

# Sušenje biljaka infracrvenim zračenjem

---

**Antonije Koščak, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:142490>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-09**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Mihael Antonije Koščak

**SUŠENJE BILJAKA INFRACRVENIM ZRAČENJEM**

**DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada: Prof. dr. sc. Aleksandra Sander

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Aleksandra Sander

Izv. prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

Doc. dr. sc. Igor Dejanović

Zagreb, srpanj 2017.

*Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Aleksandri Sander na pomoći, savjetima i strpljenju pri izradi ovog rada. Također veliko hvala i svim ostalim djelatnicima Zavoda za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije.*

## Sažetak

Sušenje je jedna od najstarijih i najraširenijih metoda konzerviranja hrane koja posljednjih godina znatno dobiva na važnosti zbog porasta otpora društva prema kemijski konzerviranim prehrambenim proizvodima. Naime, sušenjem se dobiva higijenski i zdravstveno ispravan proizvod očuvane kakvoće i produljenog vijeka trajanja bez dodavanja raznovrsnih kemijskih konzervansa. Temeljni zadatak sušenja je ostvariti sadržaj vode u proizvodu pri kojemu se zaustavljaju procesi truljenja deaktivacijom mikroorganizama i enzima te onemogućavanjem pojedinih biokemijskih i kemijskih reakcija, a da pri tome taj proizvod ostane neoštećen kako bi se rehidratacijom mogao vratiti u početno stanje. Proces sušenja se odvija u sušionicima koji na razne načine mogu proizvodu dovoditi energiju potrebnu za isparavanje vlage. Najzastupljeniji su konvekcijski sušionici u kojima se proizvod suši u struji toplog zraka. Takvi sušionici imaju brojne nedostatke kao visoku potrošnju energije, neravnomjerno zagrijavanje i dugo vrijeme sušenja. Zbog toga se posljednjih godina ulažu veliki naponi u istraživanje novih, modernijih sušionika. Jedan od takvih neistraženih sušionika je infracrveni sušionik.

U ovom je radu istražen utjecaj temperature na kinetiku sušenja različitog povrća (list peršina, korijen peršina, celer, mrkva, paprika, poriluk) u infracrvenom sušioniku. Kinetičke krivulje sušenja opisane su odabranim matematičkim modelima, a parametri modela korelirani su uvjetima sušenja i geometrijom uzoraka. Karakteristične boje i oblici dobivenih uzoraka uspoređeni su s uzorcima paralelno osušenima u komercijalnom konvekcijskom sušioniku.

**Ključne riječi:** infracrveno sušenje, kinetika sušenja, matematički modeli, povrće

## Summary

Drying is one of the oldest and most common method of food preservation, which becomes more and more significant lately due to the fact that society has started avoiding buying chemically preserved edible products. By drying food, we get a healthy product of preserved quality and prolonged shelf life, without adding different chemicals to preserve the food. The basic goal of drying is to achieve a certain ratio of water in the product. At that ratio, microorganisms and enzymes get deactivated, and certain chemical and biochemical reactions stop, all of which stops the process of rotting. The product stays protected, so that it can be returned to its original state by adding water. Process of drying happens in dryers which are capable of bringing energy in different ways to the product, which is necessary to evaporate the moisture. The most widespread dryers are convectional dryers in which a current of hot air is used to dry products. However, such dryers require a lot of energy to run, they take a long time to dry a product, and they dry unevenly. Because of those flaws, there are attempts to research and develop new types of dryers. One of those is the infrared dryer.

In this work, the effect of temperature on the kinetics of drying different vegetables (parsley leaf, parsley root, celery, carrot, pepper, leek) in an infrared dryer is researched. Kinetic drying curves are described by chosen mathematical models, and model parameters are correlated by drying conditions and sample geometry. Characteristic colors and shapes of dried samples have been compared to the samples dried in a commercial convectional dryer.

**Key words:** drying kinetics, infrared drying, mathematical models, vegetables

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teorijski dio.....</b>	<b>3</b>
	2.1 Sušenje	3
	2.1.1 Kinetika sušenja	4
	2.1.2 Matematički modeli	7
	2.2 Sušenje infracrvenim zračenjem	8
	2.2.1 Osnove	9
	2.2.2 Prednosti i nedostaci	10
	2.2.3 Primjena	12
<b>3</b>	<b>Eksperimentalni dio .....</b>	<b>13</b>
	3.1 Cilj rada	13
	3.2 Uzorci	13
	3.3 Postupak	14
	3.3.1 Priprava uzoraka	14
	3.3.2 Uređaji za sušenje	16
	3.3.3 Metodika proračuna	18
<b>4</b>	<b>Rezultati.....</b>	<b>20</b>
	4.1 Celer	20
	4.2 Mrkva	32
	4.3 Paprika	39
	4.4 Korijen peršina	46
	4.5 Lišće peršina	53
	4.6 Poriluk	60
<b>5</b>	<b>Rasprava.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>Zaključak.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Popis simbola .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Životopis .....</b>	<b>79</b>

# 1 Uvod

Povrće čine kultivirane i neke samonikle biljke ili njihovi djelovi namijenjeni prehrani ljudi. Osim pružanja širokog spektra okusa i raznolikosti u ljudskoj prehrani, povrće je vrlo važan i neophodan izvor vitamina i minerala.<sup>1</sup> Uz vodu, najzastupljeniji sastojak povrća su ugljikohidrati u obliku niskomolekularnih šećera (glukoza i fruktoza) te visokomolekularnih polimera (škrob). Također sadrži celulozu, hemicelulozu, pektine i legnin koji se zajedničkim nazivom nazivaju biljna vlakna. Prehrambena vrijednost biljnih vlakna se tek nedavno otkrila pa je i porasla potražnja, pogotovo u zapadnim zemljama, za povrćem bogatim vlaknima. Za normalan rad organizma potreban je vitamin C koji se prvenstveno dobiva iz voća i povrća. Osim vitamina C, povrće je odličan izvor vitamina A ( $\beta$ - karotena) te minerala kao što su kalcij, fosfor i željezo.<sup>2-3</sup> Zbog svega navedenoga, povrće je steklo komercijalnu važnost te je postalo bitna grana poljoprivredne industrije. Nedavna zbivanja u poljoprivrednoj tehnologiji znatno su povećala svjetsku proizvodnju povrća. Povećanjem proizvodnje povećao se transport i prodaja povrća diljem svijeta, a kako bi to bilo moguće uz minimalne gubitke, potrebna je prikladna tehnika pohrane i obrade povrća u svrhu produljenja roka trajanja. Naime, većina povrća sadrži više od 80% vode i zbog toga je vrlo kvarljiva. Procijenjuje se da u zemljama u razvoju oko 30-40 % proizvedene hrane propadne zbog neprikladnog rukovanja, prijevoza i skladištenja.<sup>4</sup> Zbog toga se istražuju različite metode konzerviranja čiji je cilj pretvorba kvarljive hrane u stabilni produkt kojega je moguće skladištiti duže vrijeme. Uz to omogućuje pohranu sezonskih namirnica bez gubitka njihovih nutritivnih i estetskih vrijednosti u svrhu obogaćivanja inače monotone ljudske prehrane. Primarno, konzerviranje hrane je omogućilo širenje tržišta egzotičnog povrća diljem svijeta. Trenutno korištene metode konzerviranja povrća u industriji su pohrana u limenkama, zamrzavanje i dehidracija.

Dehidracija ili sušenje je jedna od najstarijih i najraširenijih metoda konzerviranja hrane. Uklanjanje vlage spriječava rast i razmnožavanje mikroorganizama odgovornih za truljenje. Također smanjuje masu i volumen proizvoda, što rezultira manjom ambalažom, manjim prostorom skladištenja, manjim troškovima prijevoza i omogućava skladištenje proizvoda pri sobnim uvjetima. U početku se za takvo konzerviranje hrane koristila sunčeva energija, gdje bi se hrana izložila sunčevoj svjetlosti kako bi iz nje ishlapila voda. Naglim razvojem industrije (kemijske, prehrambene, tekstilne, drvne, farmaceutske,...) u 20. stoljeću javljaju se prvi sušionici koji ne ovise o nepouzdanom izvoru energije suncu te se procesi sušenja u takvim sušionicima mogu provoditi u kontroliranim uvjetima. Najčešće korišteni sušionici u

prehrambenoj industriji su komorni, tunelni sušionici i sušionici s pokretnom trakom. To su konvekcijski sušionici u kojima se vlažni materijal nalazi u struji zraka pri čemu se ne giba (komorni) ili se giba pomoću posebnih uređaja (tunelni sušionik i sušionik s pokretnom trakom).<sup>5</sup> Takvi sušionici imaju brojne nedostatke kao relativno dugo vrijeme sušenja (ovisno o tvari, sušenje može trajati deset i više sati), veliki utrošak energije (od ukupne, industrijska potrošnja energije na proces sušenja u zemljama kao što su SAD, Kanada, Francuska, V.Britanija, Danska i Njemačka otpada čak 15 do 25 %)<sup>4</sup>, niska efikasnost (zrak se na ulazu u sušionik zagrijava kaloriferom) i tvar se nejednoliko suši.<sup>6</sup> Stoga se u posljednje vrijeme intenzivno istražuju nove vrste sušionika kojima bi se smanjilo vrijeme sušenja i smanjio utrošak energije, a da se pri tome ne promijeni kvaliteta krajnjeg proizvoda. Jedan od takvih relativno neistraženih sušionika je sušionik u kojemu se tvar suši infracrvenim elektromagnetskim zračenjem. Za razliku od konvektivnih sušionika gdje se zagrijava i okolina sušene tvari, u infracrvenim sušionicima zračenje direktno penetrira u sušenu tvar zbog čega se povećava efikasnost prijenosa topline te smanjuje vrijeme sušenja zbog bržeg postizanja temperature sušenja. Kako bi se ta vrsta sušionika mogla prenijeti iz laboratorijskog istraživanja u industriju potrebno je kinetičke krivulje sušenja opisati odgovarajućim matematičkim modelom te istražiti utjecaj uvjeta sušenja na kinetiku, odnosno istražiti utjecaj temperature i dimenzija sušene tvari na parametre odgovarajućeg matematičkog modela.

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj temperature i geometrije uzorka na kinetiku sušenja različitog povrća (list peršina, korijen peršina, celer, mrkva, paprika, poriluk) u infracrvenom sušioniku, te odabrati matematički model koji najbolje opisuje mjerne podatke. Karakteristične boje i oblici dobivenih uzoraka te vrijeme trajanja sušenja usporedit će se s uzorcima osušenima u komercijalnom konvekcijskom komornom sušioniku.



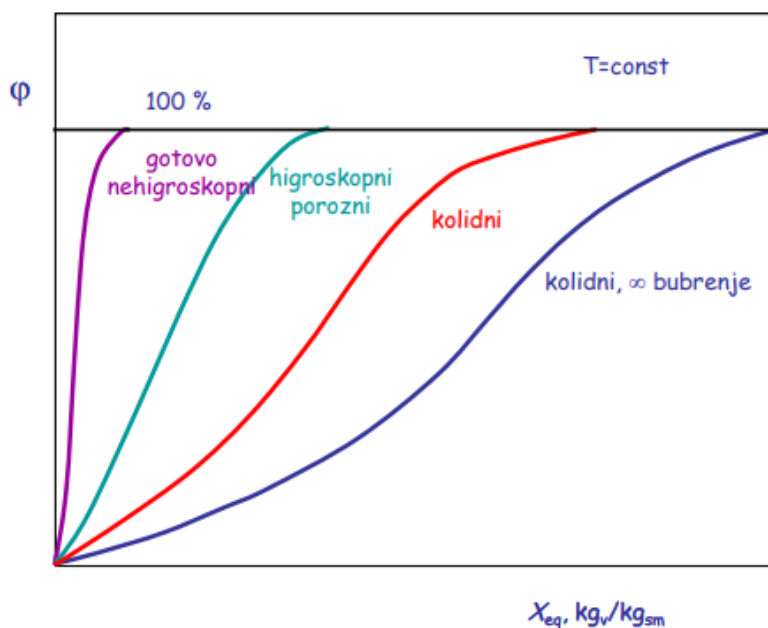
## 2 Teorijski dio

### 2.1 Sušenje

Sušenje je toplinski separacijski proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala u svrhu dobivanja suhog proizvoda.<sup>7</sup> Prilikom sušenja se osim procesa prijenosa tvari, topline i količine gibanja, mogu odvijati različiti fizikalni i kemijski procesi. Prijenos tvari, odnosno prijenos vlage iz vlažnog materijala ovisi o veličini, obliku i položaju čestica, odnosno pora unutar čvrstog materijala te o otporu kretanju vlage iz unutrašnjosti materijala prema njegovoj površini. Toplina se dovodi materijalu kako bi vlaga mogla ispariti iz vlažnog materijala. Ona se može dovesti konvekcijom, kondukcijom ili zračenjem (radijacija) ili u nekim slučajevima njihovom kombinacijom. Kod većine industrijskih sušionika, materijal se suši kada je u kontaktu sa strujom plinovitog medija ili kontaktu sa grijanom površinom. Time se toplina dovodi na površinu vlažnog materijala te ona nakon toga prodire u njegovu unutrašnjost. No, kod dielektričnih sušionika energija se u obliku zračenja dovodi u unutrašnjost vlažnog materijala gdje se zbog interakcije elektromagnetskih valova i vode generira toplina. Time se istovremeno zagrijava cijeli volumen vlažnog materijala, što rezultira kraćim vremenom sušenja. Fizikalni proces koji se odvija je promjena agregatnog stanja vode u vlažnom materijalu iz kapljevitog u plinovito.

Sadržaj vlage materijala prikazuje se kao količina vlage prisutna u jediničnoj masi suhog materijala. Za opis kinetike sušenja važno je poznavanje kritičnog i ravnotežnog sadržaja vlage materijala. Kritični sadržaj vlage materijala je sadržaj vlage materijala kod kojeg brzina sušenja počinje opadati, u stalnim vanjskim uvjetima. Ravnotežni sadržaj vlage materijala je sadržaj vlage vlažne krutine u ravnoteži sa smjesom zraka i vlage, kod danog tlaka i temperature. Ovisi o brojnim parametrima, kao što su kemijski sastav i struktura materijala te svojstva okolišnog zraka. Ovisnost ravnotežnog sadržaja vlage materijala i relativne vlažnosti zraka kod dane temperature naziva se sorpcijska izoterma, slika 1. Sorpcijska izoterma predstavlja minimalnu vrijednost sadržaja vlage koju materijal može postići sušenjem ovisno o relativnoj vlazi okolnog zraka ili koji će poprimiti preuzimanjem vlage iz zraka. Na temelju takvih izoterma može se izračunati ravnotežni sadržaj vlage, potreban za određivanje pokretačke sile procesa prijenosa tvari. Izoterme definiraju i odgovarajuće uvjete skladištenja i pakovanja gotovih produkata. Sorpcijske se izoterme određuju gravimetrijskom ( $T=\text{const.}$ )

ili higrometrijskom ( $Y=\text{const}$ ) metodom. Ravnotežni sadržaj vlage materijala uključen je u mnoge matematičke modele koji opisuju kinetičke krivulje sušenja higroskopnih materijala.



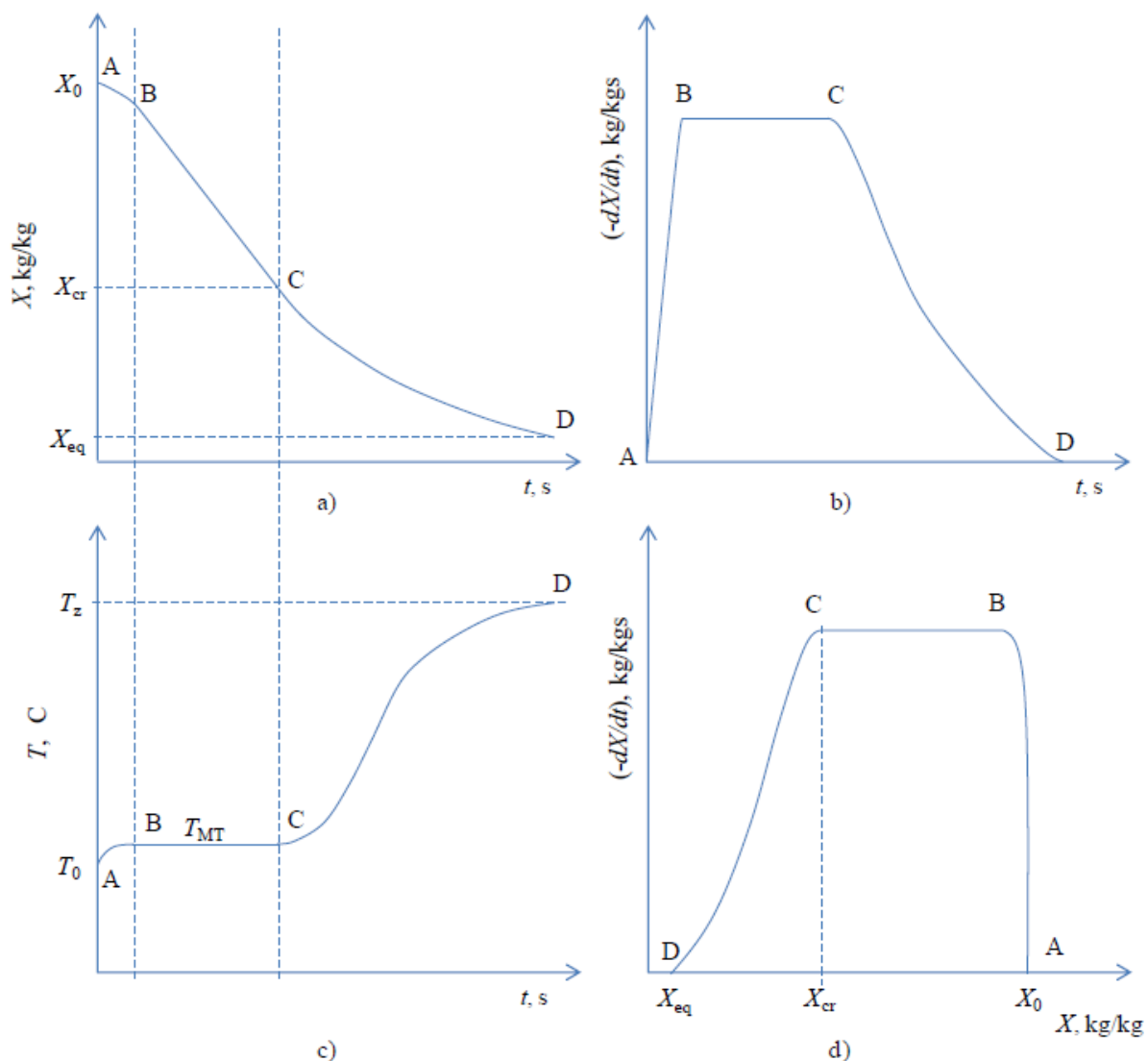
**Slika 1.** Sorpcijske izoterme različitih vrsta materijala

Brzina sušenja ovisi o prijenosu topline iz okoline na površinu vlažnog materijala te prijenosu vlage iz unutrašnjosti prema površini materijala i njenom isparavanju s površine. Uklanjanje vode u obliku pare s površine materijala ovisi vanjskim uvjetima kao što su temperatura, vlažnost, brzina i smjer strujanja zraka, tlak itd. Poznavanje utjecaja vanjskih uvjeta na kinetiku sušenja te promjene kojima je izložen materijal vrlo je bitno jer kod nekih materijala može doći do pretjeranog sušenja i naglog skupljanja materijala što dovodi do njegovog pucanja ili deformacije. Brzo uklanjanje površinske slobodne vlage rezultira velikim gradijentima vlage iz unutrašnjosti materijala prema njegovoj površini. Da bi se spriječila deformacija materijala potrebno je u tom slučaju smanjiti brzinu površinskog isparavanja povećanjem relativne vlažnosti zraka. Prijenos vlage iz unutrašnjosti materijala na površinu ovisi o unutarnjim uvjetima, tj. ovisi o fizikalnim svojstvima materijala, temperaturi i sadržaju vlage materijala. Uslijed razvijanja temperaturnog gradijenta unutar materijala, vlaga isparava s površine. Zbog toga dolazi do kretanja vlage iz unutrašnjosti materijala prema površini, a može se odvijati kapilarnim ili difuzijskim mehanizmom ili njihovom kombinacijom.<sup>8</sup>

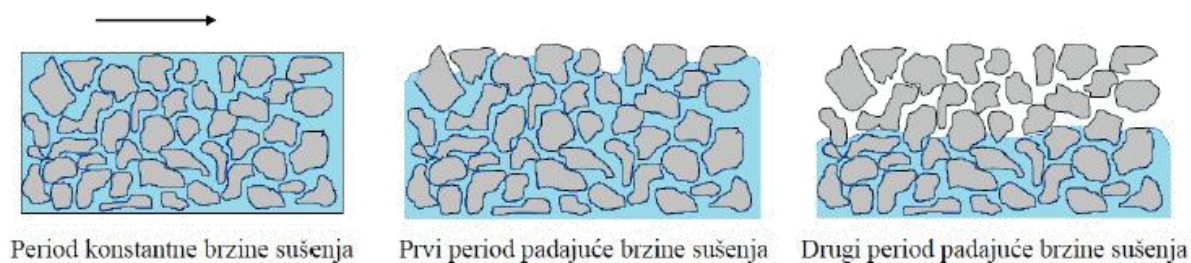
### 2.1.1 Kinetika sušenja

Kinetika sušenja opisuje promjenu sadržaja vlage, temperature materijala i promjenu brzine sušenja s vremenom odnosno sadržajem vlage. Izgled kinetičkih krivulja sušenja

određen je vrstom i svojstvima materijala, vrsti prisutne vlage (slobodna, vezana), vrstom i uvjetima sušenja.<sup>7</sup>



**Slika 2.** Kinetičke krivulje sušenja: a)  $X(t)$ ; b)  $(-dX/dt)(t)$ ; c)  $T(t)$ ; d)  $(-dX/dt)(X)$



**Slika 3.** Stanje materijala tijekom pojedinih perioda sušenja

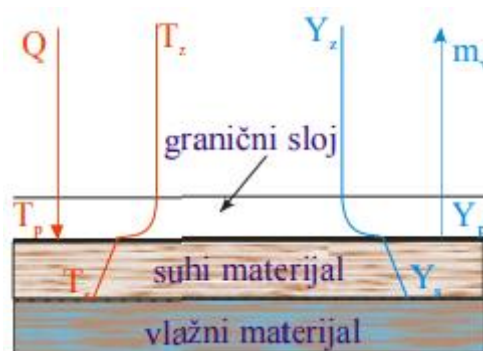
Slika 2. prikazuje kinetičke krivulje sušenja na kojima je moguće uočiti nekoliko perioda sušenja vlažnog materijala. Prvi period (A-B), odnosno period stabilizacije, označava početak zagrijavanja vlažnog materijala pri čemu se gubi vrlo mala količina vlage prisutna na

površini, a temperatura površine poprima temperaturu mokrog termometra  $T_{MT}$ . Sljedeći period (B-C) je period konstantne brzine sušenja kod kojeg je površina materijala potpuno prekrivena tankim slojem vlage, slika 3. Tijekom perioda konstantne brzine sušenja ovisnost sadržaja vlage materijala o vremenu je linearna, a sam proces sušenja je pod kontrolom vanjskih uvjeta kao što su oblik čestica, debljina materijala, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, smjer i brzina strujanja zraka te način dovođenja topline, slika 4. Ovaj period traje dokle god je brzina dovođenja vlage iz unutrašnjosti materijala do njegove površine dovoljno velika da se osigura tanki sloj vlage preko cijele površine materijala.



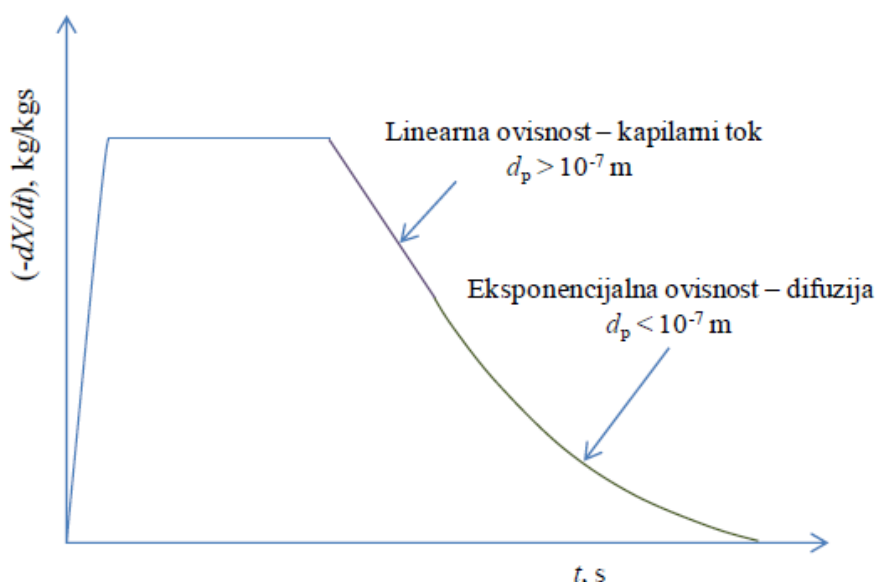
**Slika 4.** Prijenos tvari i topline u periodu konstantne brzine sušenja

Zatim slijedi period padajuće brzine (C-D) kod kojeg površina materijala prvo postaje djelomično, a zatim potpuno suha, slika 3. U tom periodu brzina kojom se vlaga dovodi do površine materijala manja je od brzine isparavanja, pa brzina sušenja počinje opadati s vremenom. Na brzinu sušenja utječu svojstva materijala kao što su veličina i raspodjela veličina pora materijala, slika 5.<sup>7</sup>



**Slika 5.** Prijenos tvari i topline u periodu padajuće brzine sušenja

Postoje dva mehanizma prijenosa vlage unutar materijala, a to su difuzija i kapilarni tok. Kroz materijal čiji je promjer pora veći od  $10^{-7}$  m, vlaga će se kretati kapilarnim mehanizmom, dok će se kroz materijale sa manjim porama kretati difuzijskim mehanizmom. Vrstu mehanizma kojom se vlaga kreće iz unutrašnjosti materijala prema njegovoj površini najlakše je iščitati iz kinetičkih krivulja sušenja gdje kapilarni tok karakterizira linearna ovisnost brzine sušenja o vremenu, dok difuzijski tok pokazuje eksponencijalnu ovisnost, slika 6.<sup>9</sup>



**Slika 6.** Definiranje mehanizma prijenosa vlage na temelju oblika ovisnosti brzine sušenja o vremenu

Između perioda konstantne brzine sušenja i perioda padajuće brzine sušenja nalazi se točka C kojoj odgovara kritični sadržaj vlage  $X_{cr}$ . Kritični sadržaj vlage ovisi o brzini sušenja, debljini materijala i promjeru pora materijala. Veća brzina sušenja i promjer pora, a manja debljina materijala rezultiraju većom vrijednosti kritičnog sadržaja vlage. Ako je početni sadržaj vlage materijala  $X_0$  manji od kritičnog sadržaja vlage  $X_{cr}$ , ne postoji period konstantne brzine sušenja.

