445,79	11829,88	10156,73
BILANCA SUHE TVARI							
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1104	0,1238	xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,111559	0,126798
x (kg kg ⁻¹)	0,1104	0,1238	0,1416	x (kg kg ⁻¹)	0,111559	0,126798	0,147685
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	6001,68	5195,93	Sok (MJ h ⁻¹)	881,3138	5923,156	5041,464
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10839,28	3815,80	3962,61	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	11199,69	4195,291	4355,394
Supara (MJ h ⁻¹)	3815,80	3962,61	4099,28	Supara (MJ h ⁻¹)	4195,291	4355,394	4502,577
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1903,11	658,94	670,32	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1962,553	721,5884	732,1367
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	6001,68	5195,93	4388,95	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5923,156	5041,464	4162,144
Tk (°C)	113,59	111,30	108,88	Tk (°C)	113,3671	110,8439	108,1697
(Qv/Qp)	0,353	1,040	1,036	(Qv/Qp)	0,376	1,040	1,035
(Q3/Qp)	1,101			(Q3/Qp)	1,172		

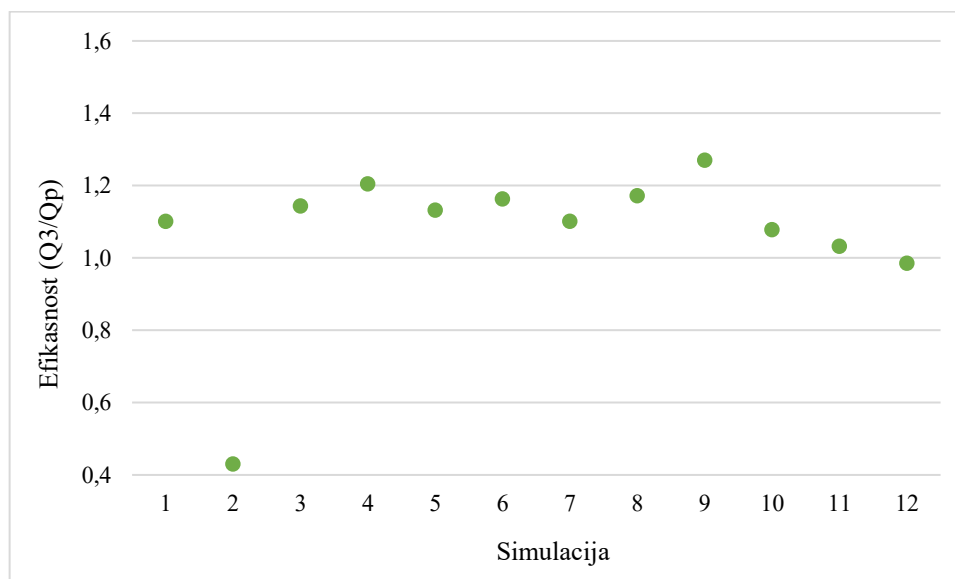
Tablica 7 Simulacije (9-10) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

9. simulacija				10. simulacija			
	I	II	III		I	II	III
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13233,99	11398,31	Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13616	12177
Tso (°C) [5-25]	15	113,0325	110,1519	Tso (°C) [5-25]	15	114,60	112,36
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,113344	0,131598	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,11	0,12
Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4333	1766,007	1835,686	Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1384	1438,89
Tp (°C) [115-125]	120	113,0325	110,1519	Tp (°C) [115-125]	121	115	112,36
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13233,99	11398,31	Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13616,33	12177,44
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1766,01	1835,69	1899,25	Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1383,67	1438,89	1490,79
Qk (kg h ⁻¹)	13233,99	11398,31	9499,06	Qk (kg h ⁻¹)	13616,33	12177,44	10686,65
BILANCA SUHE TVARI							
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1133	0,1316	xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1102	0,1232
x (kg kg ⁻¹)	0,1133	0,1316	0,1579	x (kg kg ⁻¹)	0,1102	0,1232	0,1404
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	5805,44	4810,97	Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	6069,26	5273,99
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	11741,65	4766,07	4945,74	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10845,62	3737,66	3881,72
Supara (MJ h ⁻¹)	4766,07	4945,74	5107,77	Supara (MJ h ⁻¹)	3737,66	3881,72	4016,17
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	2051,45	814,80	823,37	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1920,01	651,21	662,96
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	5805,44	4810,97	3825,57	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	6069,26	5273,99	4476,58
Tk (°C)	113,03	110,15	107,09	Tk (°C)	114,60	112,36	110,00
(Qv/Qp)	0,408	1,039	1,035	(Qv/Qp)	0,346	1,040	1,036
(Q3/Qp)	1,270			(Q3/Qp)	1,078		