### 2.1.2 Matematički modeli

Sušenje većine materijala je složen proces koji uključuje usporedne i povezane procese prijenosa topline i prijenos mase unutar materijala koji se suši. Ti procesi sušenja određeni su velikim brojem parametara čiji pravilni odabir je vrlo bitan iz ekonomskog i kvalitativnog aspekta. Naime, pravilnim odabirom uvjeta provedbe procesa sušenja osigurava se minimalna potrošnja energije za dobivanje što kvalitetnijeg proizvoda. Bitni parametri u procesu sušenja su geometrijske karakteristike materijala (veličina čestica i raspodjela veličina čestica, raspodjela veličina pora, oblik čestica), prijenosna svojstva materijala (efektivni difuzijski koeficijent, koeficijent prijenosa tvari i konstanta sušenja), tip sušionika, njegova geometrija i način zagrijavanja. Literatura nudi nekoliko matematičkih modela koji se koriste za opis kinetike sušenja. Najčešće korišteni modeli prikazani su u tablici 1.<sup>10-11</sup>

**Tablica 1.** Najčešće korišteni matematički modeli za opis kinetike sušenja

Matematički model	
$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \Psi = \frac{8}{\pi^n} * e^{-\frac{\pi^n}{4*x^2}*D_{ef}*t}$	II. Fickov zakon
$\Psi = A_0 * e^{-k_0*t}$	Henderson i Pabis
$\Psi = A_0 * e^{-k_0*t} + A_1 * e^{-k_1*t}$	Sharaf-Eldeen, Blaisdell, Hamdy
$\Psi = e^{-K*t}$	Lewis
$\Psi = e^{-k*t^n}$	Page
$\Psi = e^{-\left(\frac{t}{t_k}\right)^n}$	Modificirani Page
$\Psi = e^{-(k*t)^n}$	Overhults, White, Hamilton i Ross
$t = a * \ln\Psi + b * (\ln\Psi)^2$	Thompson, Peart i Foster
$\Psi = 1 + a * t + b * t^2$	Wang i Sing
$\Psi = a * e^{-kt^n} + b * t$	Midilli-Kucuk

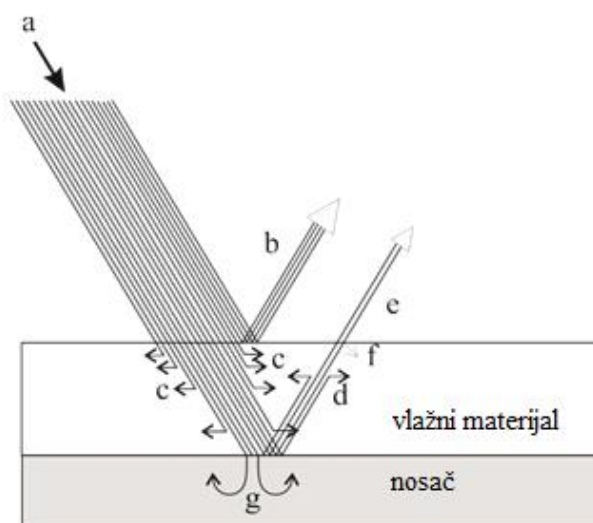
Od prikazanih modela, u najvećoj se mjeri koriste Lewisov i Pageov model. Lewisova jednadžba kaže da je brzina sušenja proporcionalna razlici stvarnog srednjeg sadržaja vlage materijala i ravnotežne vrijednosti sadržaja vlage u danim procesnim uvjetima. Pageova jednadžba je Lewisova jednadžba u koju se uvodi empirijski parametar,  $n$ . Uvođenjem parametra  $n$ , postiže se bolje slaganje eksperimentalnih i računskih podataka. Model Midilli-Kucuk sve više dobiva na značaju pri tankoslojnom sušenju zbog vrlo visokog indeksa korelacije. Model je empirijski te sadrži četiri parametra ( $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $n$ ). Poznavanje utjecaja uvjeta provedbe procesa sušenja te geometrijskih karakteristika i svojstava materijala na kinetiku sušenja omogućava predviđanje ponašanja nekog sustava te prenošenje rezultata u veće mjerilo.<sup>12</sup>

## 2.2 Sušenje infracrvenim zračenjem

Jedna od sve popularnijih, ali ne i uobičajenih, metoda opskrbe vlažnog materijala toplinom je infracrveno (IR) elektromagnetsko zračenje. U prošlosti se ova vrsta prijenosa topline koristila u kombinaciji s drugim vrstama prijenosa topline prilikom sušenja, dok se danas infracrveni sušionici dizajniraju za korištenje IR zračenja kao primarnog izvora topline. U industriji se IR sušionici najčešće primjenjuju za sušenje sušenja boja, premaza, ljepila, tinte, papira, kartona, tekstila itd. Njihova primjena u prehrambenoj industriji za sušenje žitarica, brašna, povrća, ribe, mesa, tjestenine se posljednjih godina intenzivno istražuje. Prvi rezultati znanstvenih radova ukazuju na brojne prednosti vezanih za svestranost IR sušionika, jednostavnu instalaciju i jednostavnost opreme, moguću kombinaciju sa drugim sušionicima, brzi odziv, mogućnost korištenja u vakuumu (za širenje elektromagnetskog zračenja nije potreban medij) ali i značajne uštede energije.

## 2.2.1 Osnove

Infracrveno zračenje ili infracrvena svjetlost je elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama od približno 700 nm do 1000000 nm, odnosno frekvencije od 430 THz do 300 GHz. Te valove emitiraju zagrijana tijela i neke molekule kada se nađu u pobuđenom stanju. Valna duljina emitiranog zračenja ovisi o prirodi i temperaturi tvari. Infracrveno zračenje većina tvari može apsorbirati pri čemu se energija infracrvenog zračenja pretvara u toplinu što rezultira porastom temperature. Apsorpcija infracrvenog elektromagnetskog zračenja pri sušenju je prikazana na slici 7.



**Slika 7.** Apsorpcija elektromagnetskog zračenja pri sušenju vlažnog materijala<sup>13</sup>

Ulazno zračenje (a) se na površini vlažnog materijala dijeli na dio koji se reflektira od površine (b) i na dio koji ulazi u unutrašnjost materijala. Od zračenja koje je ušlo u materijal, dio (c) se apsorbira i pretvara u unutarnju energiju. Ostatak zračenja prodire do nosača materijala, gdje se dio (g) apsorbira, a dio (d) reflektira natrag u vlažni materijal. Reflektirano zračenje (d) se u materijalu dijelom apsorbira, dijelom ponovo reflektira na gornjoj površini materijala (f), a dijelom izlazi iz materijala (e). Zračenje apsorbirano od strane nosača materijala se pretvara u unutarnju energiju. Materijal energiju prima na dva načina:

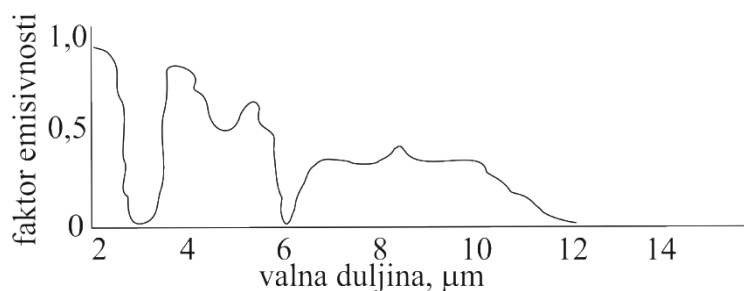
- Od apsorbiranog zračenja
- Kondukcijom sa nosača materijala.

Iznos apsorbiranog i reflektiranog zračenja ovise o parametrima koji su dani jednadžbom:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1)$$

Apsorpcija  $\rho$ , refleksija  $\alpha$  i transmisija  $\tau$  su ključne značajke radijacije prilikom sušenja, a ovise o prirodi materijala, njegovoj površini i debljini, sadržaju vlage te valnoj duljini

zračenja.<sup>4</sup> Kako bi se neki materijal mogao sušiti infracrvenim zračenjem, njegova značajka refleksije mora biti što manja, a značajka apsorpcije srednje velika ili visoka. Ukoliko je značajka refleksije prevelika, infracrveno zračenje ne prodire u unutrašnjost materijala te se ne može apsorbirati i pretvoriti u toplinu potrebnu za isparavanje vlage. Kod sušenja boja i premaza, poželjna je visoka značajka apsorpcije, dok je pri sušenju prehrambenih proizvoda poželjna viša značajka transmisije (niža značajka apsorpcije) kako bi se izbjeglo intenzivno zagrijavanje i termičko uništavanje površine. Prehrambeni proizvodi sastoje se od različitih biokemijskih molekula, polimera, različitih soli i vode. Ti sastojci su kod svakog proizvoda u različitim omjerima pa su i njihove značajke apsorpcije, refleksije i transmisije različite. No, zajednički im je visoki udio vode pa ti proizvodi imaju najnižu značajku apsorpcije pri valnoj duljini kod koje voda ima najvišu značajku transmisije. Stoga, prilikom sušenja prehrambenih proizvoda infracrvenim zračenjem, treba odabrati valnu duljinu zračenja pri kojoj voda ima najnižu značajku apsorpcije. Na slici 8 prikazan je apsorpcijski spektar vode.

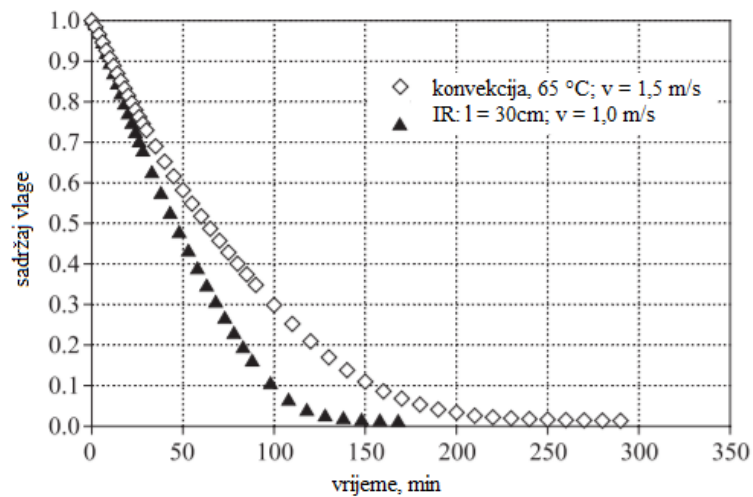


**Slika 8.** Apsorpcijski spektar vode

### 2.2.2 Prednosti i nedostaci

Glavna prednost infracrvenih sušionika je kraće vrijeme sušenja. Slika 9. prikazuje usporedbu vremena sušenja IR sušionikom i konvekcijskih sušionika.





**Slika 9.** Usporedba vremena sušenja infracrvenog i konveksijskog sušionika<sup>14</sup>

Ostale prednosti su<sup>4</sup>:

- Visoka učinkovitost pretvorbe električne energije u toplinu.
- Zračenje prodire izravno u materijal bez zagrijavanja okoline.
- Ujednačeno grijanje materijala.
- Jednostavna instalacija i jednostavna promjena materijala i uvjeta sušenja.
- Jednolik profil vlage u materijalu i mala vjerojatnost oštećenja proizvoda.
- Jednostavnost rukovanja.
- Izvori infracrvenog zračenja su u usporedbi s dielektričnim izvorima jeftini i imaju dugi vijek trajanja te niske troškove održavanja.
- Zauzima malo prostora i lako se može instalirati na prethodno instalirane konvencionalne sušilice.
- Niskobudžetna tehnologija.

S druge strane, nedostaci infracrvenih sušionika su:

- „Scale-up“ nije uvijek jednostavan.
- Primarno su površinski sušionici, iako su veliki naponi uloženi u njihovu prilagodbu za sušenje debelih, gustih materijala.
- Ispitivanje opreme mora se provesti u postrojenju kako bi se osigurala uspješna izvedba.
- Potencijalna opasnost od požara mora se uzeti u obzir prilikom rada sa uređajem.

### **2.2.3 Primjena**

Infracrveno sušenje se u industriji u velikoj mjeri koristi za sušenje površina i dehidraciju tankih slojeva kao što su tekstil, papir, boje, premazi, emajl i drugo.<sup>4</sup> Vrlo uspješno se primjenjuje u automobilskoj industriji pri nanošenju metalnih lakova, kao i u industriji papira gdje se njihovom primjenom potrošnja energije uvelike smanjila. Iako tehnologija sušenja poroznih materijala još nije dovoljno razvijena, infracrveni sušionici sve češće nalaze primjenu u prehrambenoj industriji. Na primjer, japanska prehrambena industrija koristi infracrvene sušionike za sušenje morskih algi, „curry“ umaka, mrkve i bundeva. Nadalje, infracrveni sušionici se koriste pri sušenju različitih žitarica, predobrađene riže, lješnjaka, slanine te sjemenki soje i kakaoa.

## 3 Eksperimentalni dio

### 3.1 Cilj rada

Cilj rada je istražiti utjecaj temperature i geometrije uzorka na kinetiku sušenja različitih vrsta povrća u infracrvenom laboratorijskom sušioniku. Mjerni podaci biti će opisani sa nekoliko empirijskih matematičkih modela, te će se odrediti koji od modela najbolje opisuje kinetiku sušenja odabranog povrća. Također će se ispitati utjecaj temperature i geometrije uzorka na procijenjene parametre matematičkih modela. Osušeni uzorci usporedit će se s uzorcima osušanim u komercijalnom komorskom sušioniku.

### 3.2 Uzorci

Celer, mrkva, paprika, korijen i lišće peršina te poriluk dolaze sa malog obiteljskog gospodarstva „Eko Sever“, slika 10. Korišteno povrće je iz eko uzgoja, što podrazumijeva organski uzgoj bez korištenja pesticida i umjetnih gnojiva.





**Slika 10.** Korišteno povrće u eksperimentu: celer, mrkva, paprika, korijen peršina, lišće peršina, poriluk

### **3.3 Postupak**

#### **3.3.1 Priprava uzoraka**

Prije sušenja, povrće je oblikovano u odgovarajuće oblike i dimenzije, tablice 2 i 3. Celer i paprika se oblikuju u trakice, dok se mrkva, korijen peršina i poriluk suše u obliku kolutića. Lišće peršina nije oblikovano, nego je korišten sloj listova debljine 5 mm.





**Slika 11.** Oblikovani i dimenzionirani uzorci celera, mrkve, paprike, korijena peršina, lišća peršina i poriluka

**Tablica 2.** Oblik i dimenzije uzoraka

<b>Trakice</b>			
Uzorak	<i>D</i> , mm	<i>Š</i> , mm	<i>V</i> , mm
Celer	60	4	3,5
Paprika	20	5	6
<b>Kolutići</b>			
Uzorak	<i>d</i> , mm	<i>V</i> , mm	
Mrkva	33	5	
Korijen peršina	34	5	
Poriluk	33	5	

**Tablica 3.** Dimenzije uzoraka celera

Uzorak	<i>D</i> , mm	<i>Š</i> , mm	<i>V</i> , mm	<i>O</i> , mm <sup>2</sup>
1	60	2,5	2,5	612,5
2	60	3	3	738
3	60	4	3,5	928
4	60	5	4	1120

### 3.3.2 Uređaji za sušenje

Ekspiriment sušenja povrća infracrvenim elektromagnetskim zračenjem proveden je u sušioniku *KERN Moisture analyser MLS-C*, slika 12. Sušionik se sastoji od prostora u koji se smještaju metalne posudice sa uzorcima i vage za mjerenje gubitka mase uzorka. Radna temperatura se podešava pomoću korisničkog sučelja te se uzorak zagrijava infracrvenim grijačem snage 400 W. Za vrijeme sušenja, na digitalnom zaslonu prikazuju se trenutna temperatura i masa uzorka. Proces sušenja započinje postavljanjem prazne metalne posudice na vagu uređaja i njezinog tariranja. Nakon tariranja, na metalnu posudicu se stavlja uzorak i zatvara poklopac procesnog prostora. Zatvaranjem poklopca uključuje se infracrveni grijač i uređaj započne sa očitavanjem gubitka mase uzorka u strogo definiranim vremenskim intervalima sve do potpunog prestanka gubitka mase vlažnog materijala.



**Slika 12.** Infracrveni sušionik KERN Moisture analyser MLS-C

Ekspirimenti su provedeni pri različitim temperaturama (40 °C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C i 100°C) i atmosferskom tlaku. Nakon postizanja ravnotežnog sadržaja vlage uzorka pri određenoj temperaturi, uzorak se suši pri  $T = 120^{\circ}\text{C}$  kako bi isparila sva voda i odredila masa suhe tvari. Za celer je istražen i utjecaj dimenzije uzoraka na kinetiku sušenja pri 100 °C.

U svrhu usporedbe gotovog proizvoda, korišten je i komercijalni konvekcijski sušionik *Sedona COMBO SD-P9150-F*, slika 13. Uzorci u konvekcijskom sušioniku su sušeni pri programom uređaja definiranim uvjetima zasebnim za svaku vrstu povrća.



**Slika 13.** Konvekcijski sušionik Sedona COMBO SD-P9150-F

### 3.3.3 Metodika proračuna

Na temelju mjernih podataka prikupljenih tijekom sušenja izračunati su sadržaj vlage materijala i brzina sušenja, korištenjem sljedećih jednadžbi:

$$X(t) = \frac{m_{vm}(t) - m_{sm}}{m_{sm}} = \frac{m_v(t)}{m_{sm}} \quad (2)$$

$$\left( -\frac{\Delta X(t)}{\Delta t} \right) = \frac{X(t_{i+1}) - X(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

Mjerni podaci ovisnosti sadržaja vlage materijala o vremenu korelirani su sljedećim matematičkim modelima:

Lewis-ov model:

$$\Psi = e^{-K \cdot t} \quad (4)$$

Page-ov model

$$\Psi = e^{-k \cdot t^n} \quad (5)$$

Midilli- Kucuk-ov model:

$$\Psi = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t \quad (6)$$

Primjenljivost modela analizirana je na temelju indeksa korelacije:

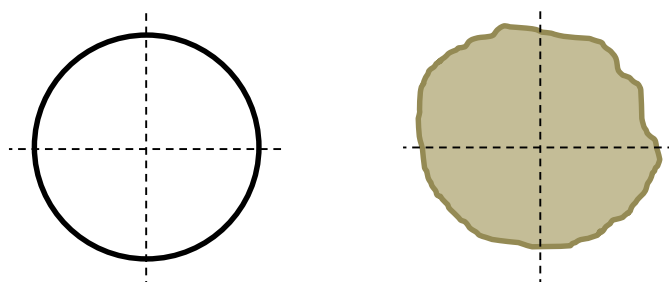
$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_i (X_{\text{exp},i} - X_{\text{cal},i})^2}{\sum_i (X_{\text{exp},i} - X_{\text{sr}})^2}} \quad (7)$$

Opseg (perimeter)

Kružnost čestica (*circularity*): ima vrijednost 1 za savršenu sferu

$$\text{Circularity} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{\text{Površina}}{\text{Opseg}} \quad (8)$$

Zaobljenost čestica (*roundness*) - vrijednost 1 imala bi sferična čestica – vrijednost kaže koliko je oblik čestice blizak krugu.



Slika 14. Zaobljenost čestice (*roundness*)

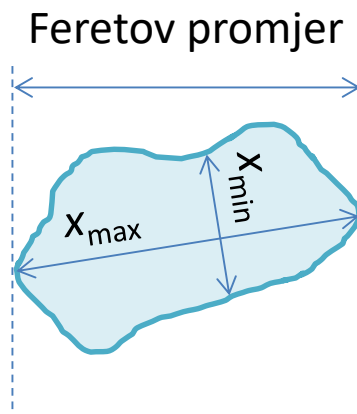


$$Roundness = 4 \cdot \frac{Površina}{\pi \cdot x_{max}^2} \quad (9)$$

Feretov promjer - udaljenost tangenti povučениh na suprotnim stranama čestice.

AR (*Aspect ratio*) – vrijednost 1 imala bi sferična čestica.

$$AR = \frac{x_{min}}{x_{max}} \quad (10)$$



**Slika 15.** Prikaz Feretovog promjera i minimalnog i maksimalnog promjera čestice

Promjer projicirane površine - promjer koji bi imao krug iste površine kao i projicirana površina čestice.<sup>15</sup>

## 4 Rezultati

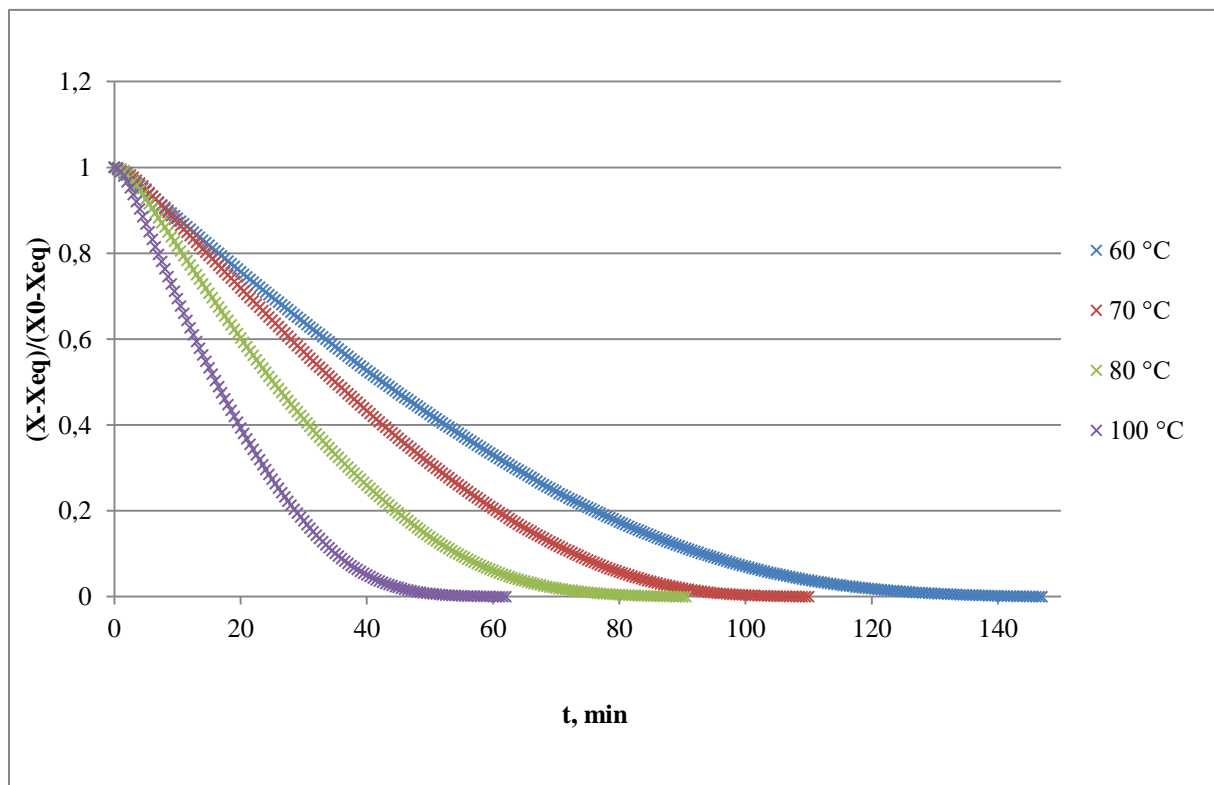
### 4.1 Celer



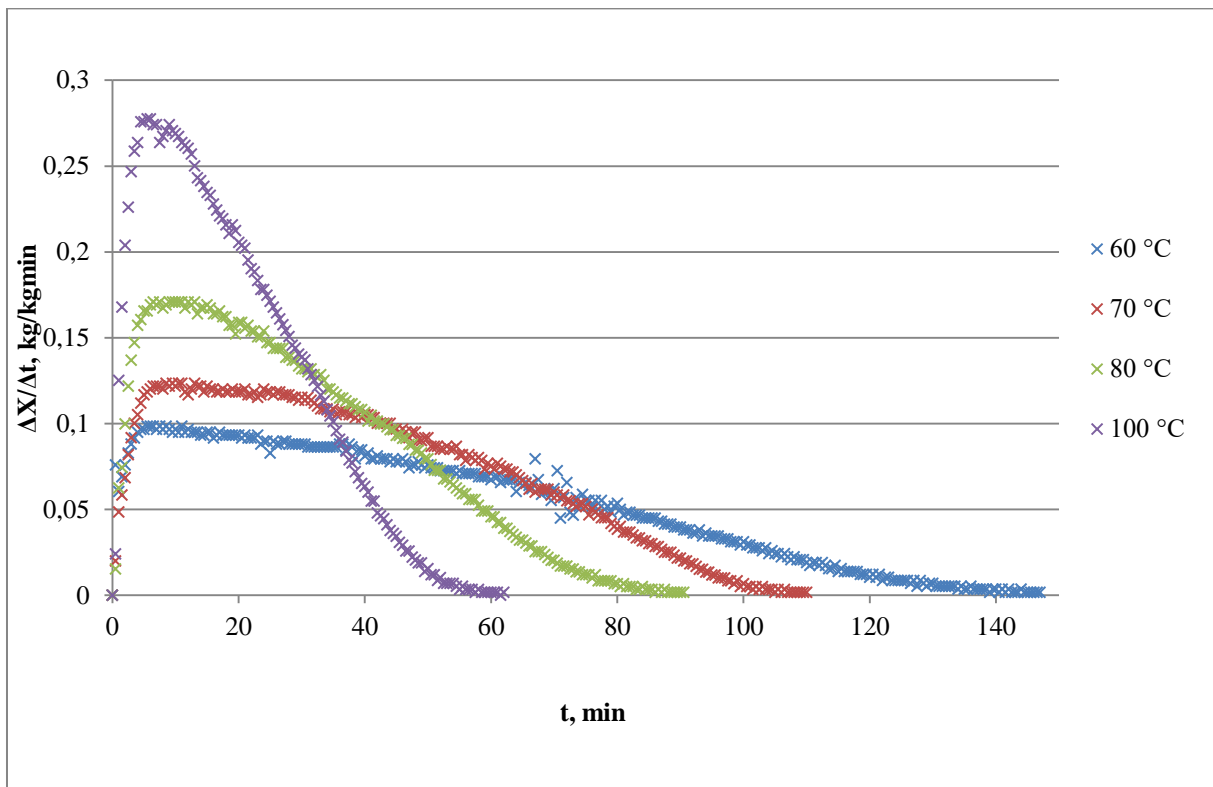
**Slika 16.** Uzorci celera prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 60 °C, 80 °C i 100 °C



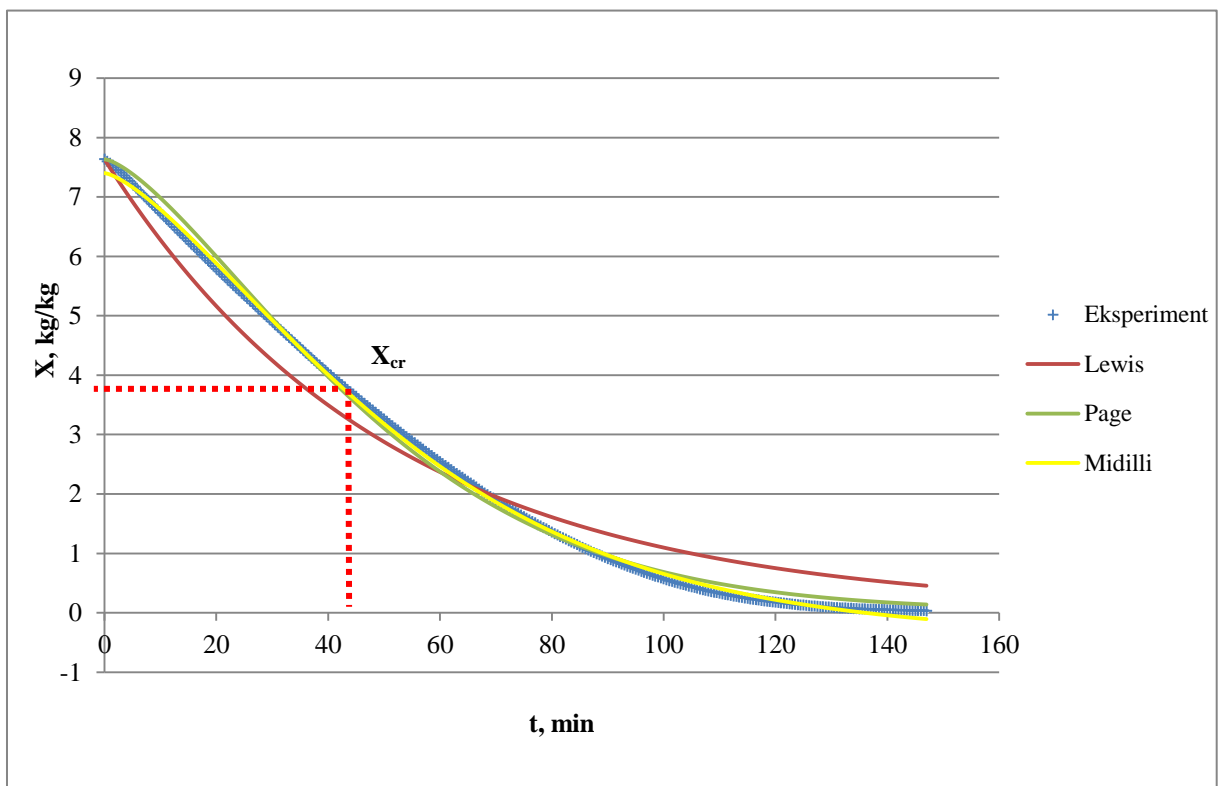
**Slika 17.** Uzorci celera nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



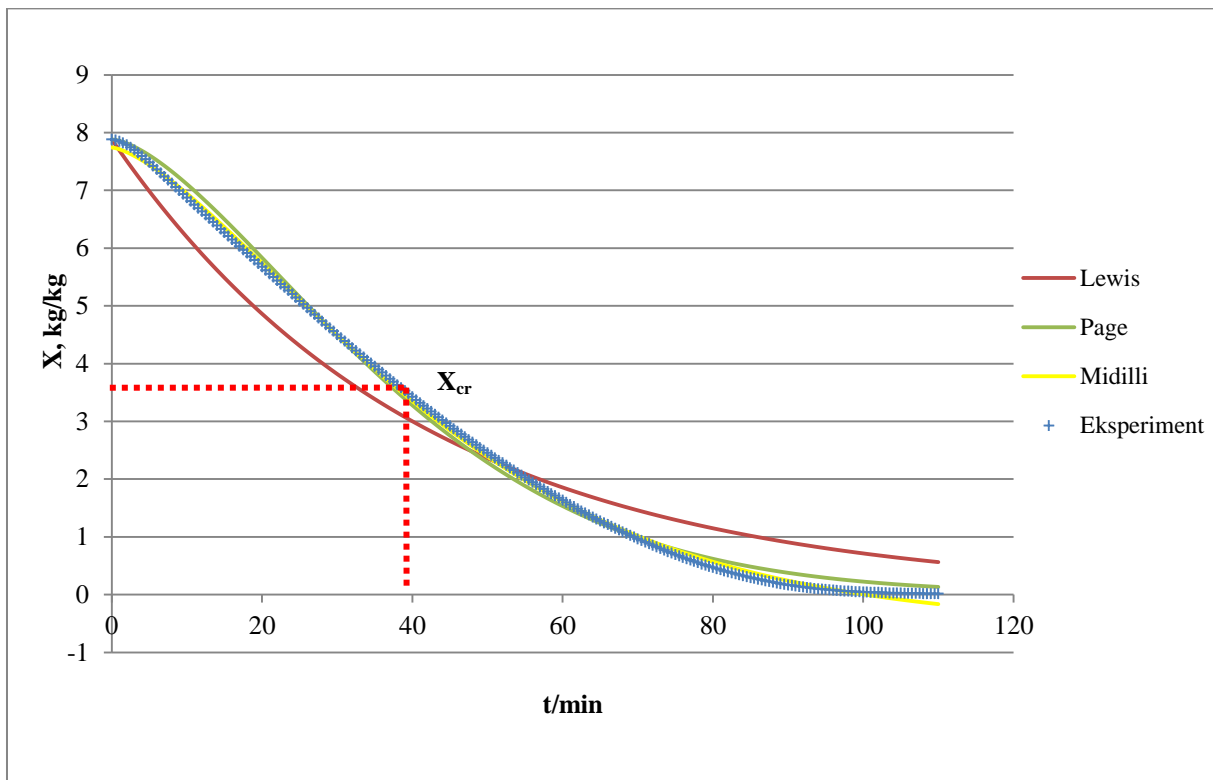
**Slika 18.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka celera s vremenom pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



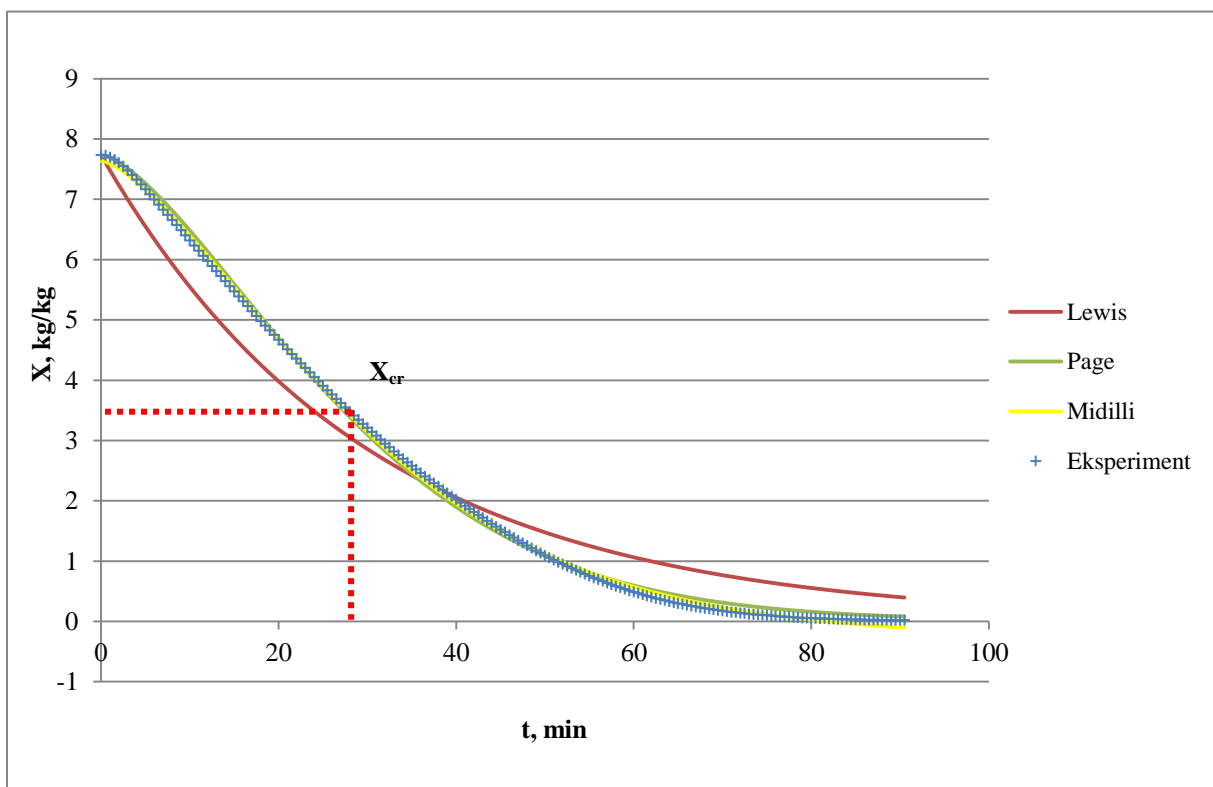
**Slika 19.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzoraka celera o vremenu sušenja pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



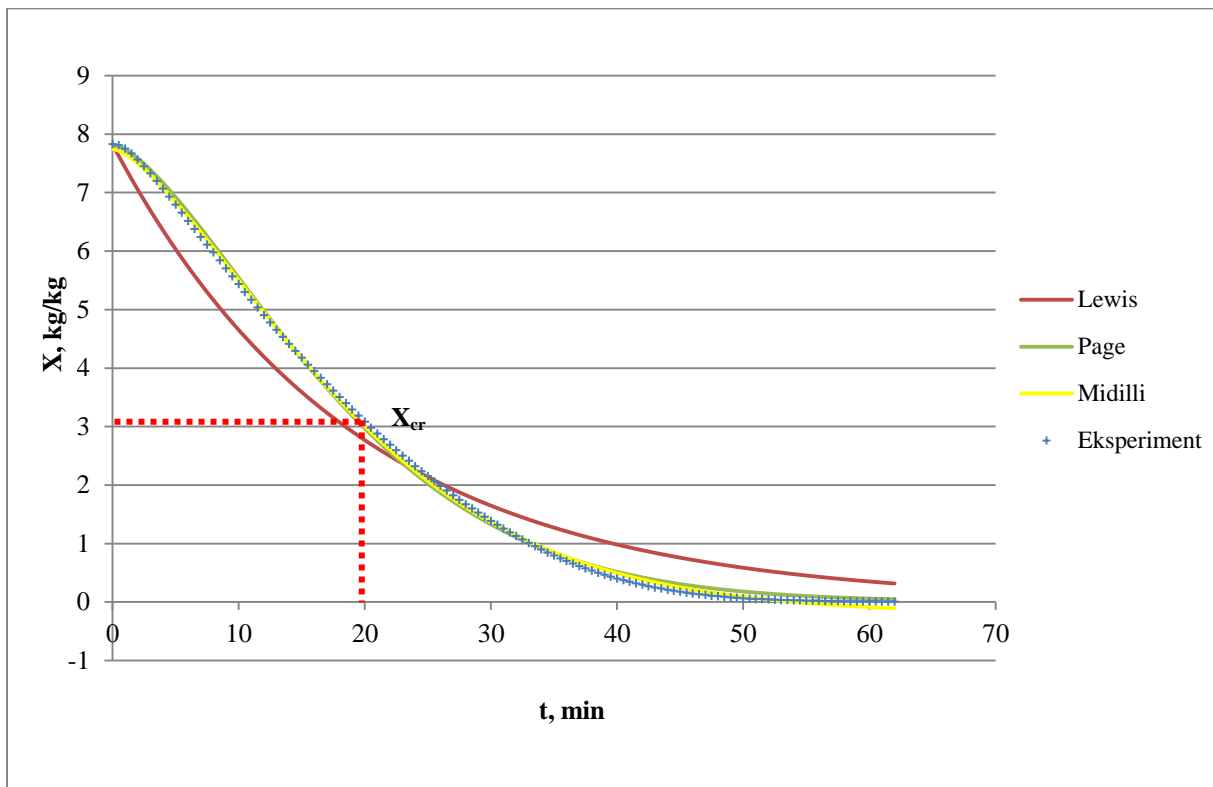
**Slika 20.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka celera s vremenom pri 60 °C te primjenjivost Lewis-ovog, Page-ovog i Midilli-Kucuk-ovog modela



**Slika 21.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka celera s vremenom pri 70 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 22.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka celera s vremenom pri 80 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



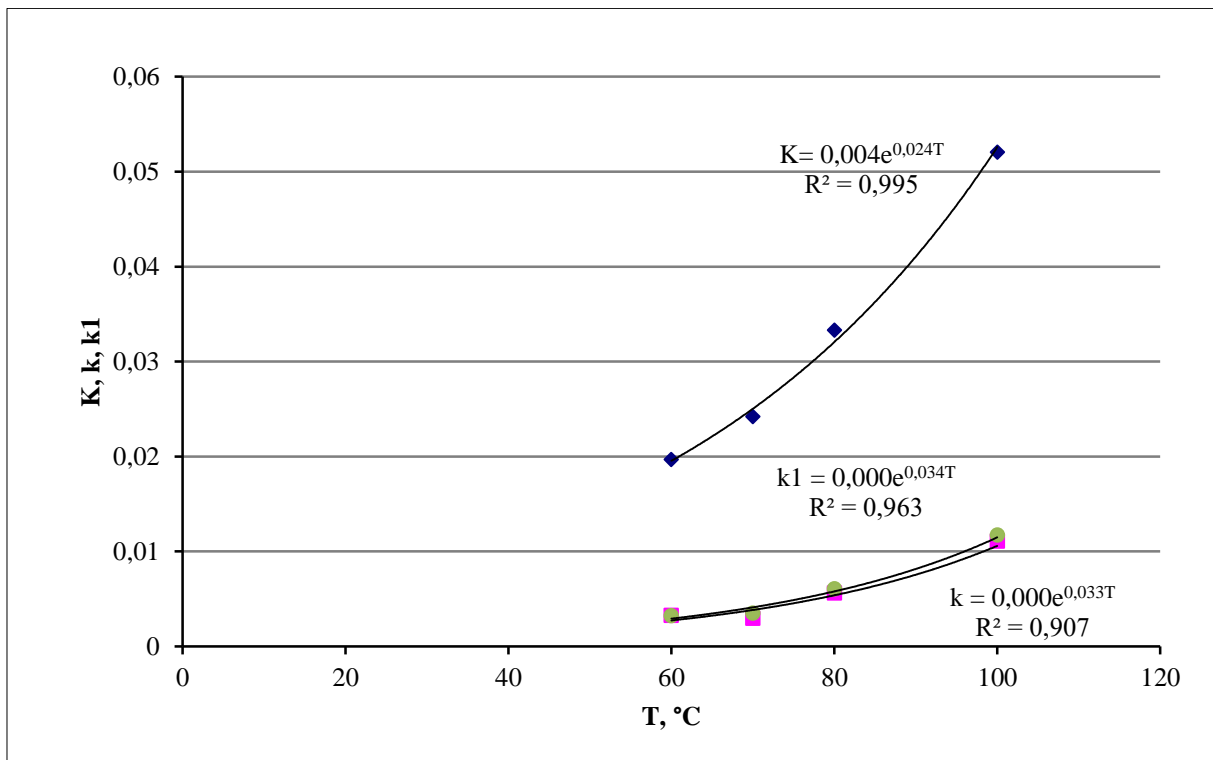
**Slika 23.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka celera s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 4.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke celera

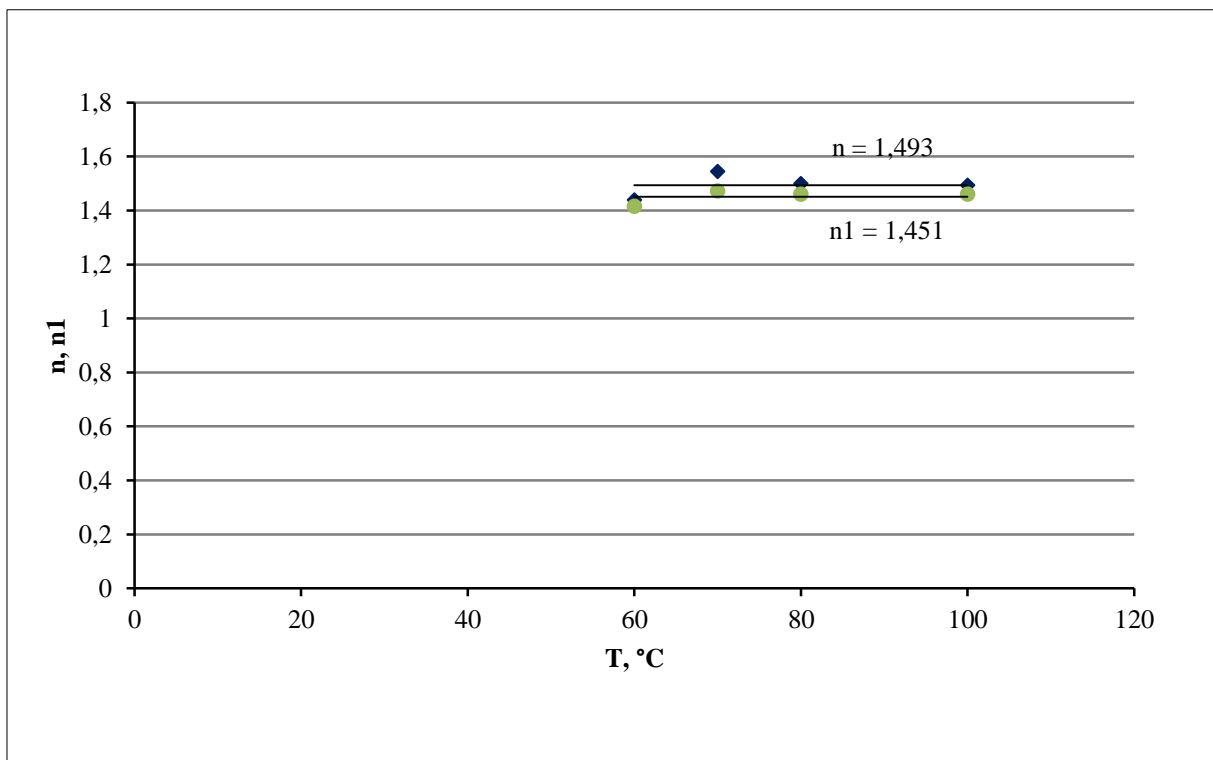
$T, ^\circ C$	60	70	80	100
$X_{cr}, kg/kg$	3,95	3,57	3,54	3,18

**Tablica 5.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzoraka celera

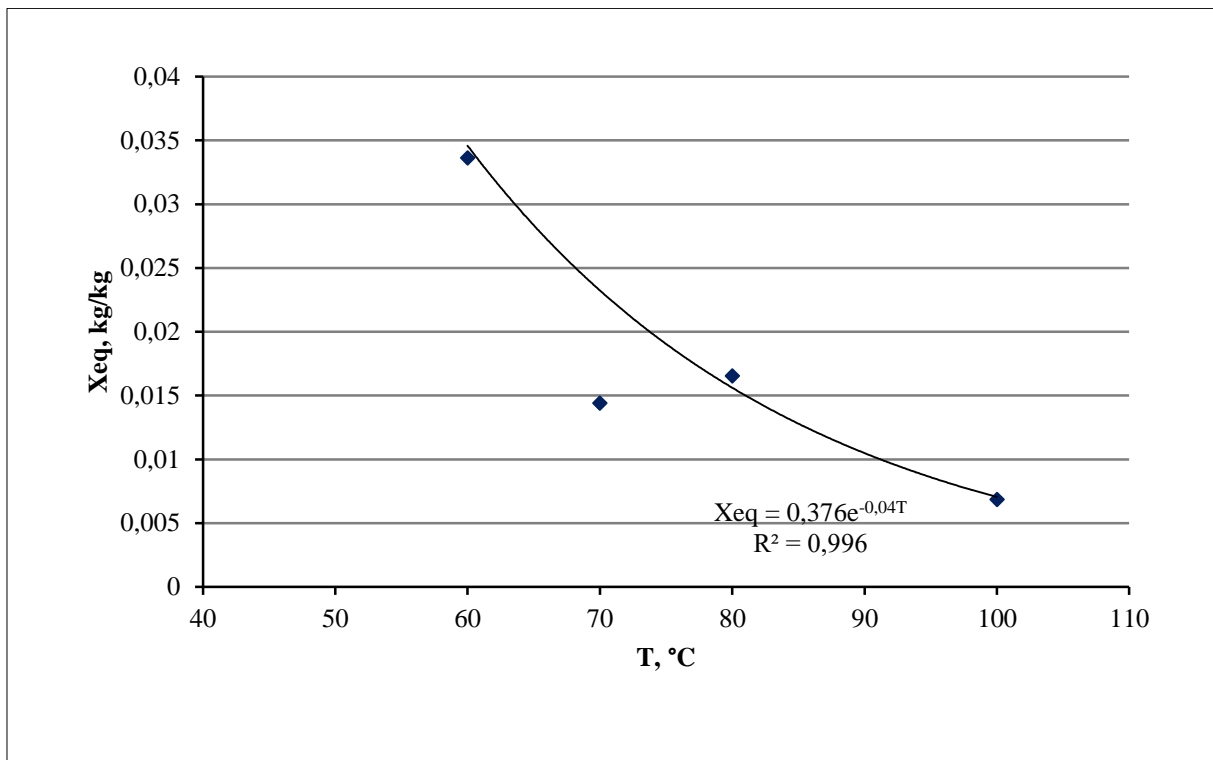
$T, ^\circ C$	$a$	$b$
60	0,96953	-0,00028
70	0,982301	-0,00047
80	0,987827	-0,00031
100	0,990398	-0,00036



**Slika 24.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $kl$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke celera

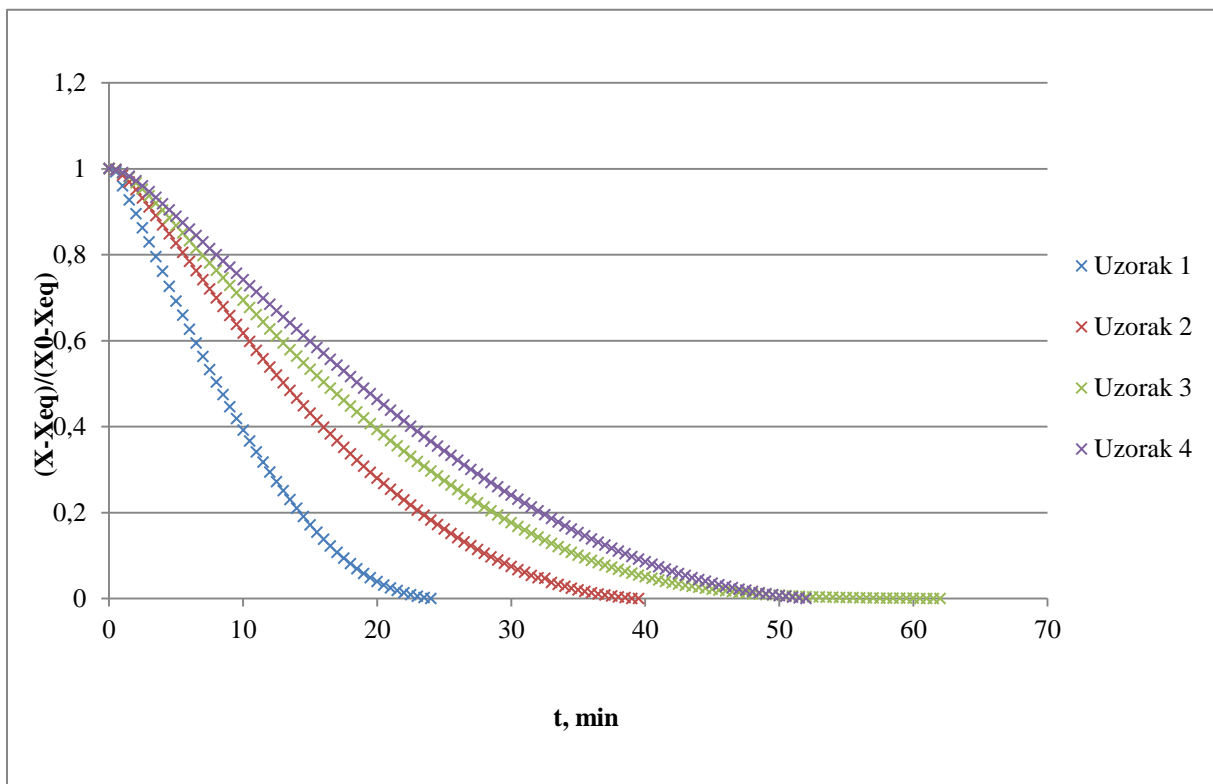


**Slika 25.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog  $n1$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke celera