Tablica 8 Simulacije (11-12) koncentriranja rijetkog soka naranče uparavanjem u trostrukom uparivaču

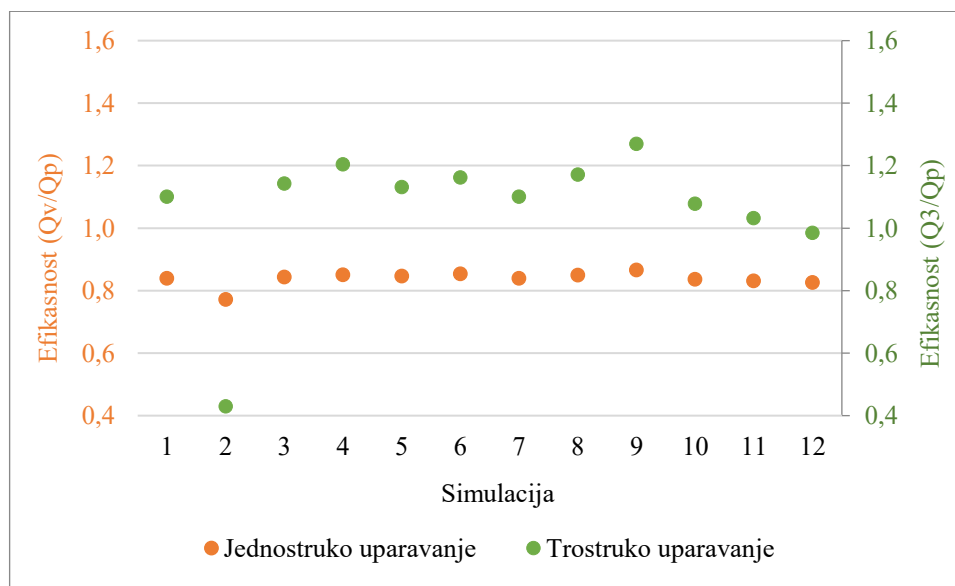
11. simulacija				12. simulacija			
	I	II	III		I	II	III
Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13676,07	12299,21	Qso (kg h ⁻¹) [15000-20000]	15000	13736,09	12421,57
Tso (°C) [5-25]	15	116,61	114,48	Tso (°C) [5-25]	15	118,6324	116,6043
x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,11	0,12	x (kg kg ⁻¹) [0,05-0,14]	0,10	0,109201	0,120758
Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1323,93	1376,86	Qp (kg h ⁻¹) [4000-6200]	4000	1263,908	1314,524
Tp (°C) [115-125]	123	116,61	114,48	Tp (°C) [115-125]	125	118,6324	116,6043
UKUPNA BILANCA MASE							
Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13676,07	12299,21	Sok, Qso (kg h ⁻¹)	15000,00	13736,09	12421,57
Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1323,93	1376,86	1426,84	Supara, Qv (kg h ⁻¹)	1263,91	1314,52	1362,55
Qk (kg h ⁻¹)	13676,07	12299,21	10872,37	Qk (kg h ⁻¹)	13736,09	12421,57	11059,01
BILANCA SUHE TVARI							
xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1097	0,1220	xo (kg kg ⁻¹)	0,10	0,1092	0,1208
x (kg kg ⁻¹)	0,1097	0,1220	0,1380	x (kg kg ⁻¹)	0,1092	0,1208	0,1356
UKUPNA BILANCA ENERGIJE							
Sok (MJ h ⁻¹)	881,3138	6205,271	5431,9292	Sok (MJ h ⁻¹)	881,31	6342,43	5592,30
Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10858,29	3580,516	3719,0014	Para_ulaz (MJ h ⁻¹)	10870,96	3422,23	3555,05
Supara (MJ h ⁻¹)	3580,516	3719,001	3848,9346	Supara (MJ h ⁻¹)	3422,23	3555,05	3680,33
Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1953,814	634,857	647,25836	Para_izlaz (MJ h ⁻¹)	1987,62	617,30	630,25
Koncentrat (MJ h ⁻¹)	6205,271	5431,929	4654,7377	Koncentrat (MJ h ⁻¹)	6342,43	5592,30	4836,77
Tk (°C)	116,615	114,4832	112,23288	Tk (°C)	118,63	116,60	114,47
(Qv/Qp)	0,331	1,040	1,036	(Qv/Qp)	0,316	1,040	1,037
(Q3/Qp)	1,032			(Q3/Qp)	0,985		

Izračunate efikasnosti za proces uparavanja rijetkog soka u trostrukom uparivaču prikazane su na **Slici 8**.