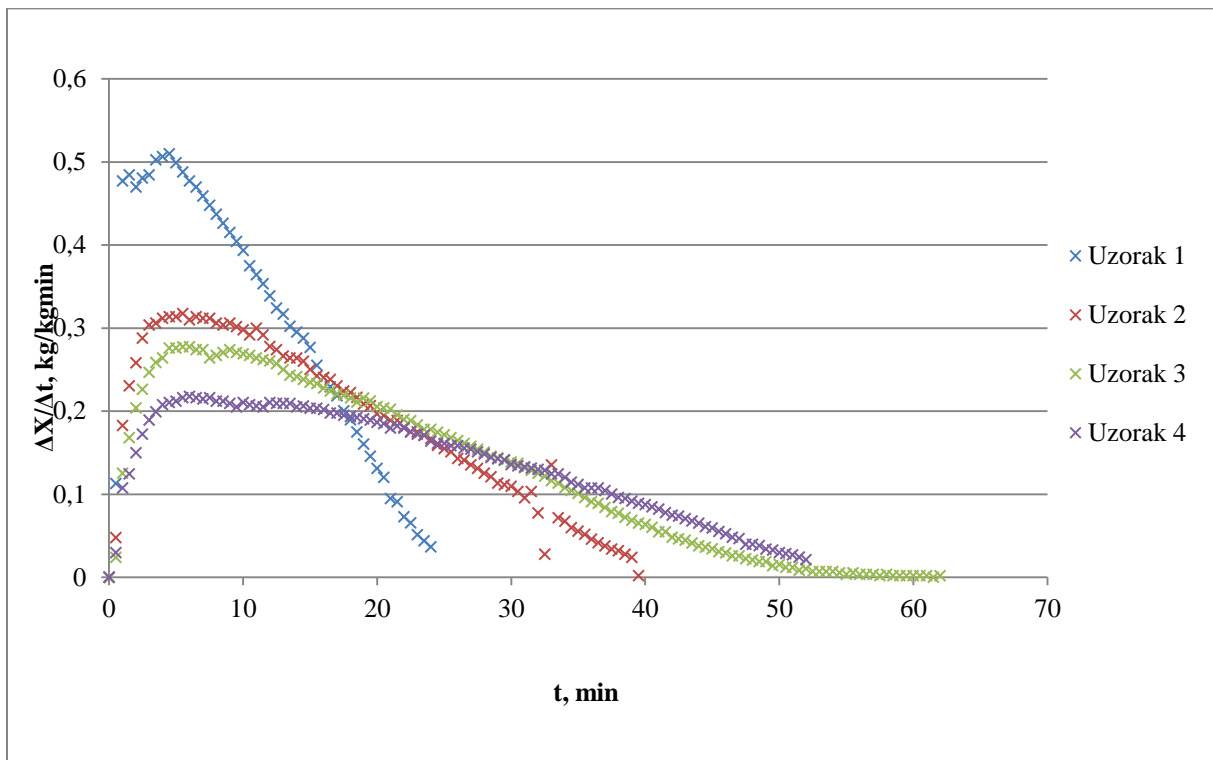
**Slika 26.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke celera

### Geometrijska ovisnost

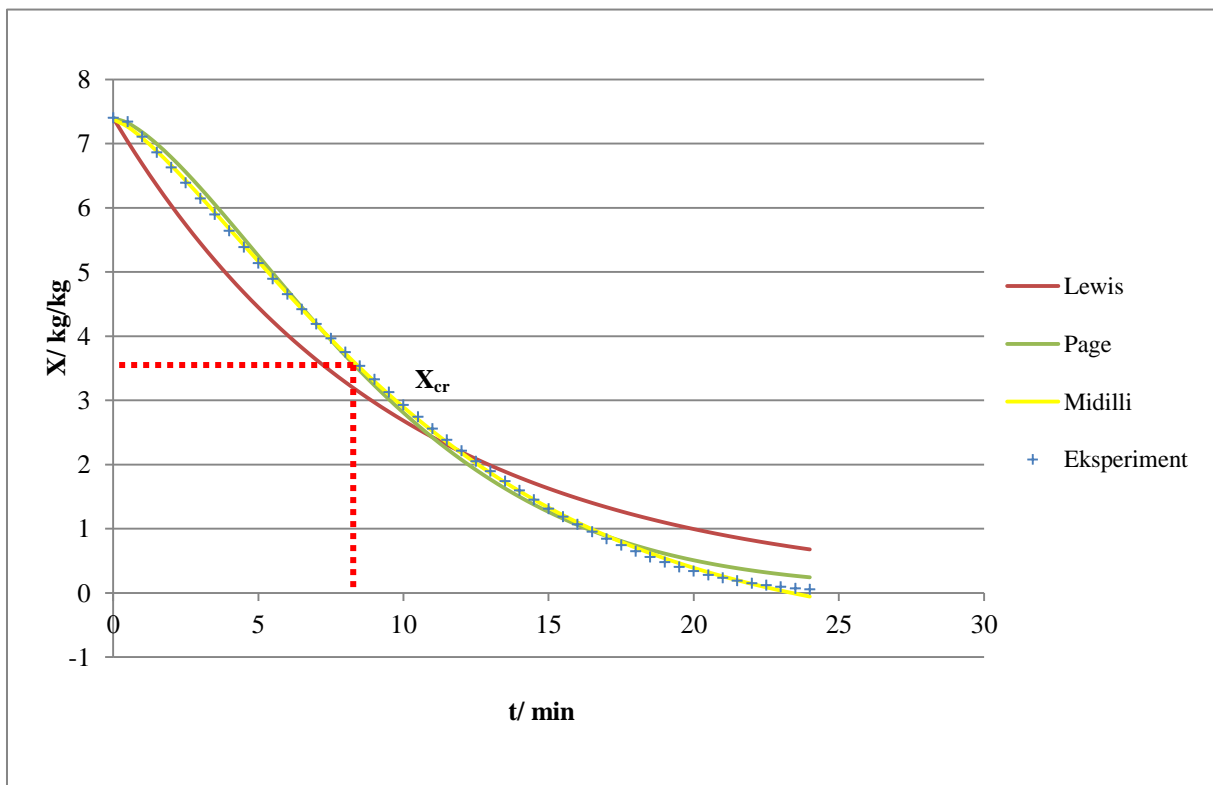


**Slika 27.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage s vremenom za uzorke celera različite vrijednosti oplošja  $O$  pri temperaturi  $T = 100$  °C

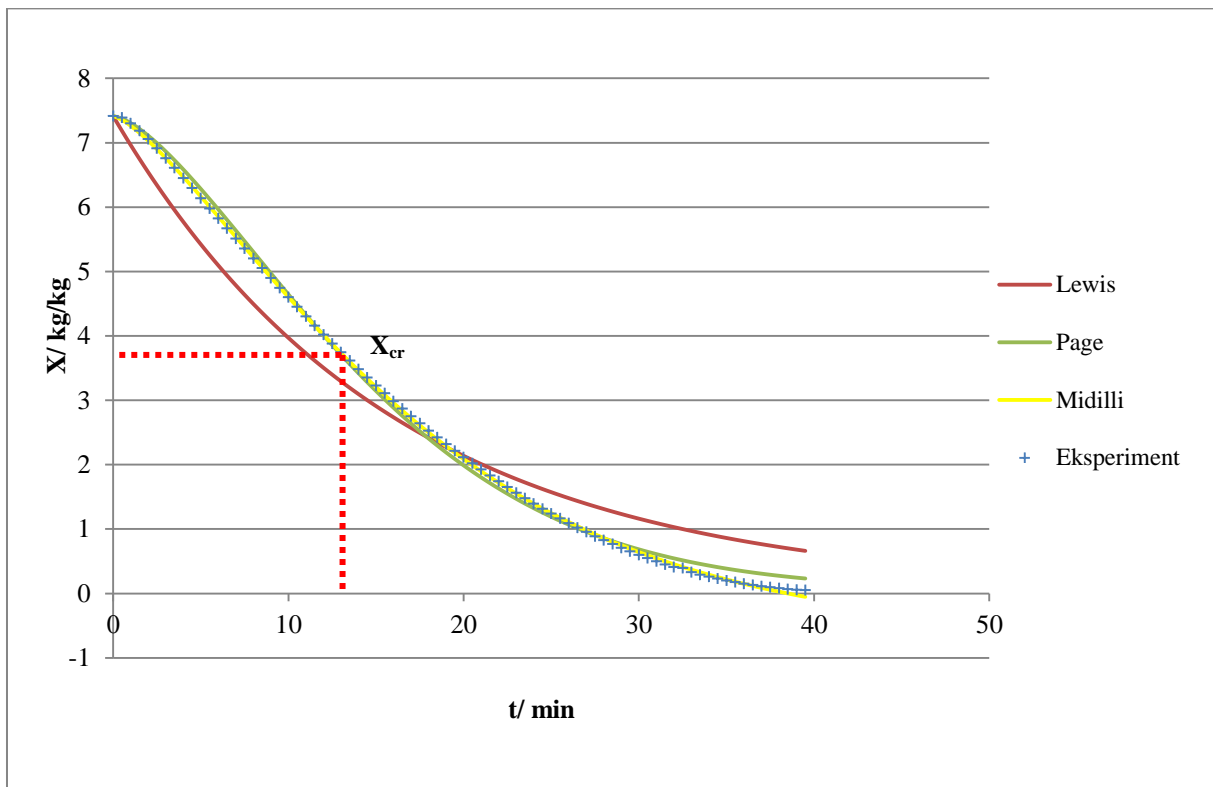




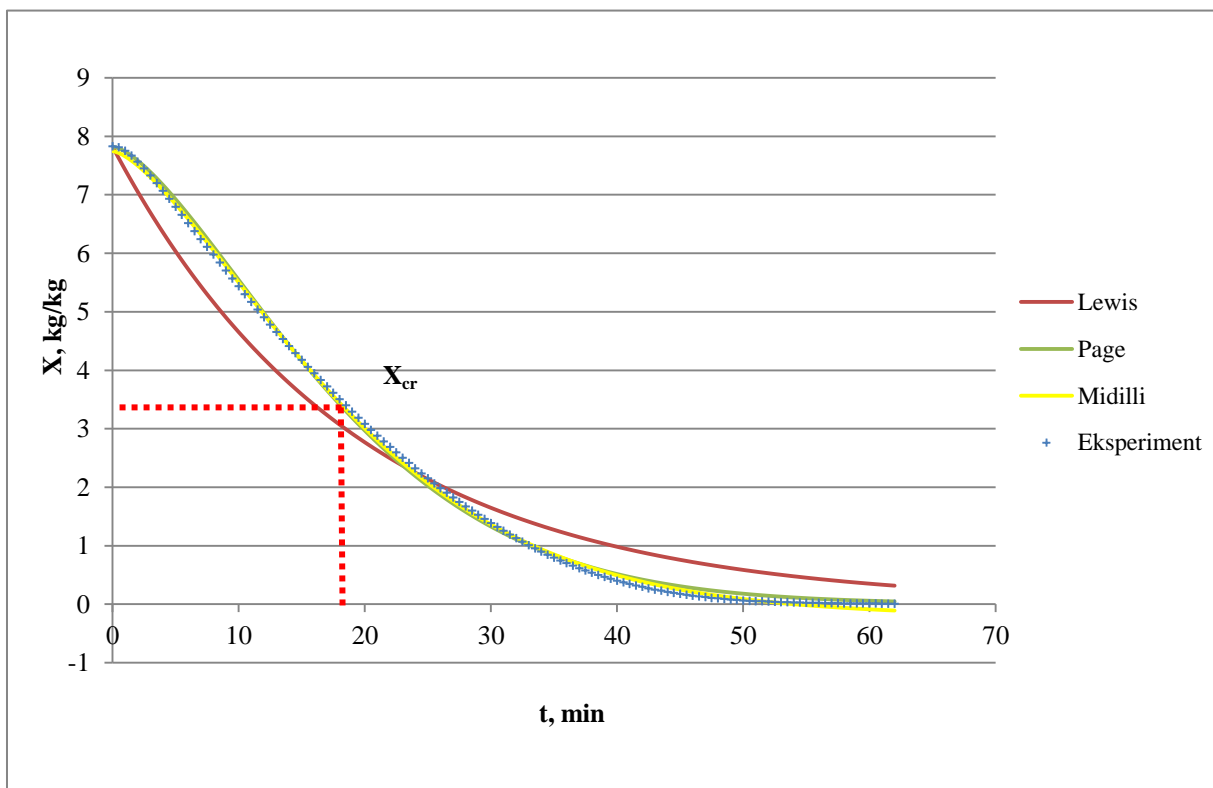
**Slika 28.** Grafički prikaz ovisnosti brzine isparavanja o vremenu za uzorke celera različite vrijednosti oplošja  $O$  pri temperaturi  $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$



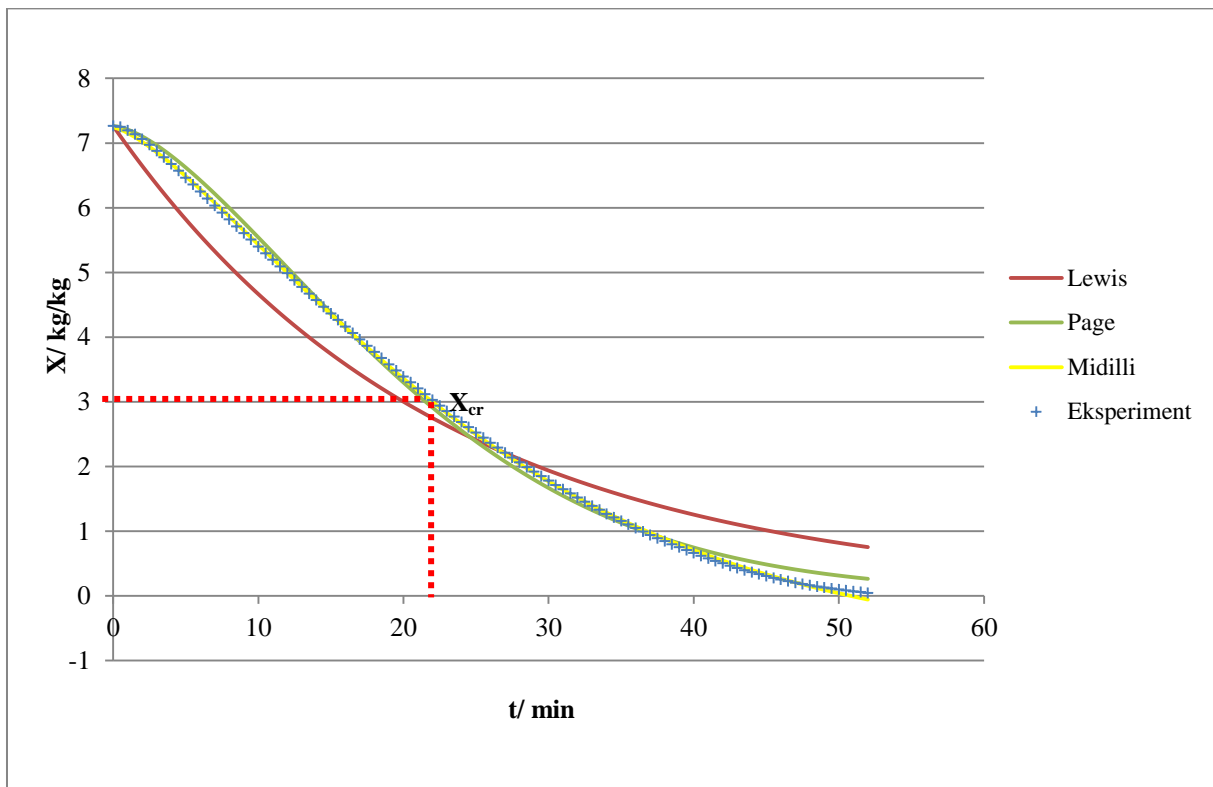
**Slika 29.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage s vremenom kod uzorka 1 pri  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 30.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage s vremenom kod uzorka 2 pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 31.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage s vremenom kod uzorka 3 pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



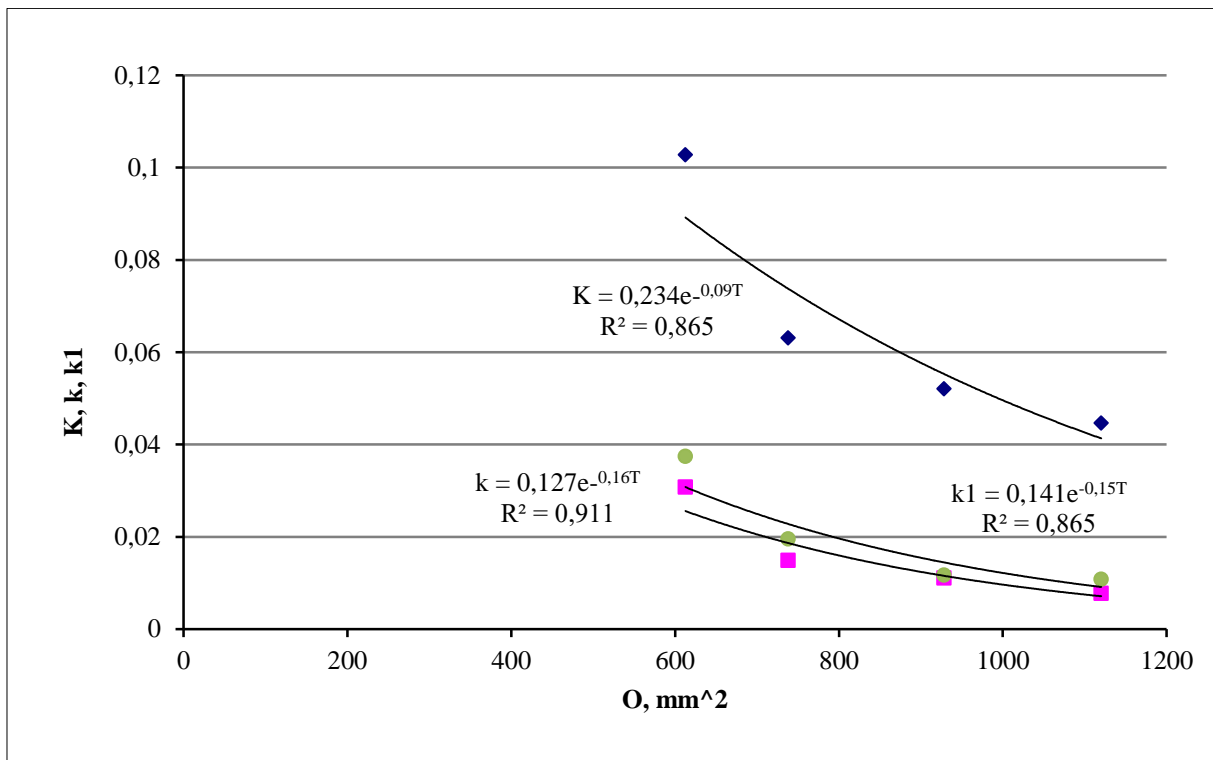
**Slika 32.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage s vremenom kod uzorka 4 pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 6.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o oplošju uzorka  $O$

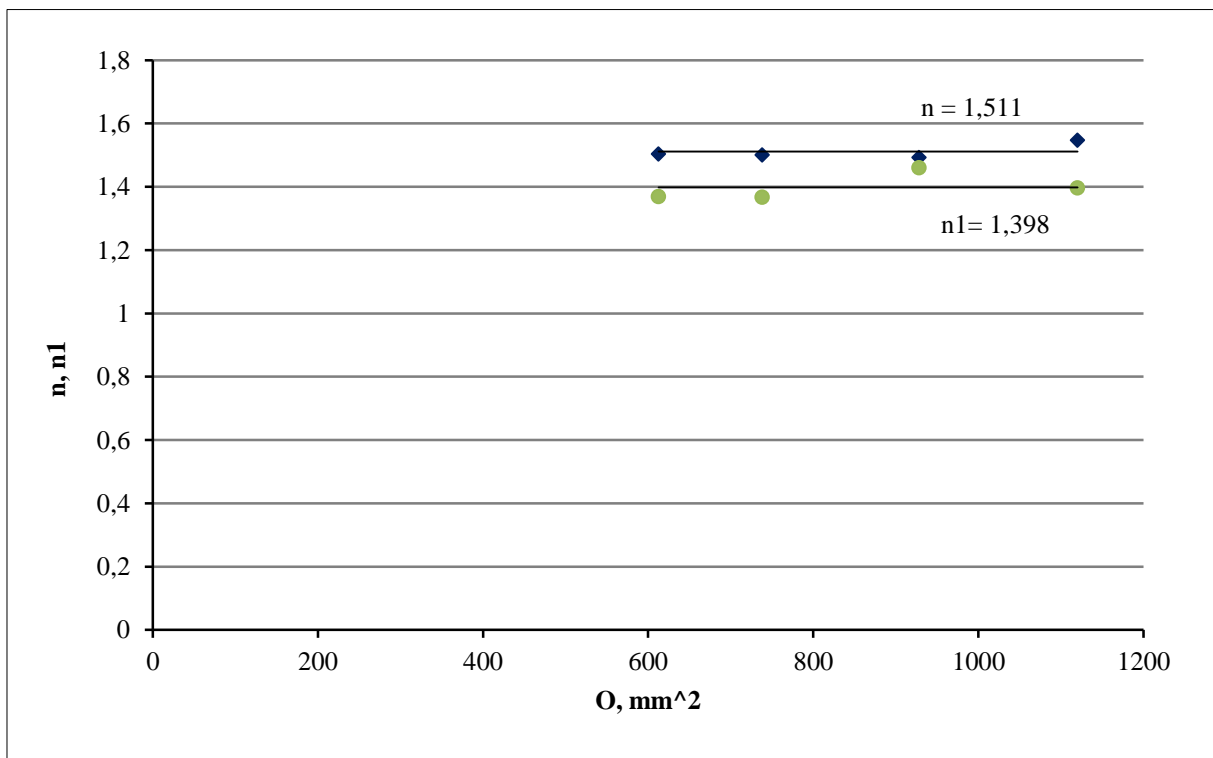
Uzorak	1	2	3	4
$X_{cr}, \text{kg/kg}$	3,54	3,35	3,29	3,21

**Tablica 7.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o oplošju  $O$

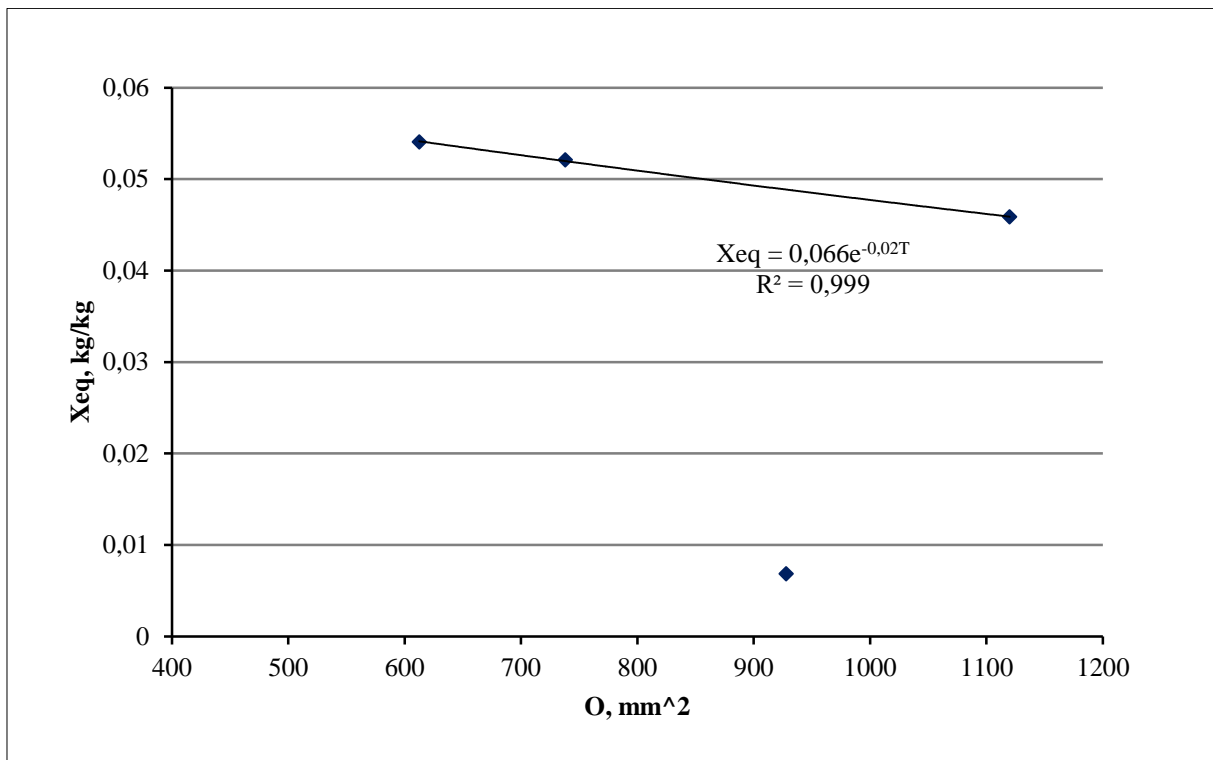
	$a$	$b$
Uzorak 1	0,996852	-0,00291
Uzorak 2	1,000446	-0,00165
Uzorak 3	0,990398	-0,00036
Uzorak 4	0,997159	-0,00157



**Slika 33.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $k1$ ) modela o oplošju uzoraka celera  $O$



**Slika 34.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog modela  $n1$  o oplošju uzoraka celera  $O$



**Slika 35.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o oplošju uzoraka celera  $O$

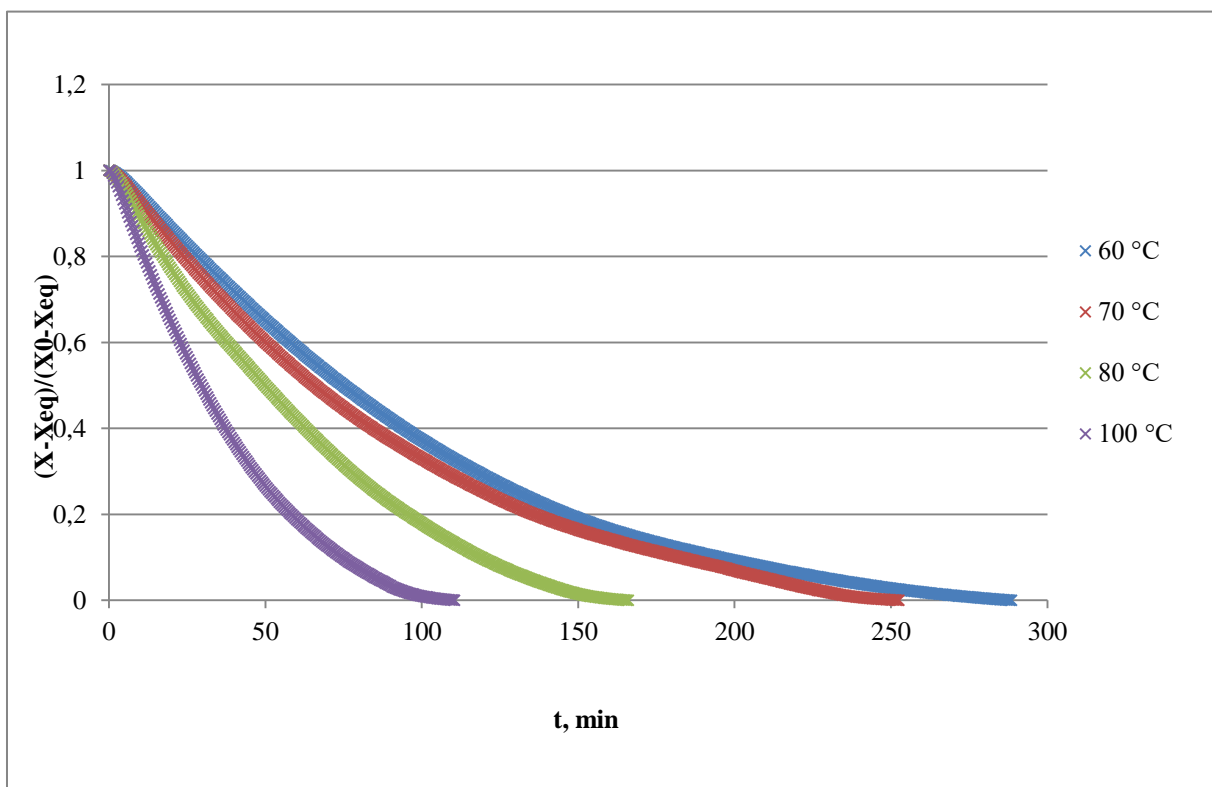
## 4.2 Mrkva



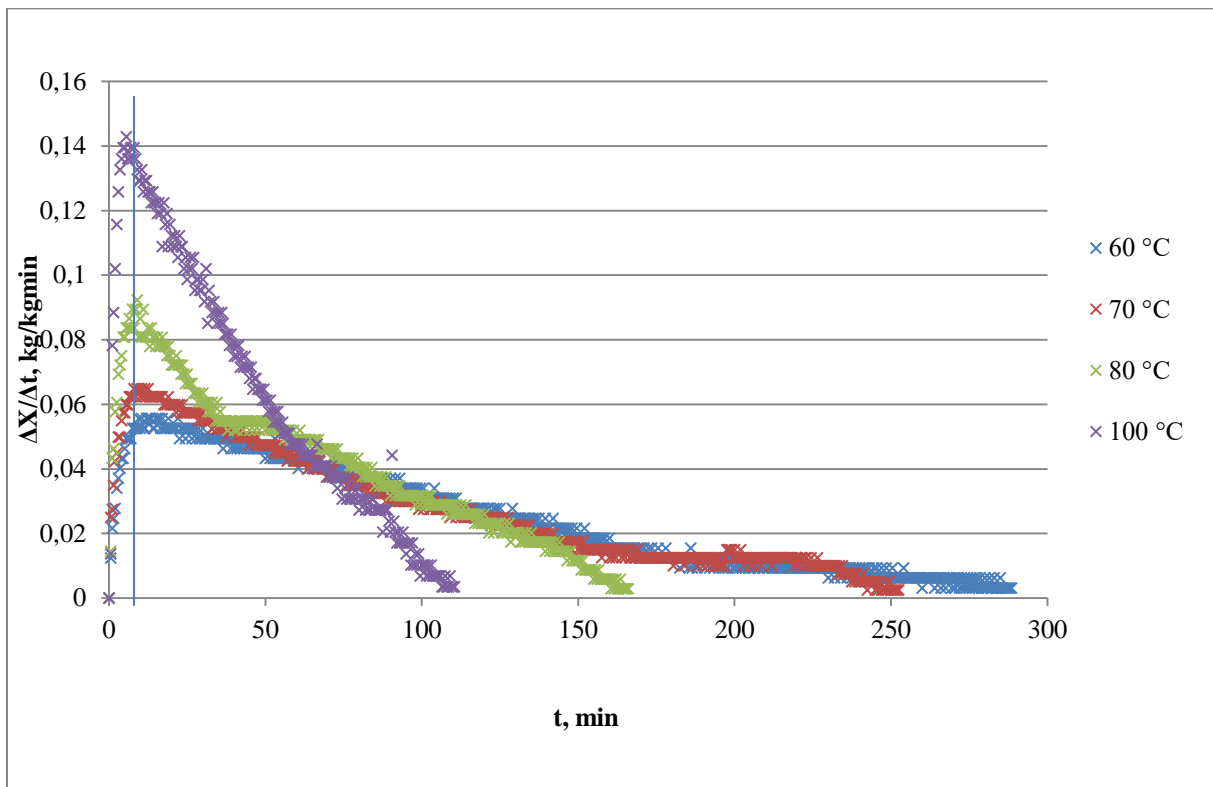
**Slika 36.** Uzorci mrkve prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 60 °C, 80 °C i 100 °C



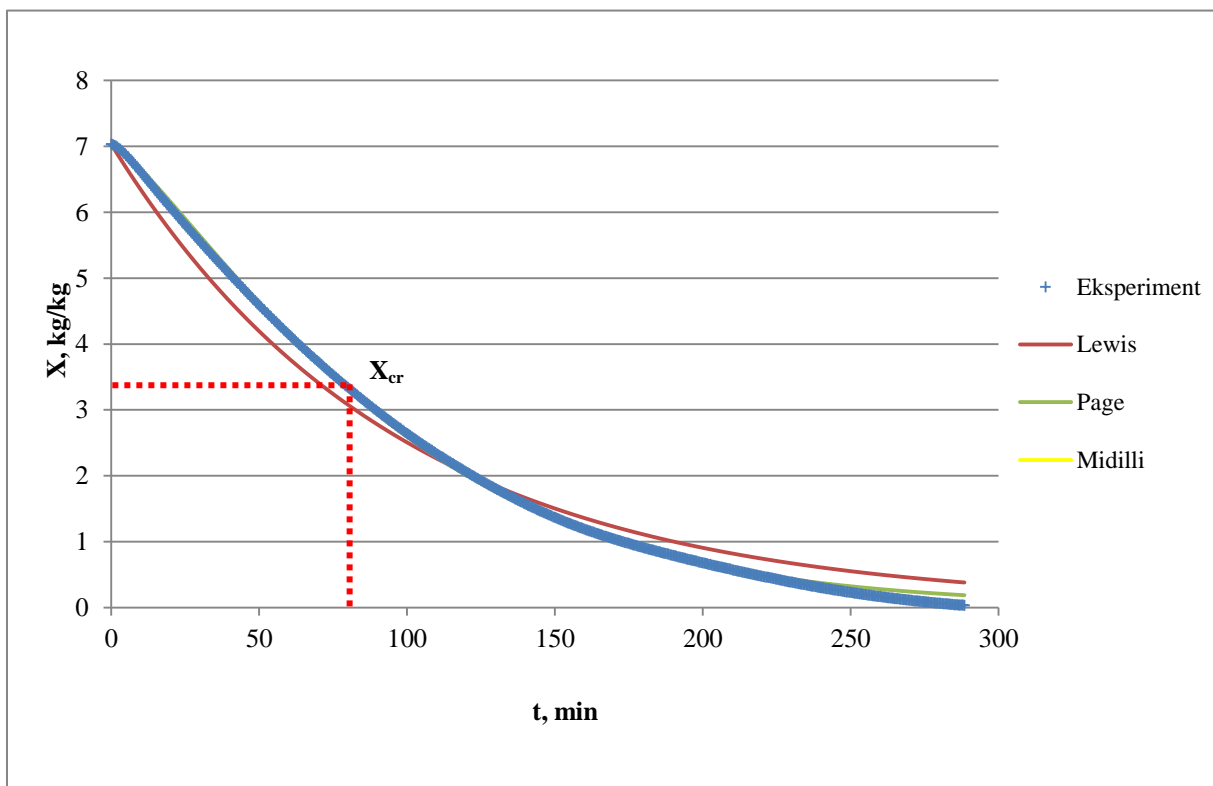
**Slika 37.** Uzorak mrkve nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



**Slika 38.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka mrkve s vremenom pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C

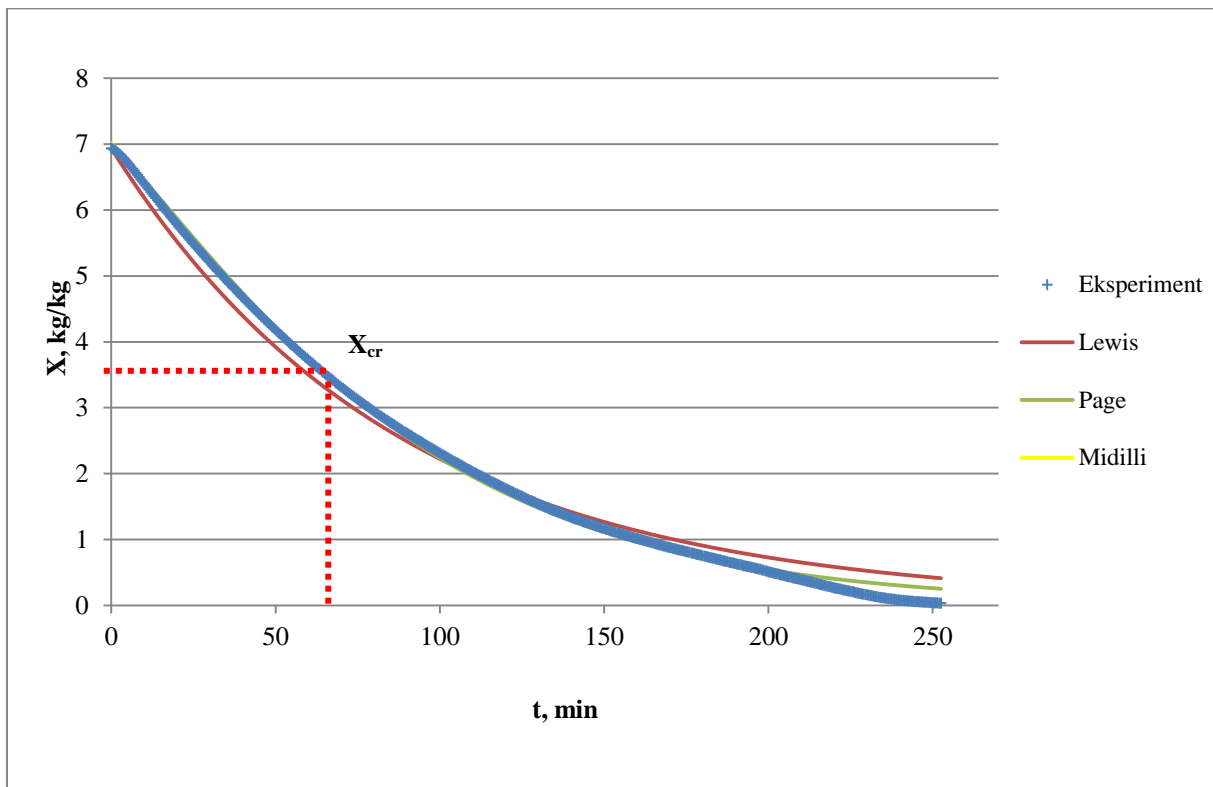


**Slika 39.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzoraka mrkve o vremenu sušenja pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C

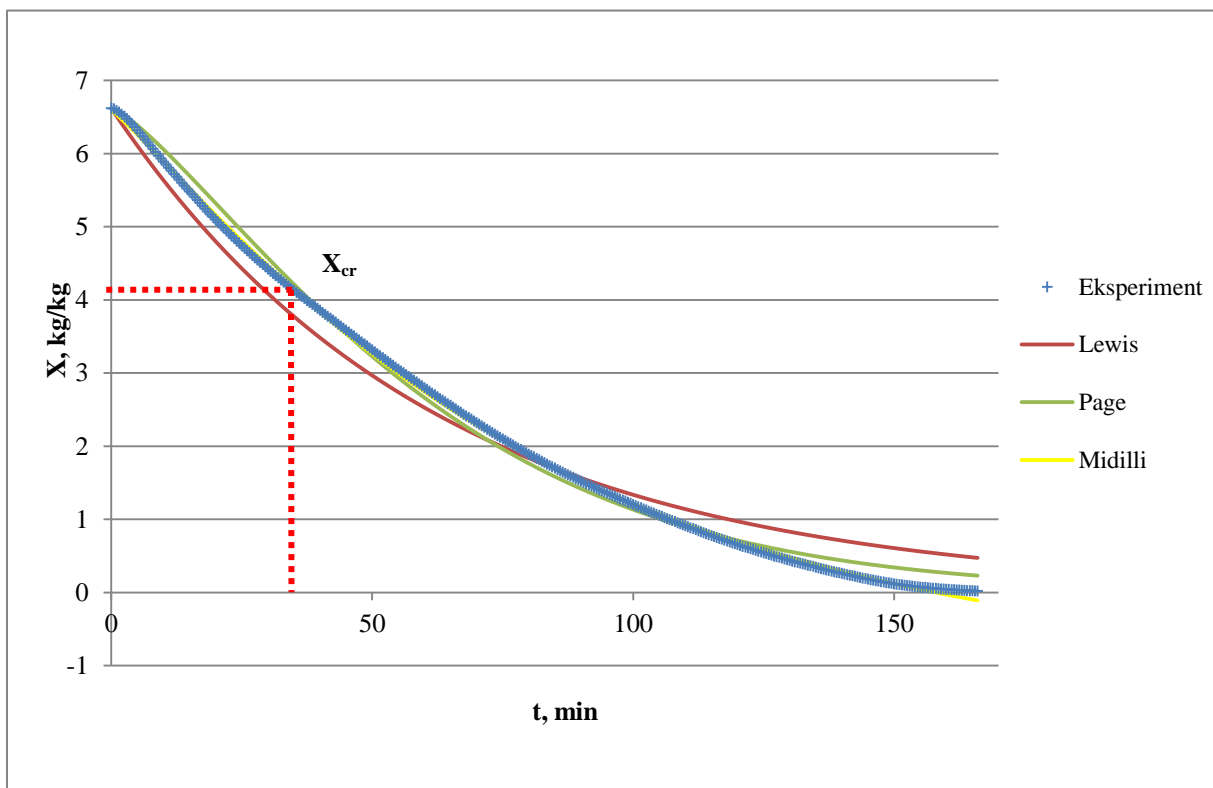


**Slika 40.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka mrkve s vremenom pri 60 °C te primjenjivost Lewis-ovog, Page-ovog i Midilli-Kucuk-ovog modela

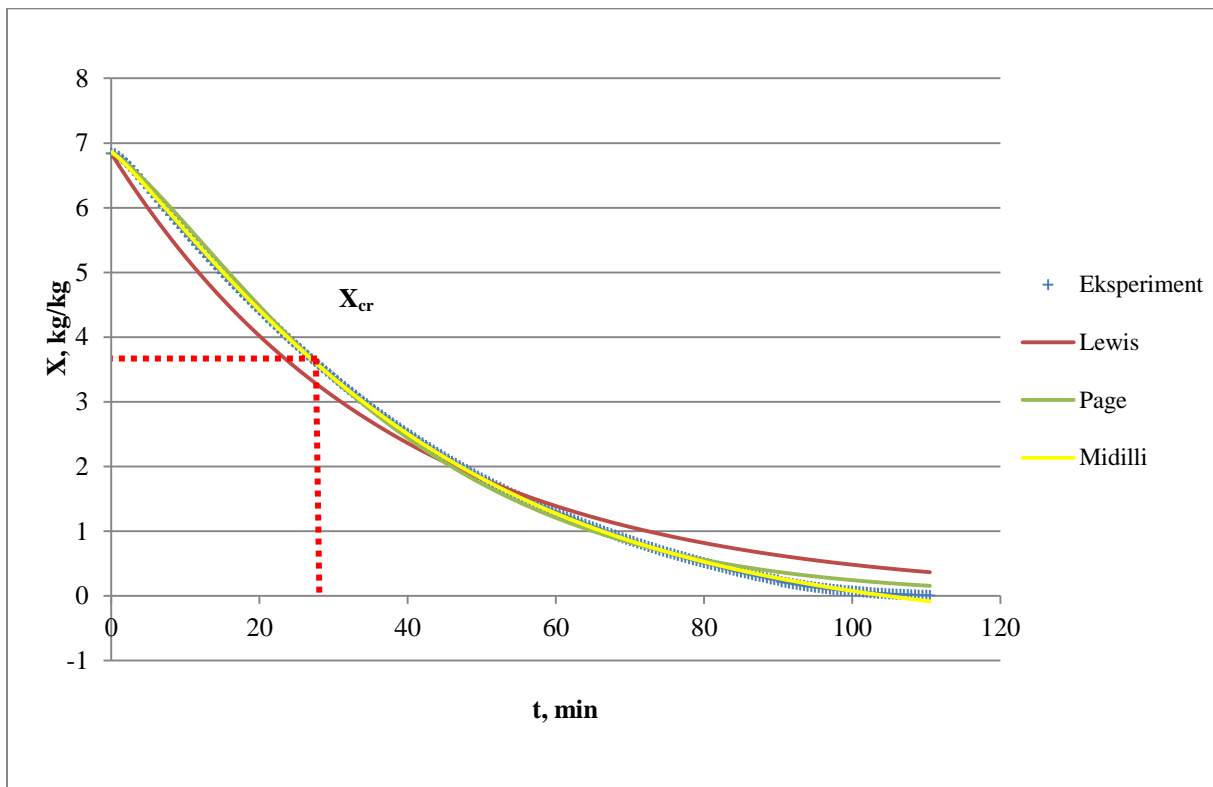




**Slika 41.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka mrkve s vremenom pri  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 42.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka mrkve s vremenom pri  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



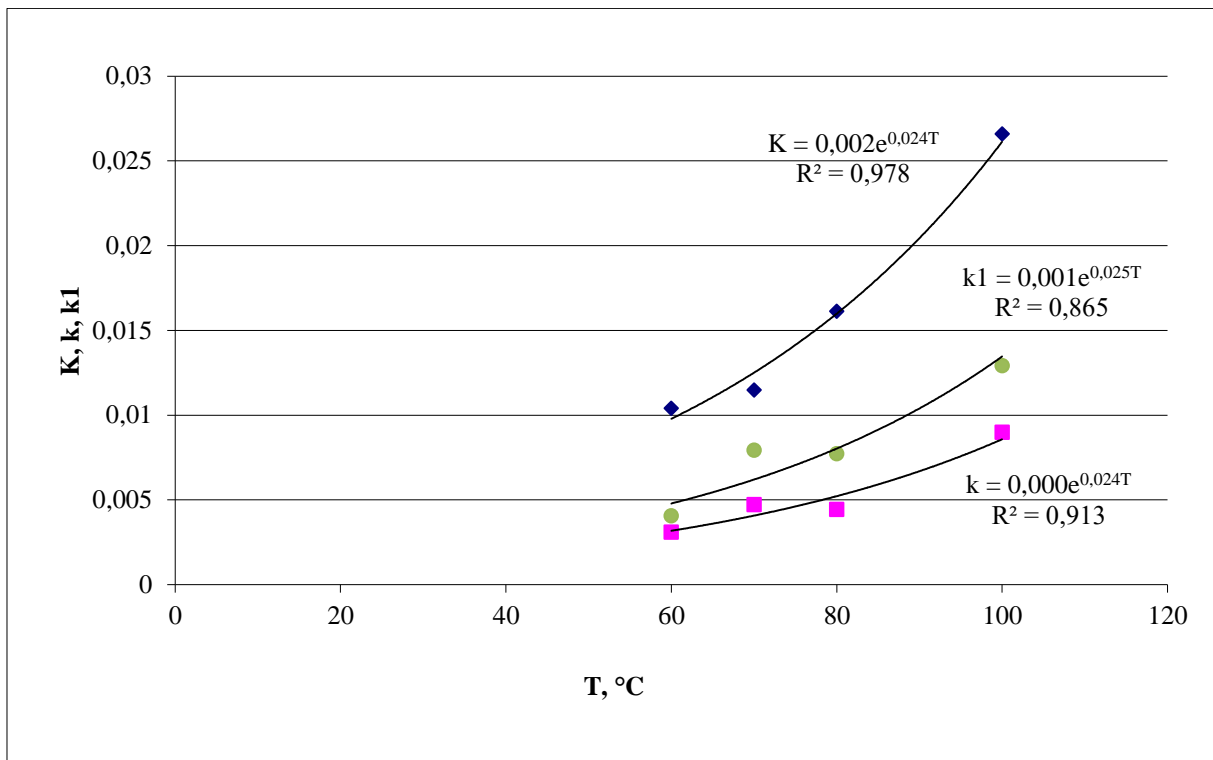
**Slika 43.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka mrkve s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 8.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke mrkve

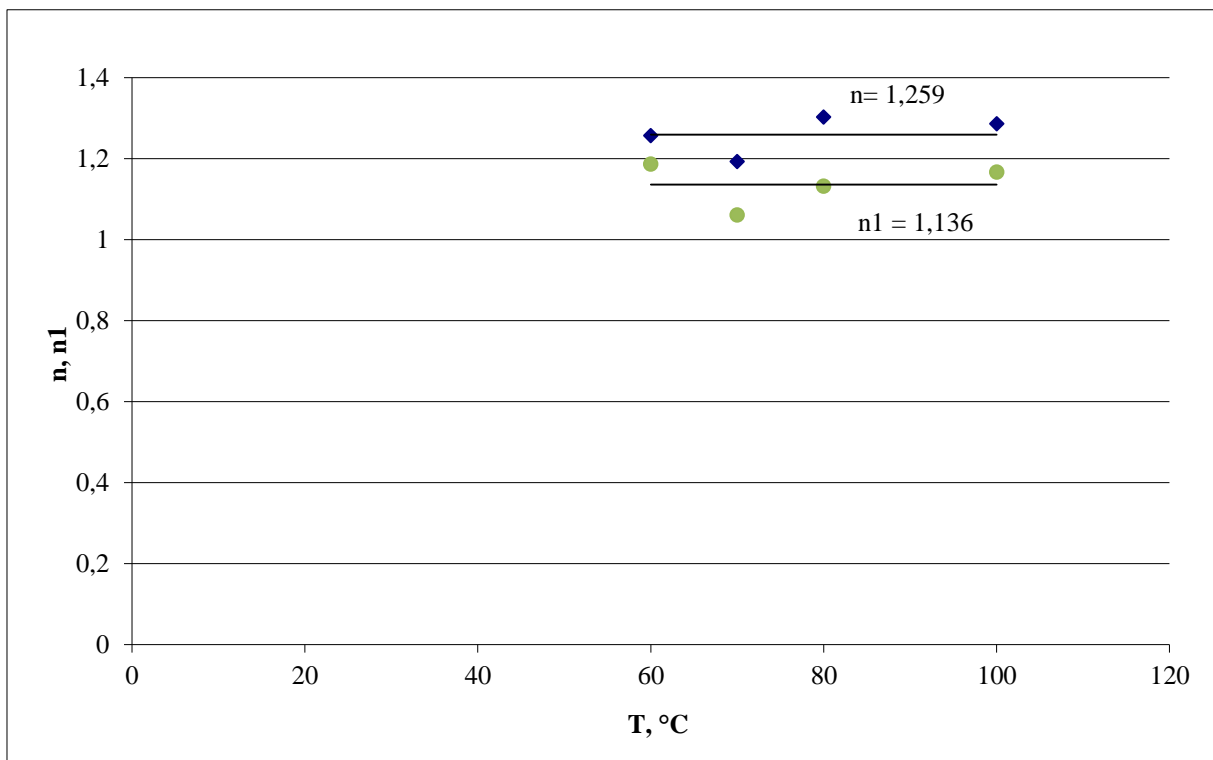
$T, ^\circ C$	60	70	80	100
$X_{cr}, kg/kg$	3,28	3,64	4,16	3,72

**Tablica 9.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke mrkve

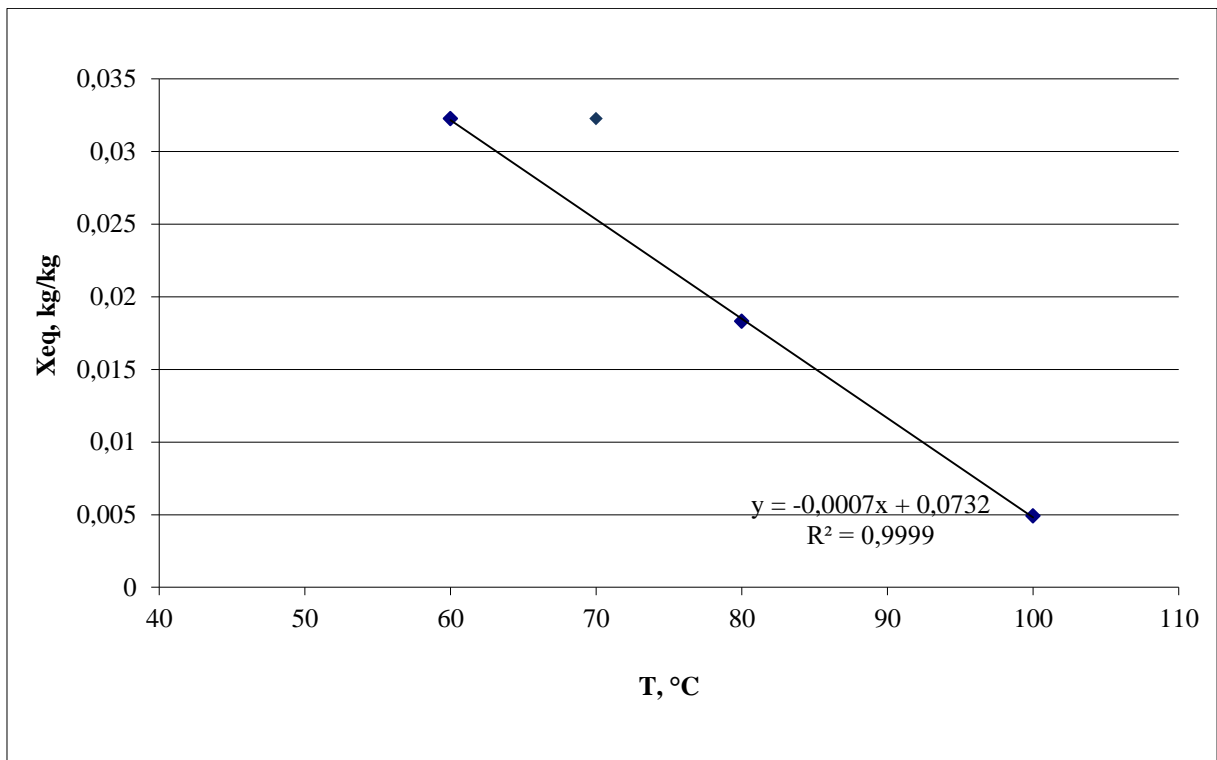
$T, ^\circ C$	$a$	$b$
60	1,000164	-0,00012
70	1,011704	-0,00025
80	0,995141	-0,0006
100	1,003806	-0,00052