Slika 8 Efikasnost uparavanja rijetkog soka naranče u trostrukom uparivaču

Usporedba izračunatih efikasnosti za proces uparavanja rijetkog soka u jednostrukom i trostrukom uparivaču prikazana je na **Slici 9**.



Slika 9 Usporedba efikasnosti procesa kod jednostrukog i trostrukog uparavanja

5. RASPRAVA

5.1. RASPRAVA REZULTATA MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – JEDNOSTRUKI UPARIVAČ

Povećanjem ulaznog masenog protoka soka (simulacije 1 i 2), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare), efikasnost uparavanja se smanjuje, udio suhe tvari i temperatura koncentrata soka naranče se povećavaju.

Povećanjem temperature soka na ulazu (simulacije 3 i 4), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, udio suhe tvari u ulaznom soku, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare), efikasnost uparavanja se povećava, povećava se i udio suhe tvari u koncentratu dok se temperatura koncentrata soka naranče smanjuje.

Povećanjem udjela suhe tvari u ulaznom soku (simulacije 5 i 6), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare), efikasnost uparavanja se povećava, povećava se i udio suhe tvari dok se temperatura koncentrata soka naranče smanjuje.

Povećanjem masenog protoka vodene pare (simulacije 8 i 9), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku i temperatura ulazne pare) efikasnost uparavanja se povećava, također se povećava i udio suhe tvari dok se temperatura koncentrata smanjuje.

Povećanjem temperature ulazne pare (simulacije 10-12), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku i maseni protok vodene pare), efikasnost uparavanja se smanjuje, smanjuje se i udio suhe tvari dok se temperatura koncentrata povećava.

Iz **Tablica 1 i 2**, kao i iz **Slike 7** vidi se da je u simulaciji 9 efikasnost uparavanja najveća i iznosi 86,6%. Ovakvu efikasnost bilo je moguće ostvariti uz maseni protok vodene pare koji iznosi 13000 kg h⁻¹ uz sljedeće vrijednosti ostalih ulaznih veličina: $Q_{s0} = 15000 \text{ kg h}^{-1}$, $T_{s0} = 15 \text{ °C}$, $x = 0,10 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka, $T_p = 120 \text{ °C}$.

Provjera točnosti bilanci topline provodi se usporedbom zbroja vrijednosti ulaznih veličina sa zbrojem vrijednosti izlaznih veličina. Ukoliko među njima nema razlike, bilance su dobro postavljene i rezultati su točni.

5.2. RASPRAVA REZULTATA MODELIRANJE KONCENTRIRANJA RIJETKOG SOKA NARANČE UPARAVANJEM – TROSTRUKI UPARIVAČ

Povećanjem ulaznog masenog protoka soka u prvom uparivaču (1. i 2. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare) efikasnost uparavanja se smanjuje, smanjuje se i udio suhe tvari, a temperatura koncentrata se povećava.

U 2. simulaciji je izračunata vrlo mala efikasnost uparavanja u trostrukom uparivaču jer je za značajno veći maseni protok hladnog soka na ulazu u proces dovedena jednaka količina pare.

Povećanjem temperature soka na ulazu u prvi uparivač (3. i 4. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, udio suhe tvari u ulaznom soku, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare) efikasnost uparavanja se povećava, udio suhe tvari se povećava i temperatura koncentrata se smanjuje.

Povećanjem udjela suhe tvari u ulaznom soku (5. i 6. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, maseni protok vodene pare i temperatura ulazne pare) efikasnost uparavanja se povećava, povećava se udio suhe tvari, a temperatura koncentrata se smanjuje.

Povećanjem masenog protoka vodene pare na ulazu (7. i 8. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku i temperatura ulazne pare) efikasnost uparavanja se povećava, povećava se i udio suhe tvari, dok se temperatura koncentrata smanjuje.