**Slika 44.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $kl$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke mrkve



**Slika 45.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog  $nl$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke mrkve



**Slika 46.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke mrkve

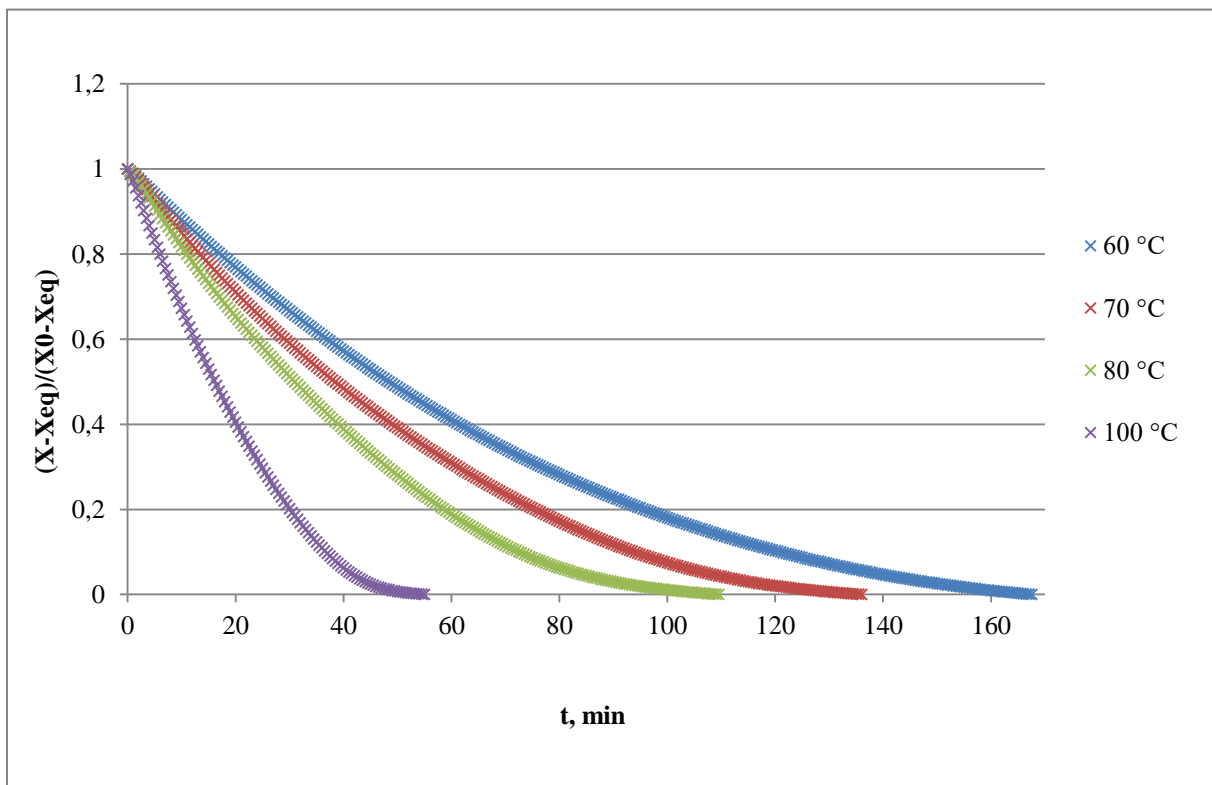
### 4.3 Paprika



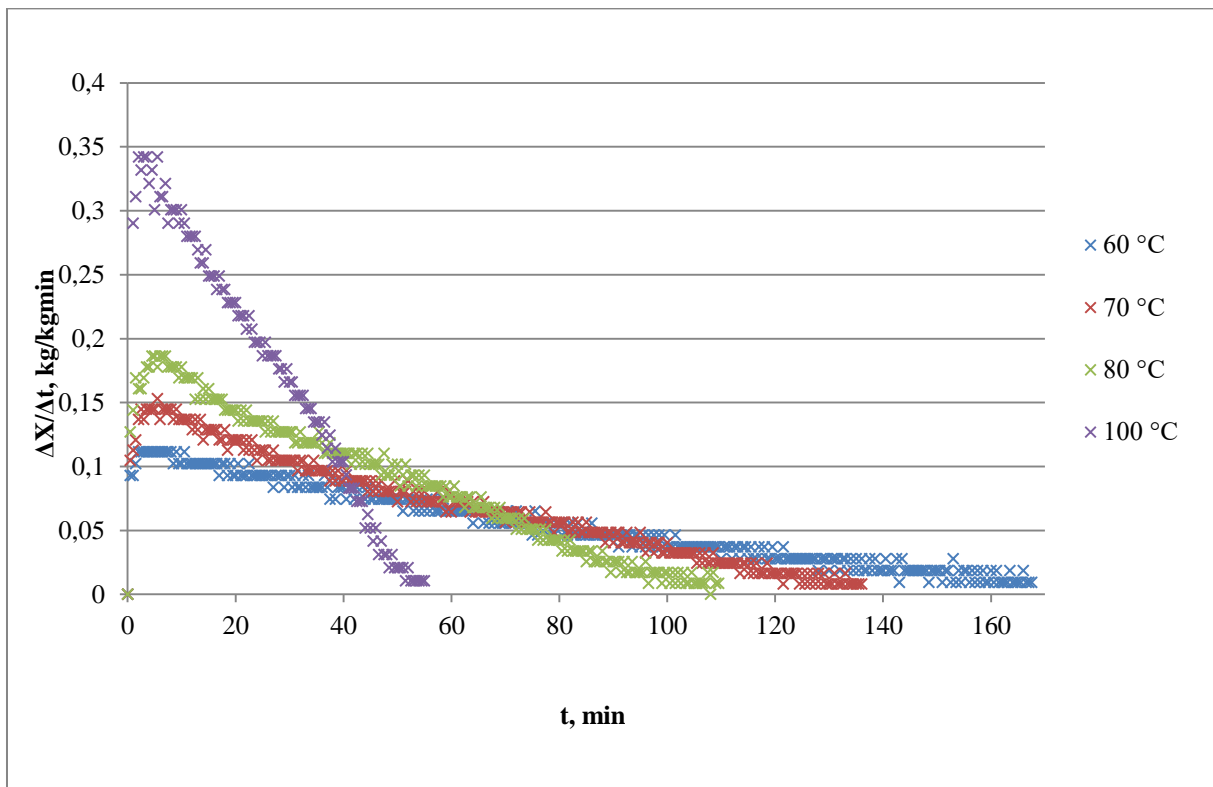
**Slika 47.** Uzorci paprike prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 60 °C, 80 °C i 100 °C



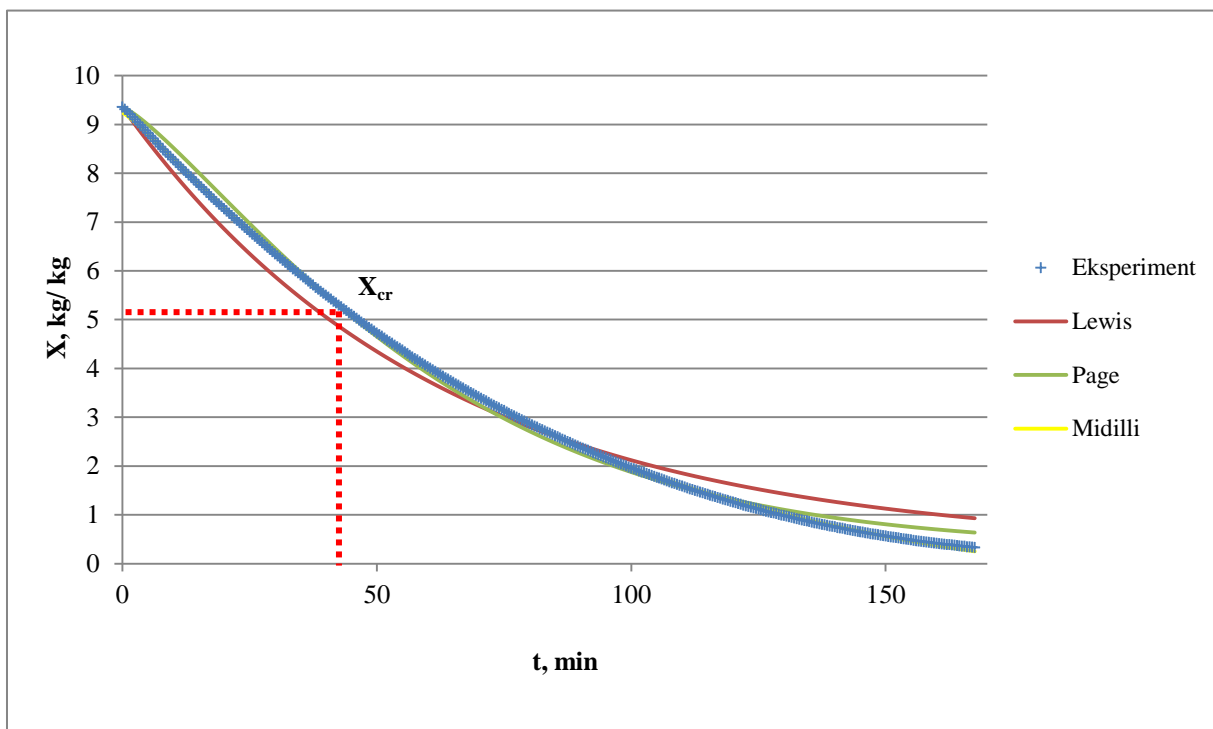
**Slika 48.** Uzorci paprike nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



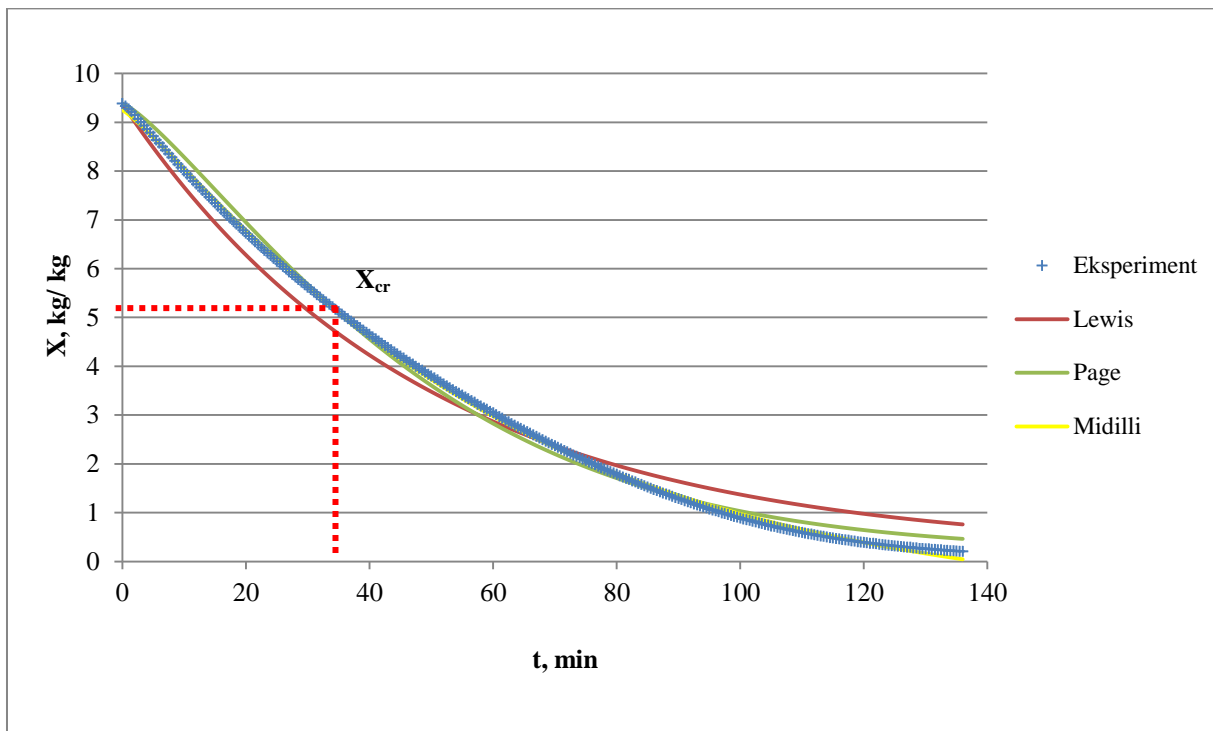
**Slika 49.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka paprike s vremenom pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



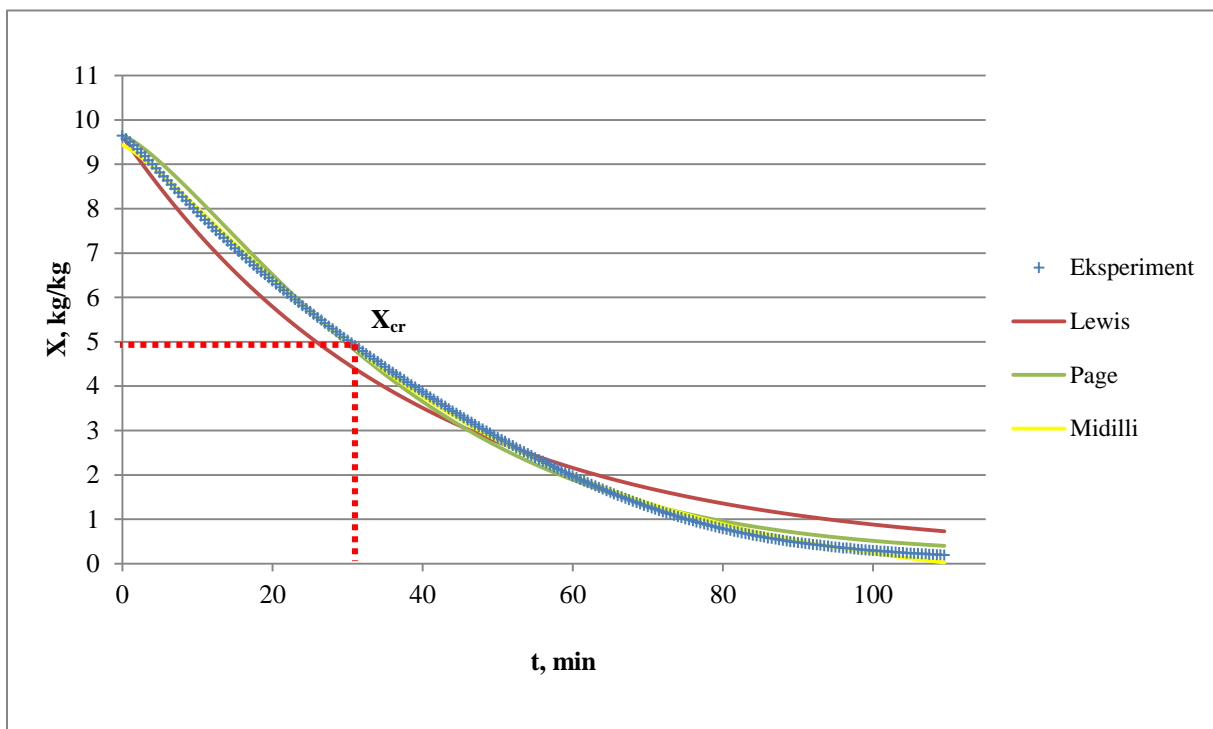
**Slika 50.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzoraka paprike o vremenu sušenja pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



**Slika 51.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka paprike s vremenom pri 60 °C te primjenjivost Lewis-ovog, Page-ovog i Midilli-Kucuk-ovog modela

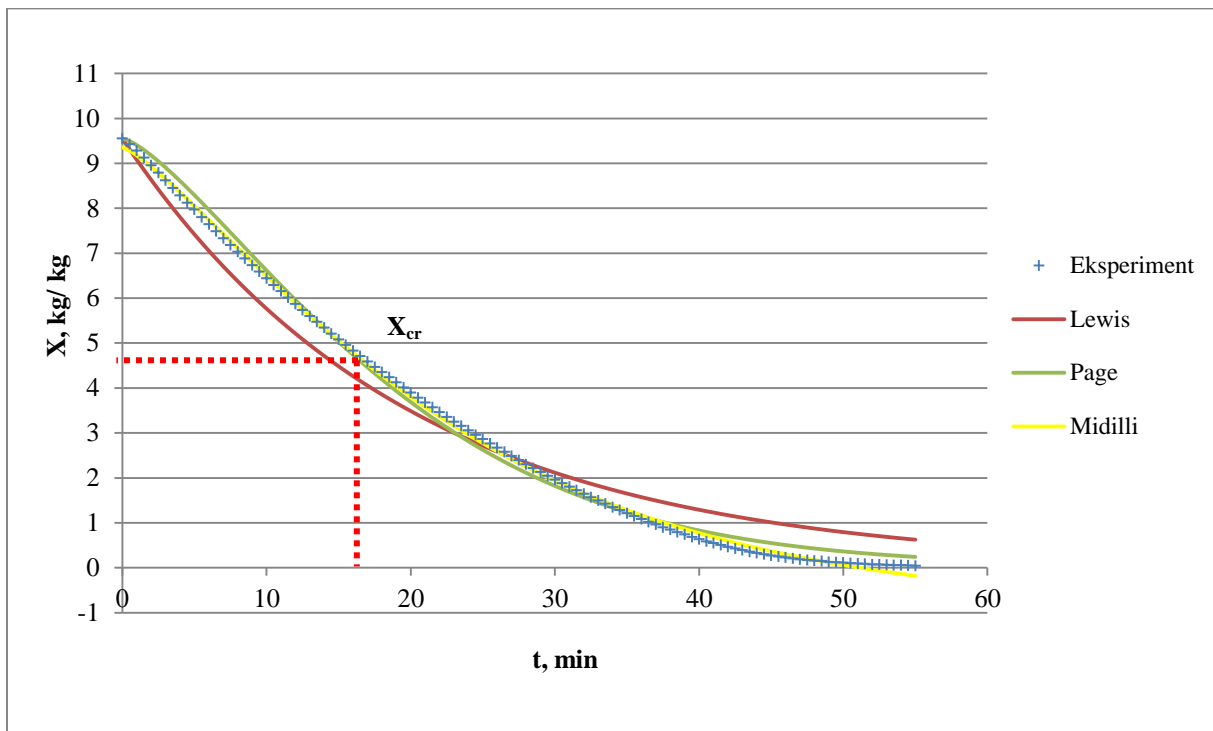


**Slika 52.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka paprike s vremenom pri  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 53.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka paprike s vremenom pri  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela





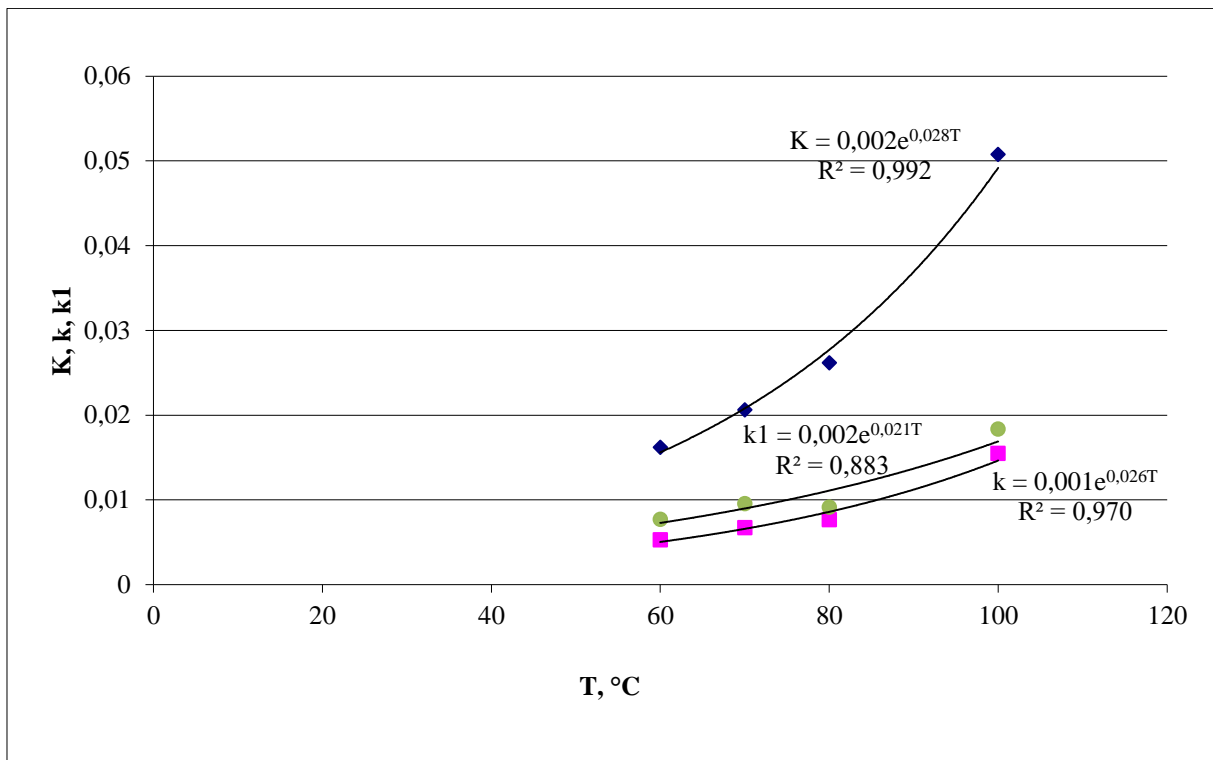
**Slika 54.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka paprike s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 10.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke paprike

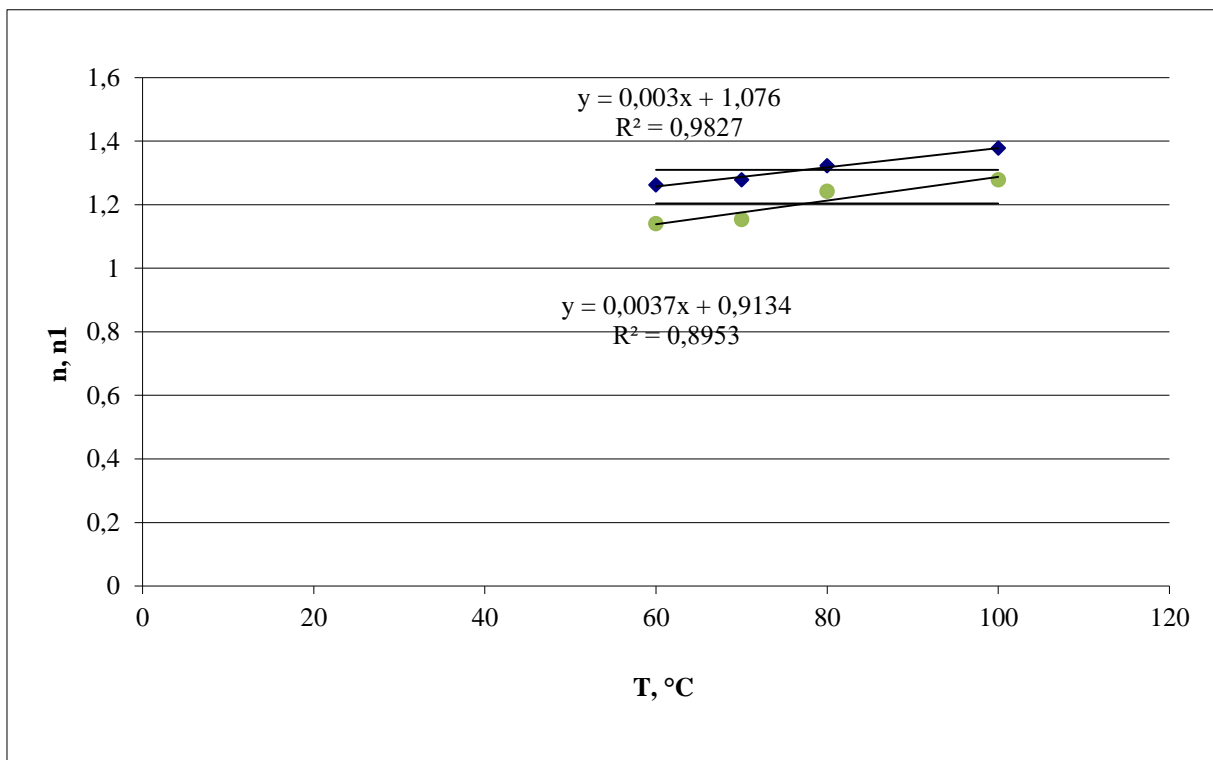
$T, ^\circ C$	60	70	80	100
$X_{cr}, kg/kg$	5,14	5,17	4,91	4,60