Povećanjem masenog protoka ulazne pare na $Q_p = 4333 \text{ kg h}^{-1}$ i uz temperaturu pare $T_p = 120 \text{ °C}$ (9. simulacija) i uz početni protok masene pare $Q_p = 4000 \text{ kg h}^{-1}$ ali temperaturu pare za jedan stupanj višu, $T_p = 120 \text{ °C}$ (10. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku) efikasnost uparavanja se smanjuje, smanjuje se i udio suhe tvari, a temperatura koncentrata se povećava.

Povećanjem temperature ulazne pare na $T_p = 123 \text{ °C}$ (11. simulacija) pa na temperaturu pare za dva stupnja višu, $T_p = 125 \text{ °C}$ (12. simulacija), uz nepromijenjene vrijednosti drugih ulaznih veličina (ulazni maseni protok soka, temperatura soka na ulazu, udio suhe tvari u ulaznom soku

i maseni protok pare) efikasnost uparavanja se smanjuje, smanjuje se i udio suhe tvari, a temperatura koncentrata se povećava.

Povećanjem masenog protoka vodene pare na 4333 kg h^{-1} dobivena je najveća efikasnost (9. simulacija) $Q_3/Q_p=1,270$, uz sljedeće ulazne vrijednosti: $Q_{s0}= 15000 \text{ kg h}^{-1}$, $T_{s0}= 15 \text{ °C}$, $x= 0,10 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka, $Q_p= 4333 \text{ kg h}^{-1}$, $T_p= 120 \text{ °C}$.

Kada se usporede vrijednosti efikasnosti na **Slici 9**, dobivene u simulacijama jednostrukog i trostrukog uparavanja jasno je vidljivo da je bolji odabir trostruko uparavanje jer se ostvaruju veće efikasnosti procesa. Razlog tomu je iskorištavanje sekundarne pare prethodnog uparivača za uparavanje smjese u svakom idućem uparivaču. Ovakvim postupkom ostvaruje se niža temperatura nego u prethodnom uparivaču, ali još uvijek dovoljna za vrenje otopine, smanjuje se utrošak ogrjevnice pare po 1 kg isparene vode i proces je efikasniji.

6. ZAKLJUČCI

Modeliranjem i upravljanjem procesa uparavanja rijetkog soka naranče u jednostrukom i trostrukom uparivaču moguće je utjecati na efikasnost procesa.

Nelinearni model prikladan je za modeliranje i simulaciju procesa.

Prije same provedbe simulacija određen je raspon vrijednosti za ulazne procesne veličine koje će se mijenjati. U obzir je važno uzeti termičku osjetljivost sastojaka soka na povišene temperature i u skladu s tim postaviti ulazne varijable.

Iz provedenih simulacija moguće je odabrati vrijednosti ulaznih procesnih veličina kojima će se omogućiti učinkovita proizvodnja koncentriranoga soka.

Na temelju rezultata simulacija jednostrukog uparavanja moguće je zaključiti sljedeće:

- povećanjem masenog protoka soka na ulazu efikasnost uparavanja se smanjuje,
- povećanjem temperature soka na ulazu efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem udjela suhe tvari u ulaznom soku efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem masenog protoka vodene pare efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem temperature ulazne pare povećava se protok koncentrata ali se efikasnost uparavanja smanjuje,
- uvjeti u kojima se efikasnost povećava rezultiraju povećanjem udjela suhe tvari, dok se temperatura koncentrata smanjuje,
- uvjeti u kojima se efikasnost smanjuje rezultiraju smanjenjem udjela suhe tvari, dok se temperatura koncentrata povećava i
- najveća efikasnost (0,866) postignuta je u 9. simulaciji, za maseni protok vodene pare $Q_p=13000 \text{ kg h}^{-1}$ uz sljedeće ulazne vrijednosti: $Q_{s0}= 15000 \text{ kg h}^{-1}$, $T_{s0}= 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $x= 0,10 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka i $T_p= 120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na temelju rezultata simulacija trostrukog uparavanja moguće je zaključiti sljedeće:

- povećanjem masenog protoka soka na ulazu u prvi uparivač efikasnost uparavanja se smanjuje,

- povećanjem temperature soka na ulazu u prvi uparivač efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem udjela suhe tvari u ulaznom soku efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem masenog protoka vodene pare na ulazu u prvi uparivač efikasnost uparavanja se povećava,
- povećanjem temperature ulazne pare povećava se protok koncentrata ali se efikasnost uparavanja smanjuje i
- najveća efikasnost (1,270) postignuta je u 9. simulaciji za maseni protok vodene pare $Q_p=4333 \text{ kg h}^{-1}$ uz sljedeće ulazne vrijednosti: $Q_{s0}= 15000 \text{ kg h}^{-1}$, $T_{s0}= 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $x= 0,15 \text{ kg s.t. kg}^{-1}$ soka i $T_p= 120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Usporedivši efikasnosti jednostrukog i trostrukog uparavanja, u svim simulacijama sa jednakim ulaznim vrijednostima trostruko uparavanje je efikasnije i samim time je bolji odabir za koncentriranje rijetkog soka naranče.