**Tablica 11.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke paprike

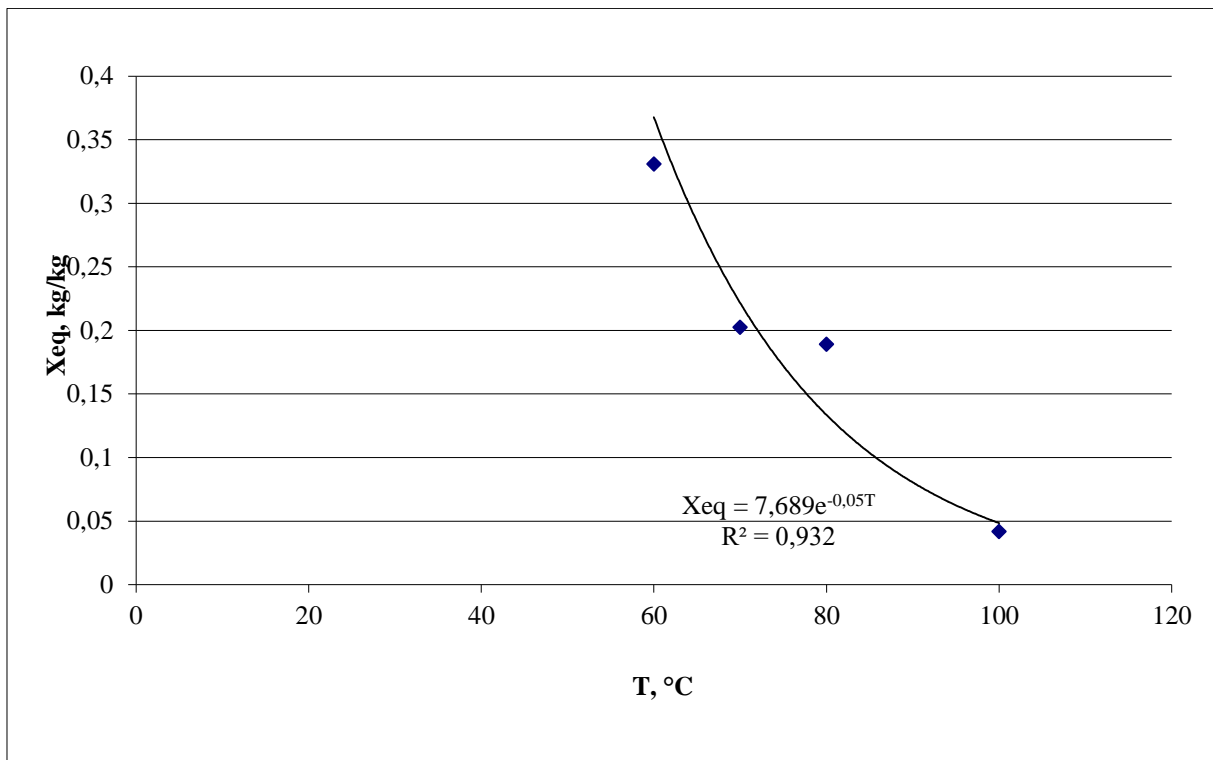
$T, ^\circ C$	$a$	$b$
60	0,988021	-0,00048
70	0,985967	-0,00059
80	0,977888	-0,00055
100	0,979612	-0,00124



**Slika 55.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $k1$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke paprike



**Slika 56.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog  $n1$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke paprike



**Slika 57.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke paprike

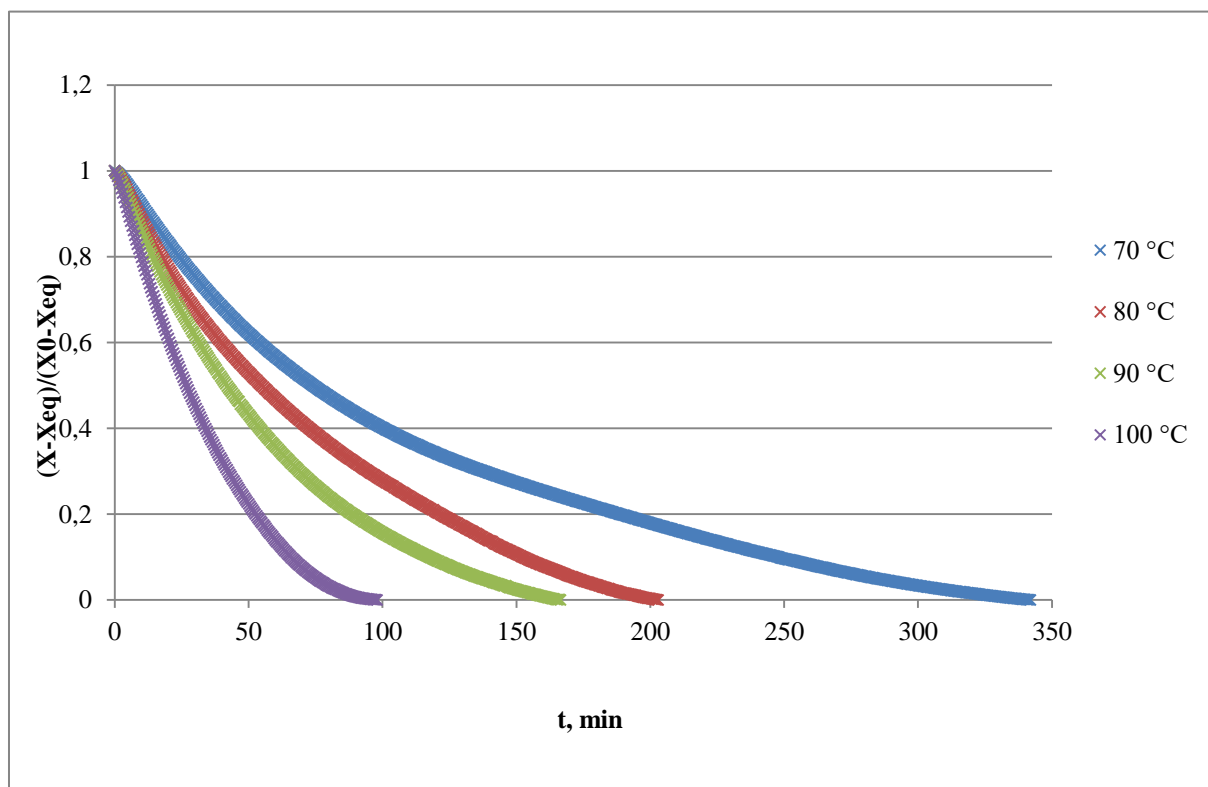
#### 4.4 Korijen peršina



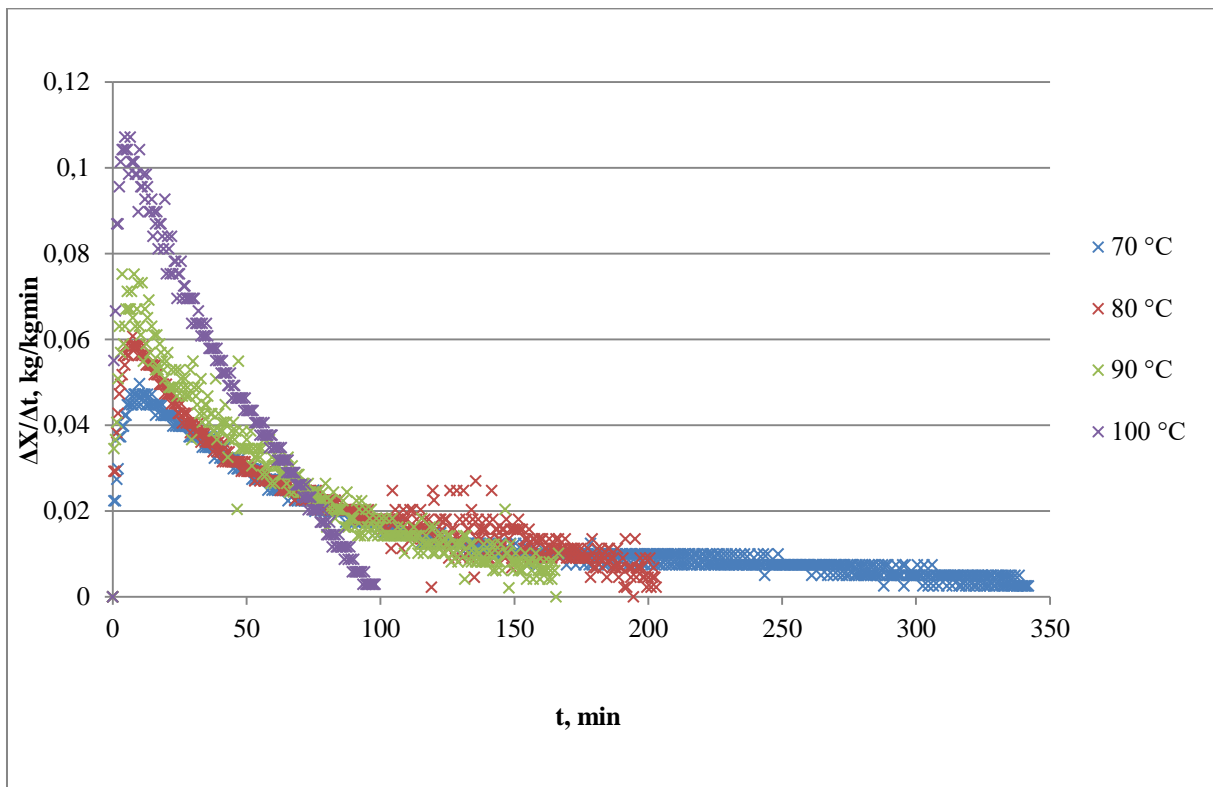
**Slika 58.** Uzorci korijena peršina prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 70 °C, 90 °C i 100 °C



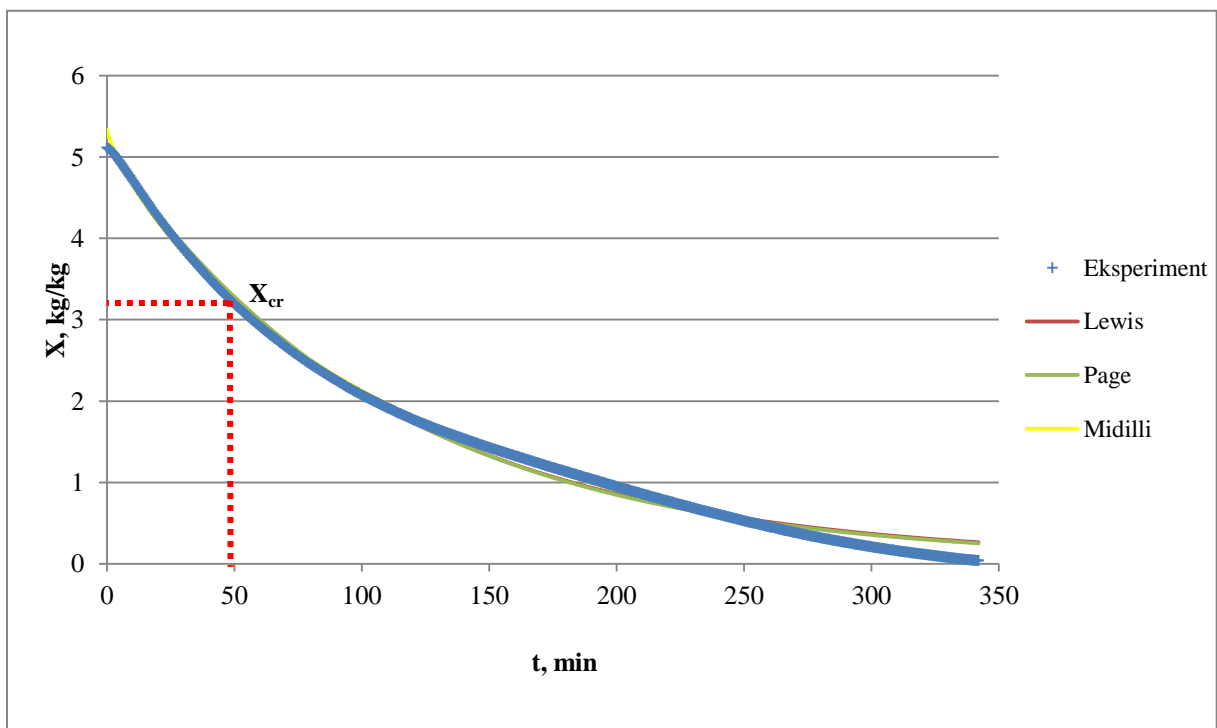
**Slika 59.** Uzorak korijena peršina nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



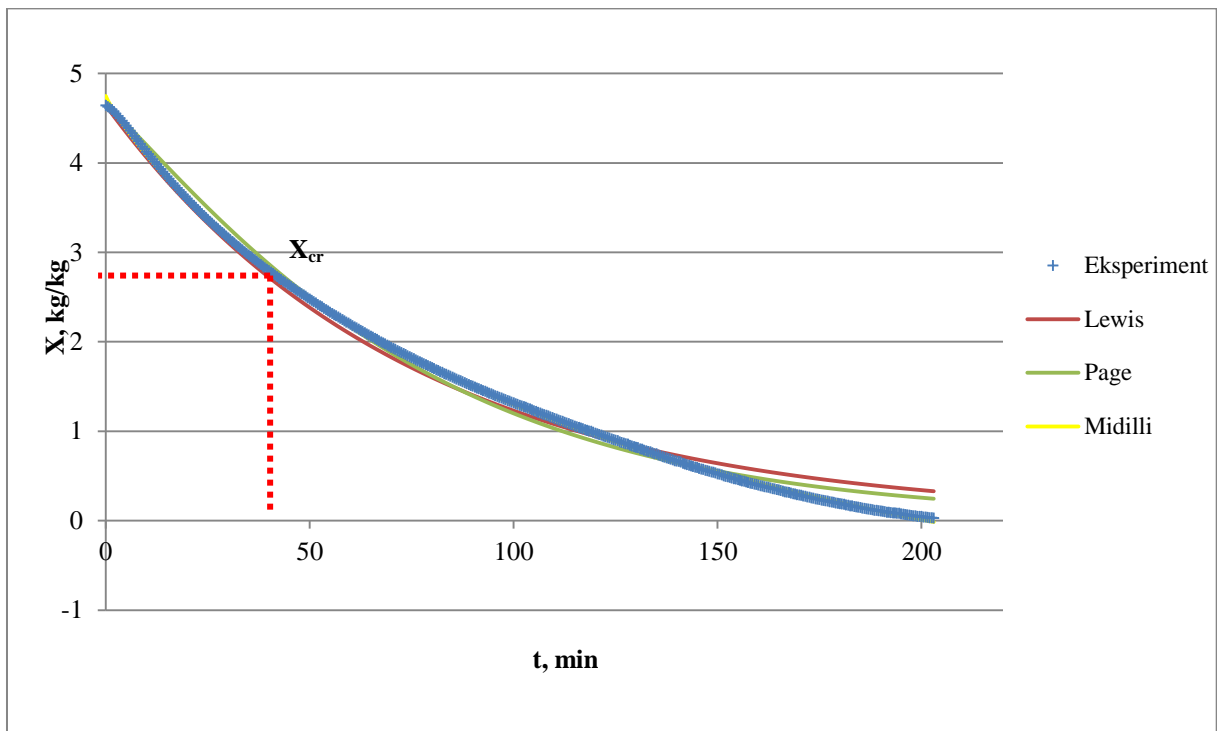
**Slika 60.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka korijena peršina s vremenom pri 70 °C, 80 °C, 90 °C i 100 °C



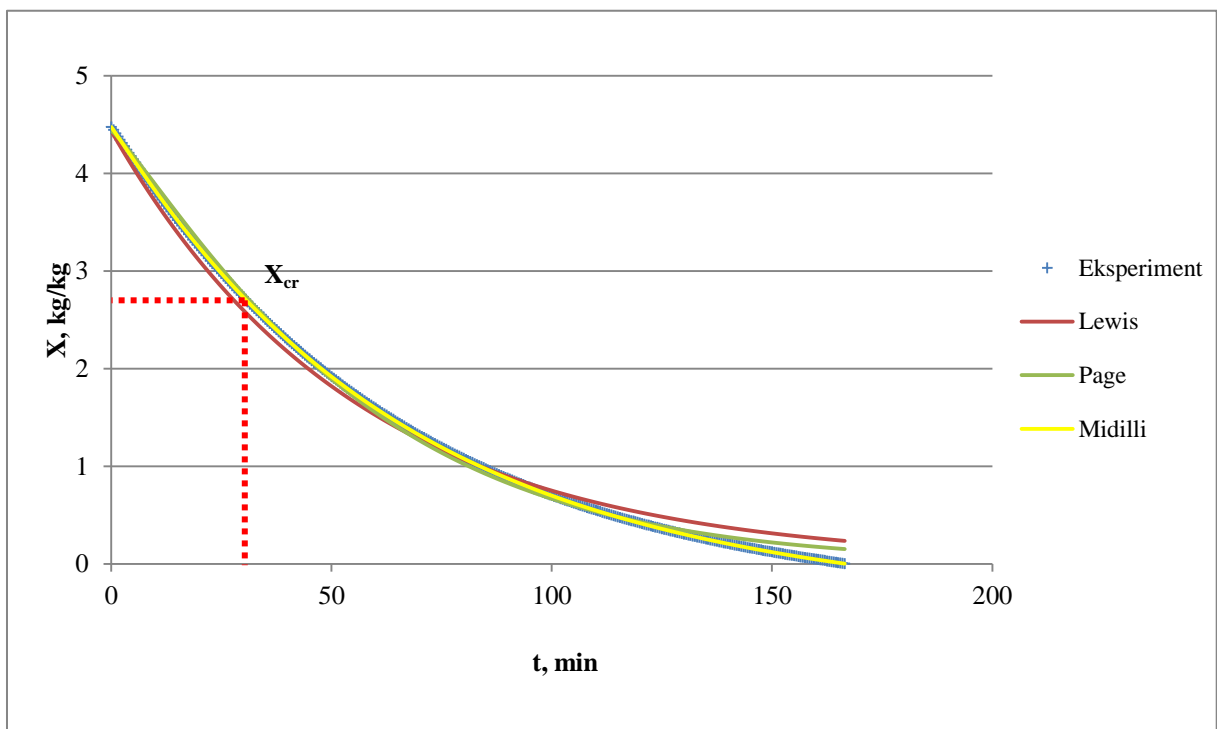
**Slika 61.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzorka korijena peršina o vremenu sušenja pri 70 °C, 80 °C, 90 °C i 100 °C



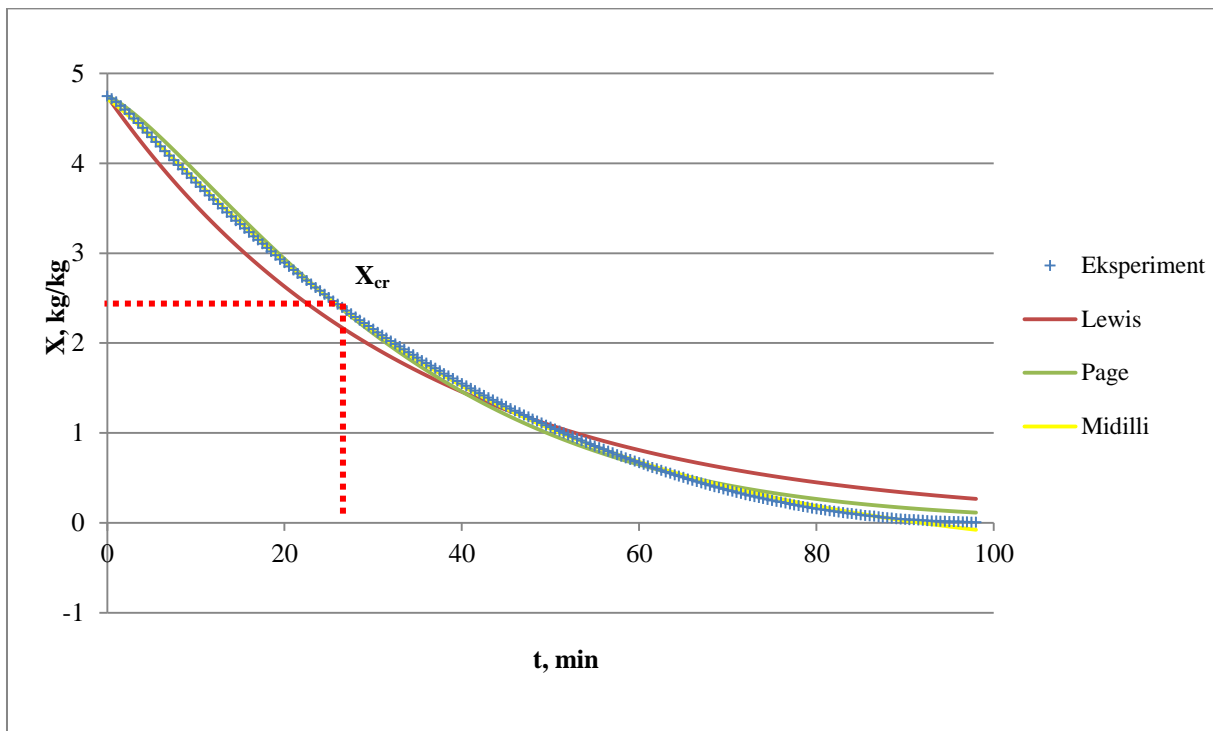
**Slika 62.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka korijena peršina s vremenom pri 70 °C te primjenjivost Lewis-ovog, Page-ovog i Midilli-Kucuk-ovog modela



**Slika 63.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka korijena peršina s vremenom pri 80 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 64.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka korijena peršina s vremenom pri 90 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 65.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka korijena peršina s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

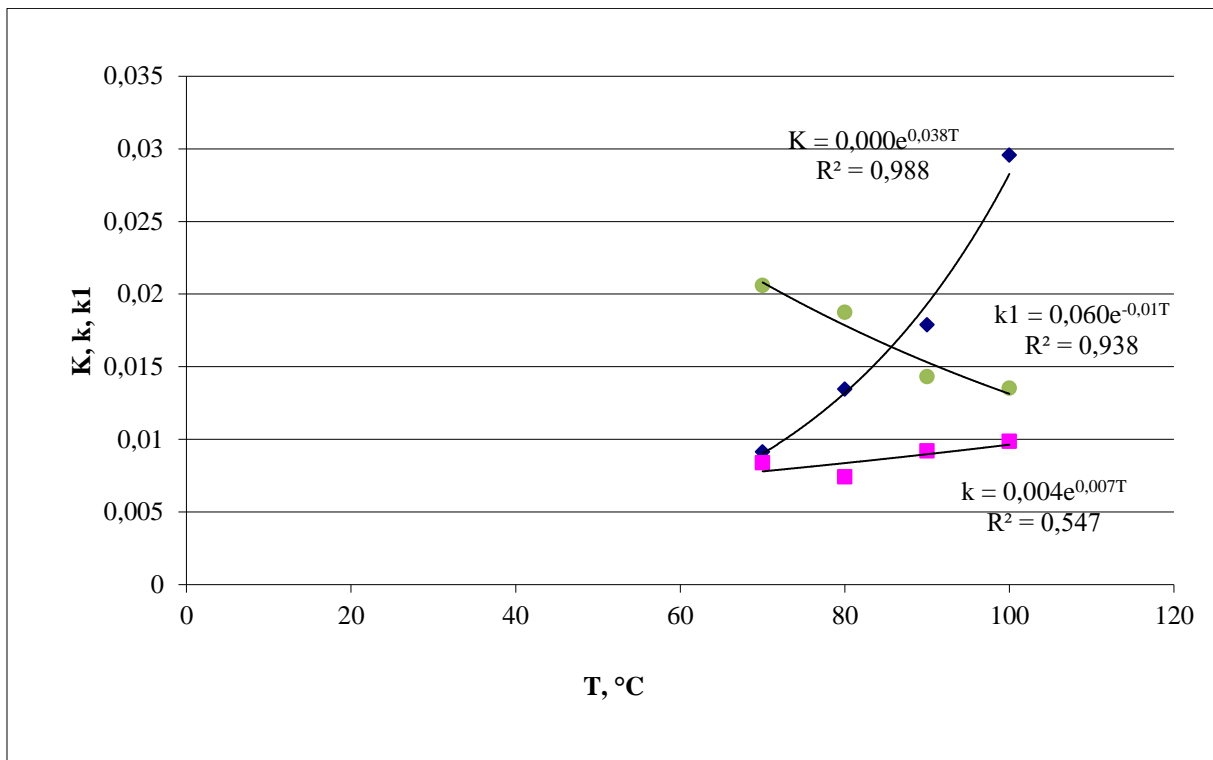
**Tablica 12.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke korijena peršina

$T, ^\circ C$	70	80	90	100
$X_{cr}, kg/kg$	3,29	2,79	2,76	2,47

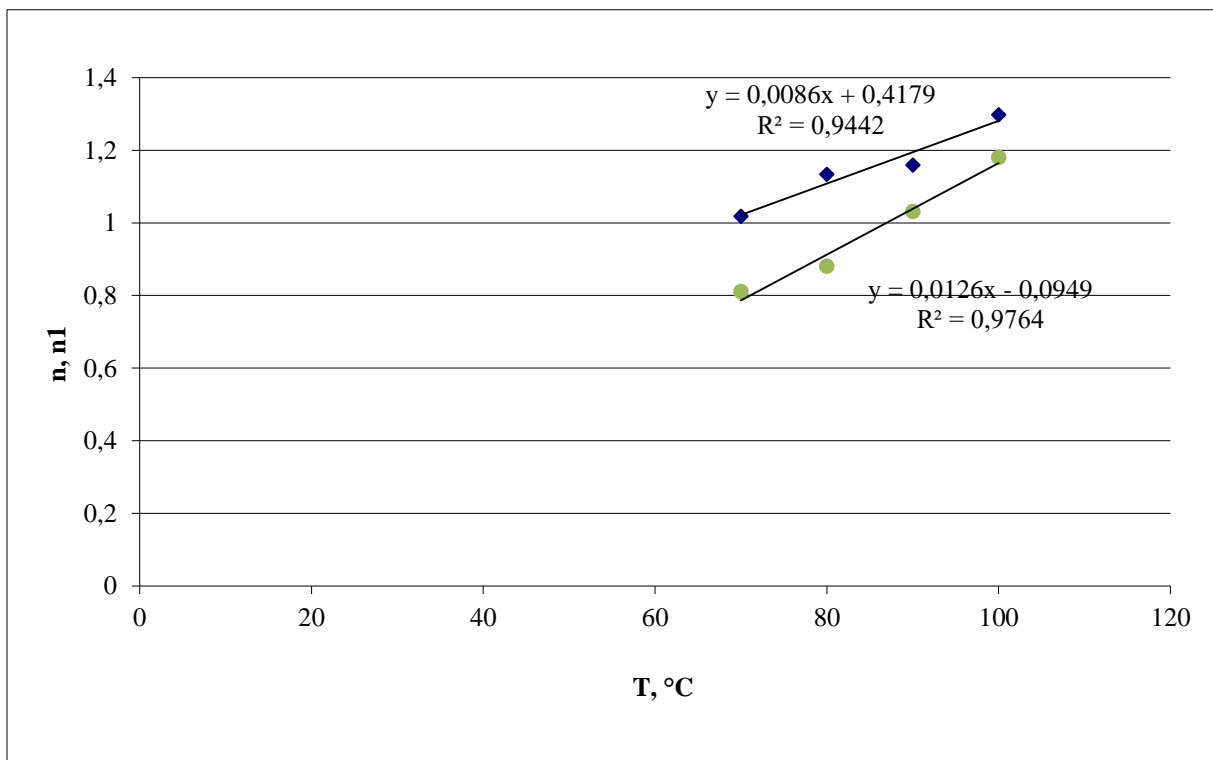
**Tablica 13.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke korijena peršina