Trostrukim uparavanjem rijetkog soka znatno se smanjuje utrošak ogrjevne pare po 1 kg isparene vode budući da se koristi toplina akumulirana u parama soka naranče i koncentratu.

Sve provedene simulacije daju očekivane i logične rezultate te omogućuju usporedbe procesnih uvjeta i svojstava koncentrata.

Analiza rezultata omogućuje odabir učinkovitosti i ekonomičnosti procesa uparavanja.

Računalni model i simulacija oba procesa omogućuju adaptivno upravljanje i optimiranje procesa uparavanja s ciljem povećanja količine koncentrata na izlazu uz što nižu temperaturu.

7. LITERATURA

- Alves V.D. i Coelho I.M. (2006), Orange juice concentration by osmotic evaporation and membrane distillation: A comparative study. *Journal of Food Engineering*, 74(1):125-133. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.019>
- Balkan F., Colak N. i Hepbasli A. (2005), Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, 29:455-470. <https://doi.org/10.1002/er.1074>
- Bozkir, H. i Tegkul, Y. (2022), Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46:e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
- Car, H. (2017), Gorka ili ljuta naranča, kraljica zime dubrovačkog područja. *Matka : časopis za mlade matematičare*, 25:98. <https://hrcak.srce.hr/180952>
- Chawankul N. i sur. (2001), Simulation of an agitated thin film evaporator for concentrating orange juice using AspenPlus™. *Journal of Food Engineering*, 47(4):247-253. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00122-9)
- Coulson J.M. i sur. (1996), Chemical Engineering, Butterworth-Heinemann, Oxford; Boston. <urn:oclc:record:1310604157>
- Heldman D.R. i Hartel R.W. (1998), Principles of food processing. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6093-7>
- Ibarz A. i Barbosa-Canovas G.V. (2002), Unit Operation in Food Engineering. CRC Press, Boca Ration. <https://doi.org/10.1201/9781420012620>
- Koprivnjak O. (2014), Kvaliteta, sigurnost i konzerviranje hrane. Medicinski fakultet, Rijeka. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:184:813436>
- Lovrić T. (2003), Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva. Sveučilište u Zagrebu. <https://plus.cobiss.net/cobiss/bh/bs/bib/2847864>
- Magdić, D. (2023), Materijali za nastavu na nastavnom predmetu Modeliranje operacija i procesa, PTF Osijek. http://www.ptfos.unios.hr/modeli/images/Predavanja/DMagdic_Modeliranje_Predavanja.pdf
- Mitić D. (1999), Voćni sokovi i osvježavajuća bezalkoholna pića: priručnik o uslovima za proizvodnju i kvalitet. Poslovna zajednica "Vrenje", Beograd. <https://www.tehnologijahrane.com/knjiga/vocni-sokovi-i-osvezavajuca-bezalkoholna-pica-prirucnik-o-uslovima-za-proizvodnju-i-kvalitet>
- Poljski V. (2016), Kemijska i organoleptička svojstva različitih sokova od naranče. Završni rad, Veleučilište u Požegi. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:112:062209>
- Vanjur I. (1974), Smanjenje potrošnje vode potrebne za hlađenje kondenzatora višestepenih uparivača primenom kule za hlađenje vode. „Agroindustrija“, Novi Sad, 1974. <https://hrcak.srce.hr/97196>

Web 1: AGR Exports (2024) *Fruits*. Dostupno na: <http://agr-exports.com/fruits/> (Pristupljeno: 20. kolovoz 2024.)

Zeboudj S., Belhaneche-Bensemra N. i Belabbes R. (2005), Use of surface response methodology for the optimization of the concentration of the sweet orange essential oil of Algeria by wiped film evaporator. *Journal of Food Engineering*, 67:507-512. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:95549466>