$T, ^\circ C$	$a$	$b$
70	1,043388	-0,0003
80	1,022959	-0,00072
90	1,009055	-0,00038
100	0,993443	-0,00067

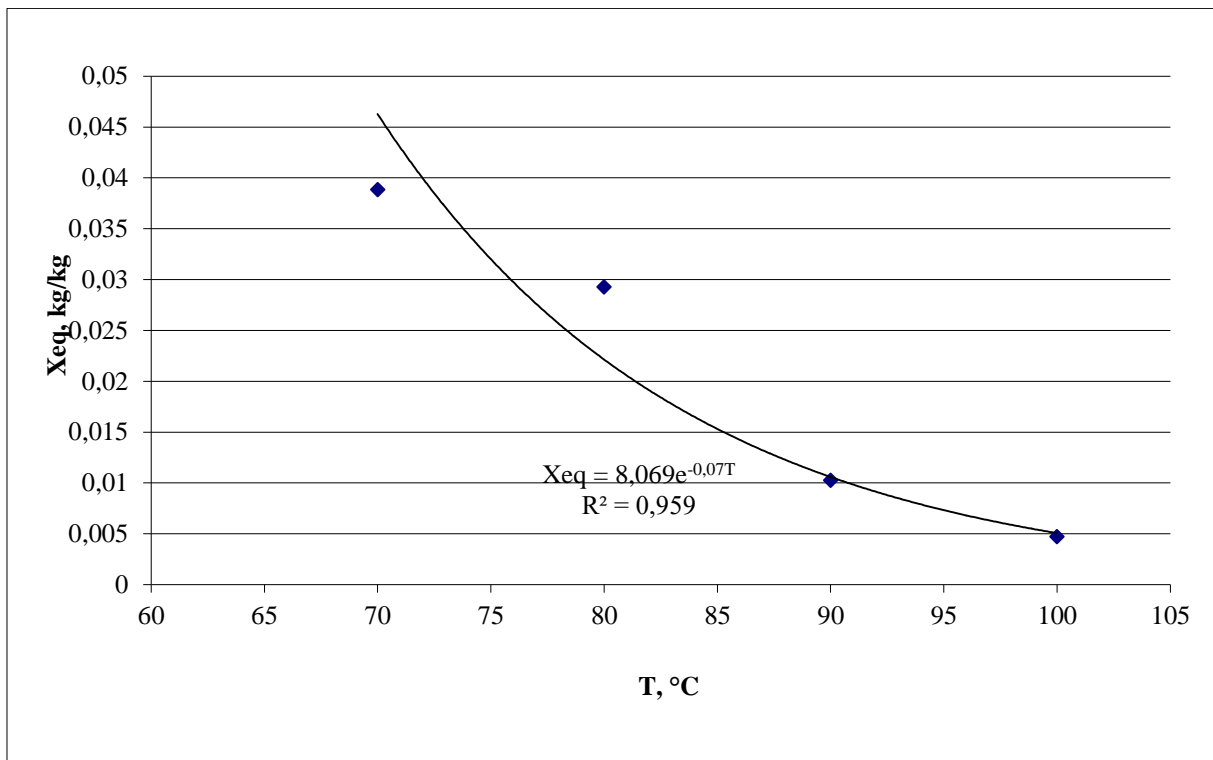




**Slika 66.** Grafički prikaz ovisnosti parametara Lewis-ovog ( $K$ ), Page-ovog ( $k$ ) i Midilli-Kucuk-ovog ( $kl$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke korijena peršina



**Slika 67.** Grafički prikaz ovisnosti parametra Page-ovog modela  $n$  i Midilli-Kucuk-ovog  $nl$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke korijena peršina



**Slika 68.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke korijena peršina

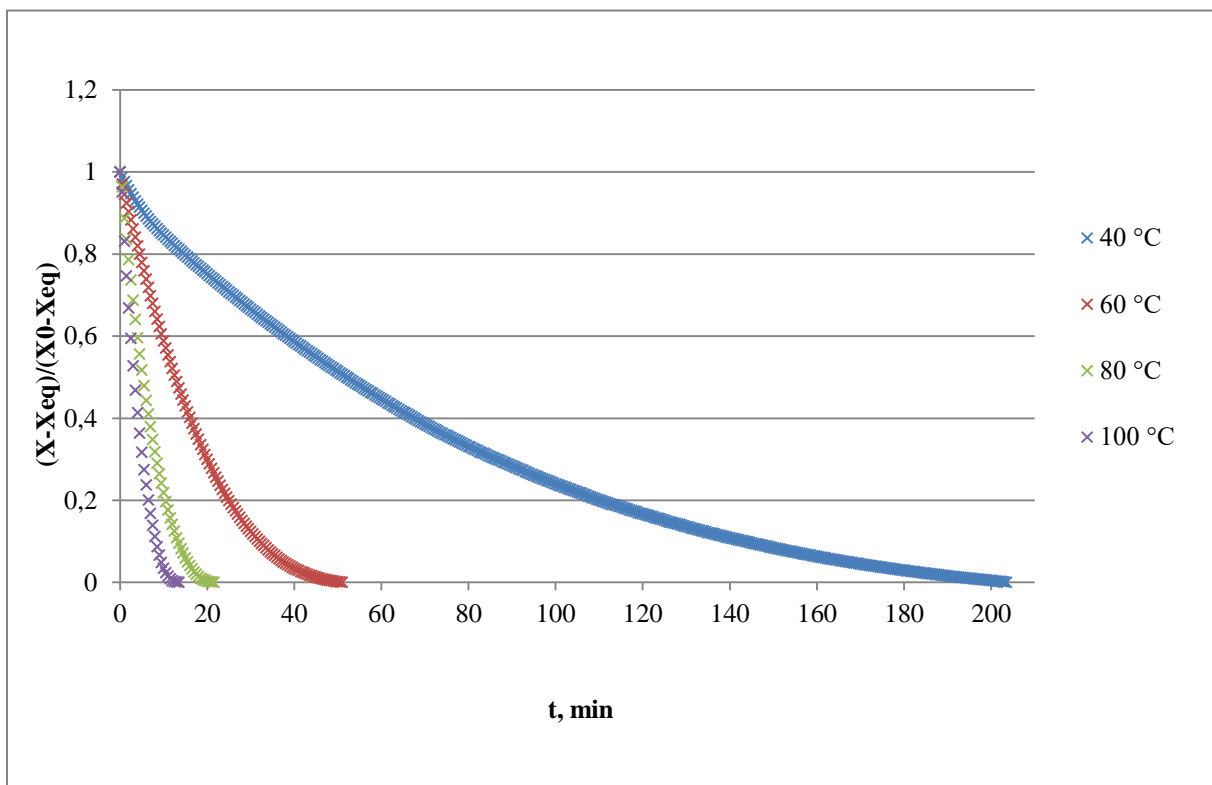
## 4.5 Lišće peršina



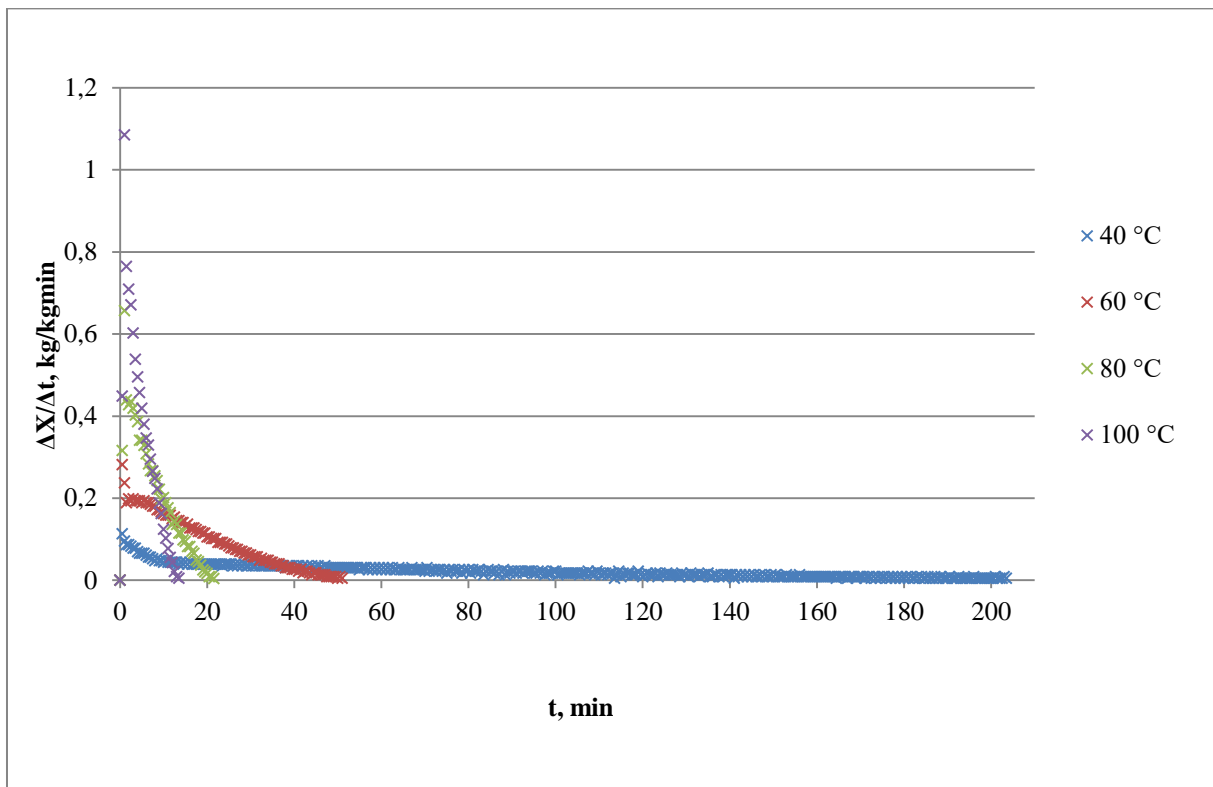
**Slika 69.** Uzorci lišća peršina prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 40 °C, 80 °C i 100 °C



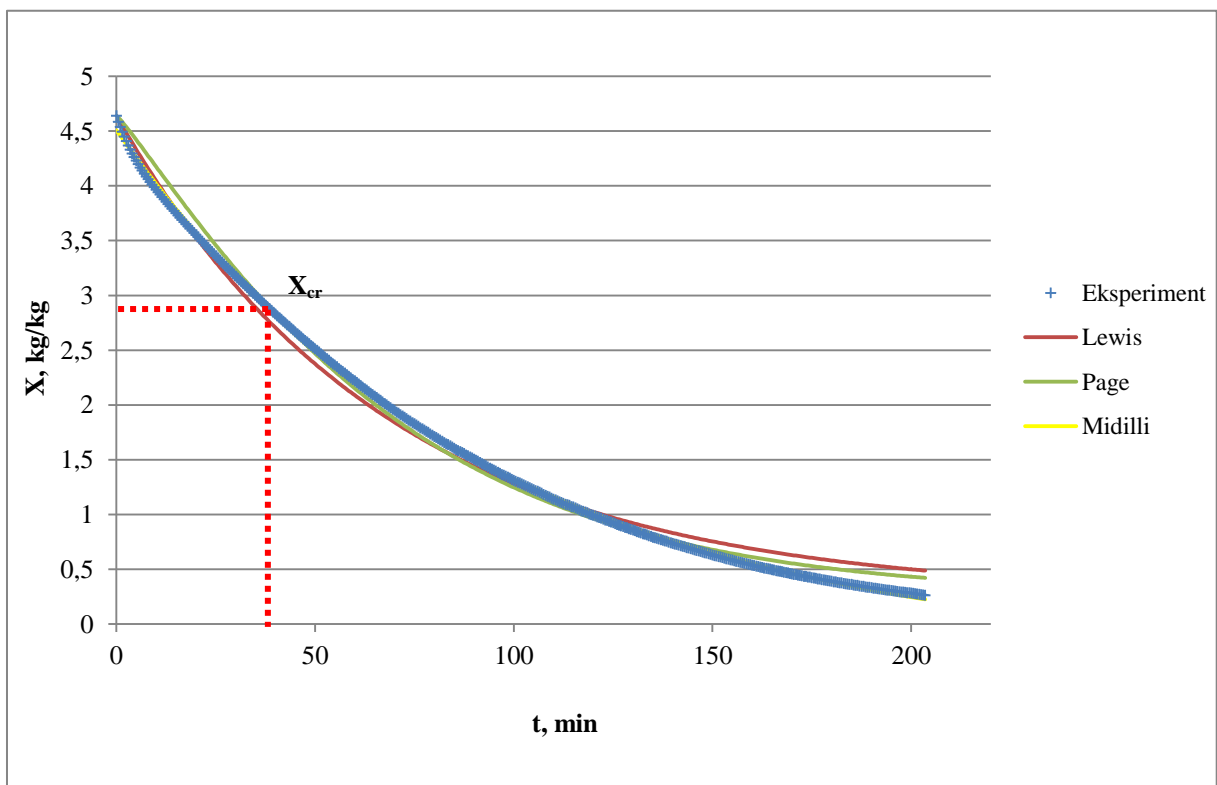
**Slika 70.** Uzorci lišća peršina nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



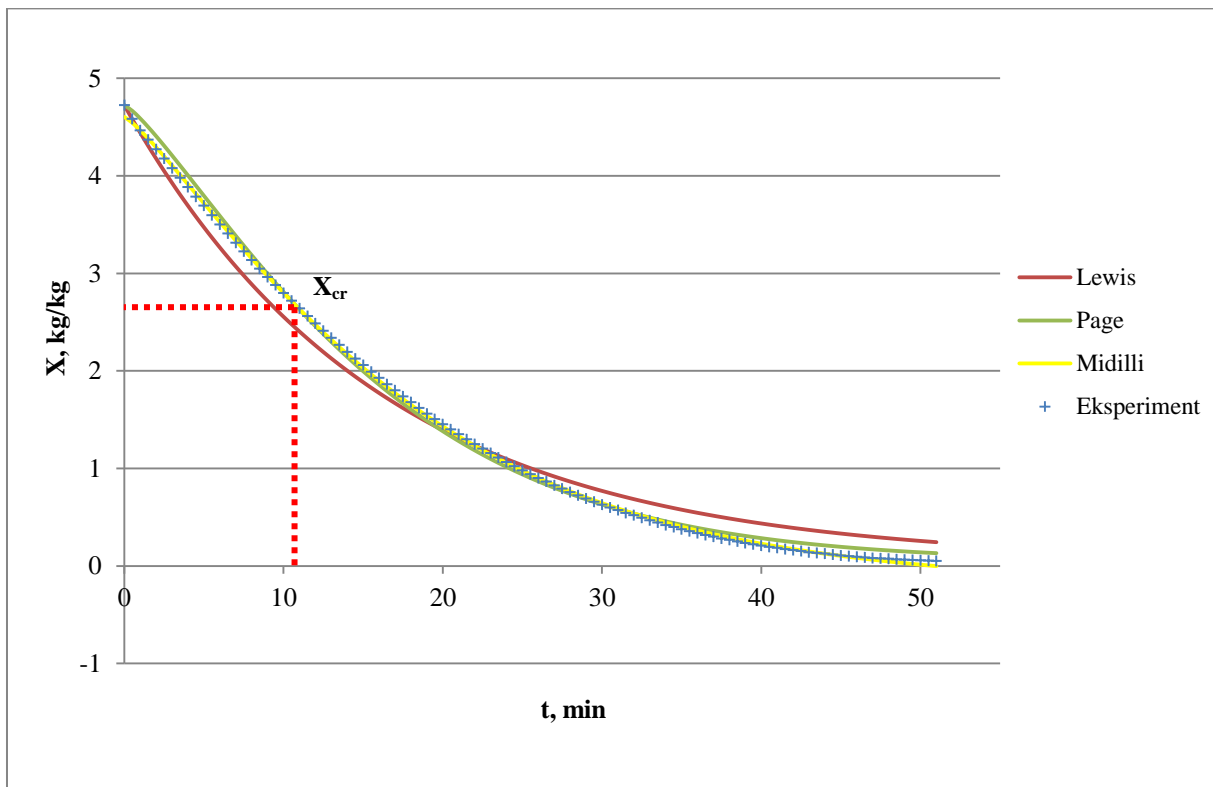
**Slika 71.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka lišća peršina s vremenom pri 40 °C, 60 °C, 80 °C i 100 °C



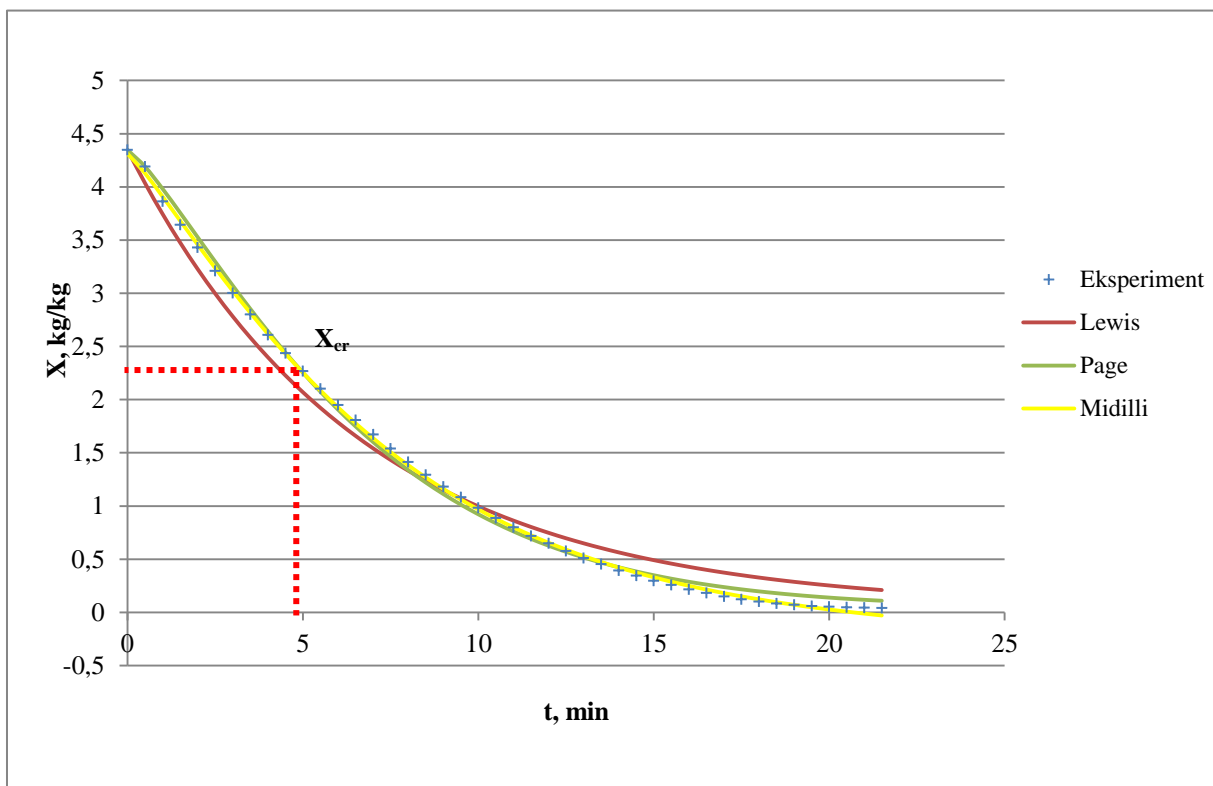
**Slika 72.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzorka lišća peršina o vremenu sušenja pri 40 °C, 60 °C, 80 °C i 100 °C



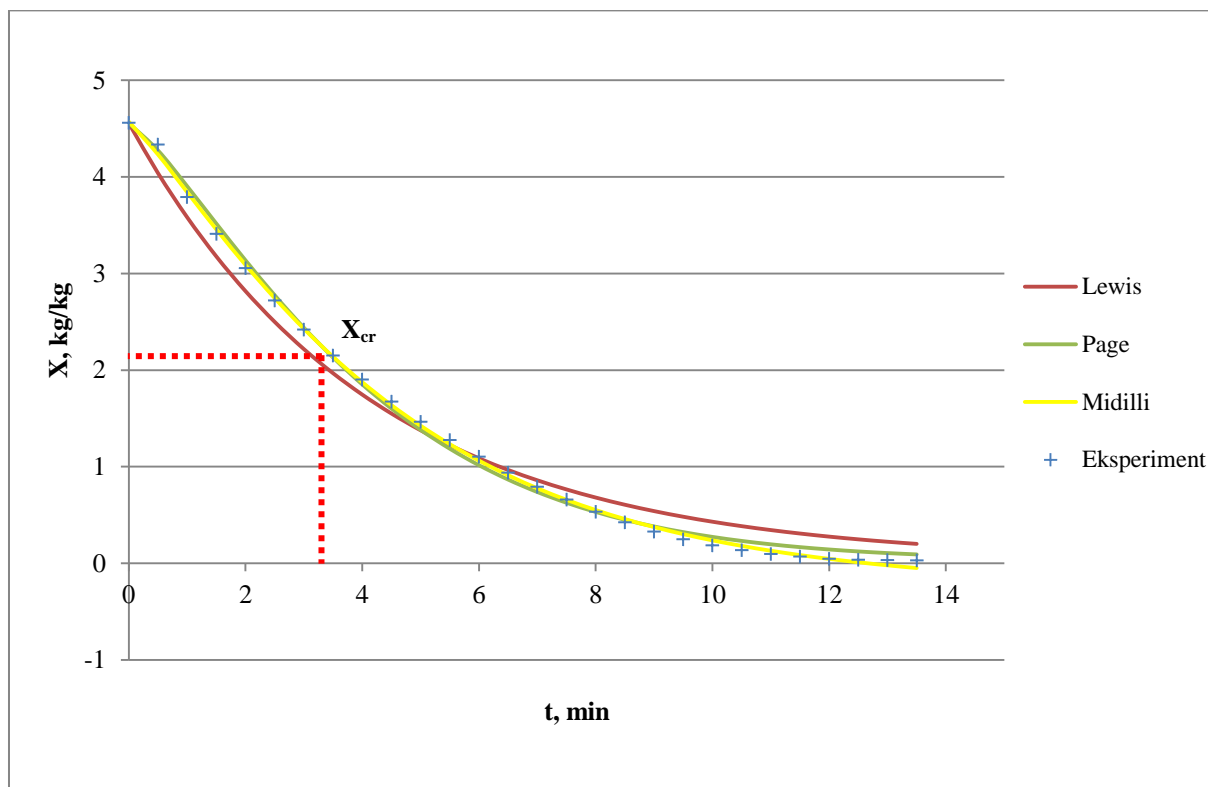
**Slika 73.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka lišća peršina s vremenom pri 40 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 74.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka lišća peršina s vremenom pri  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 75.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka lišća peršina s vremenom pri  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



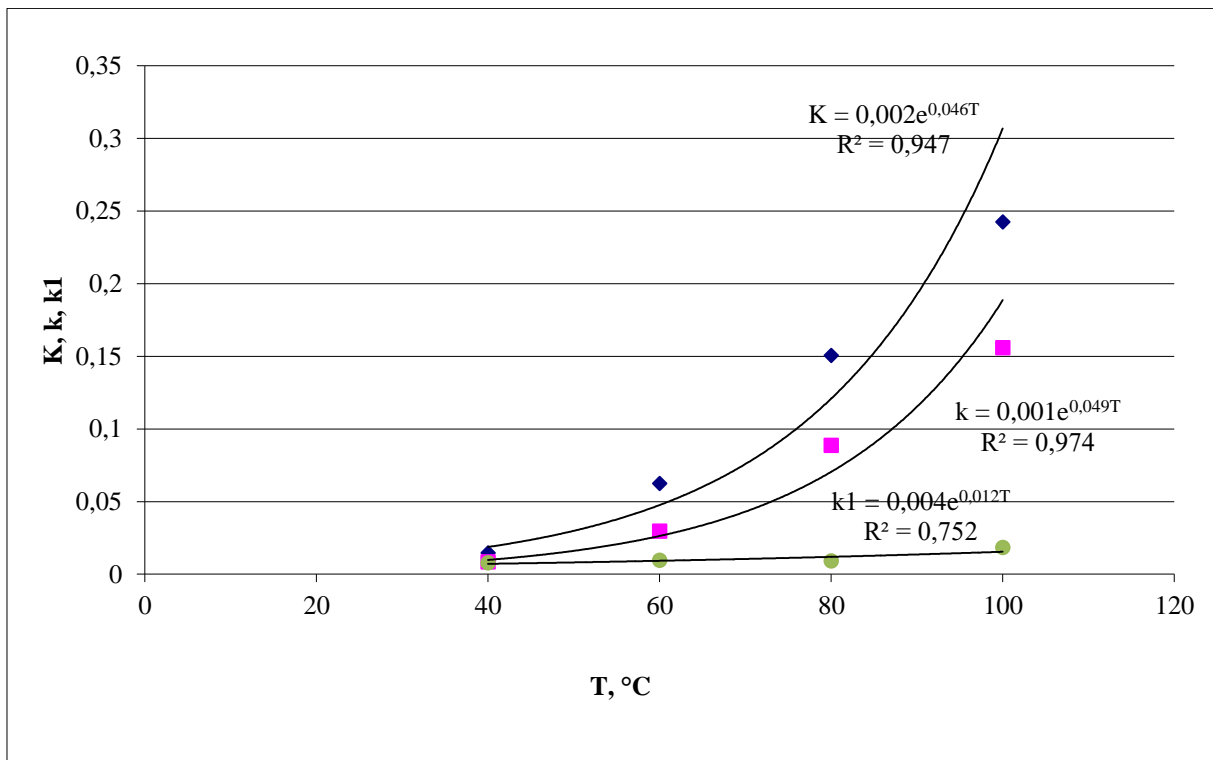
**Slika 76.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka lišća peršina s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 14.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke lišća peršina

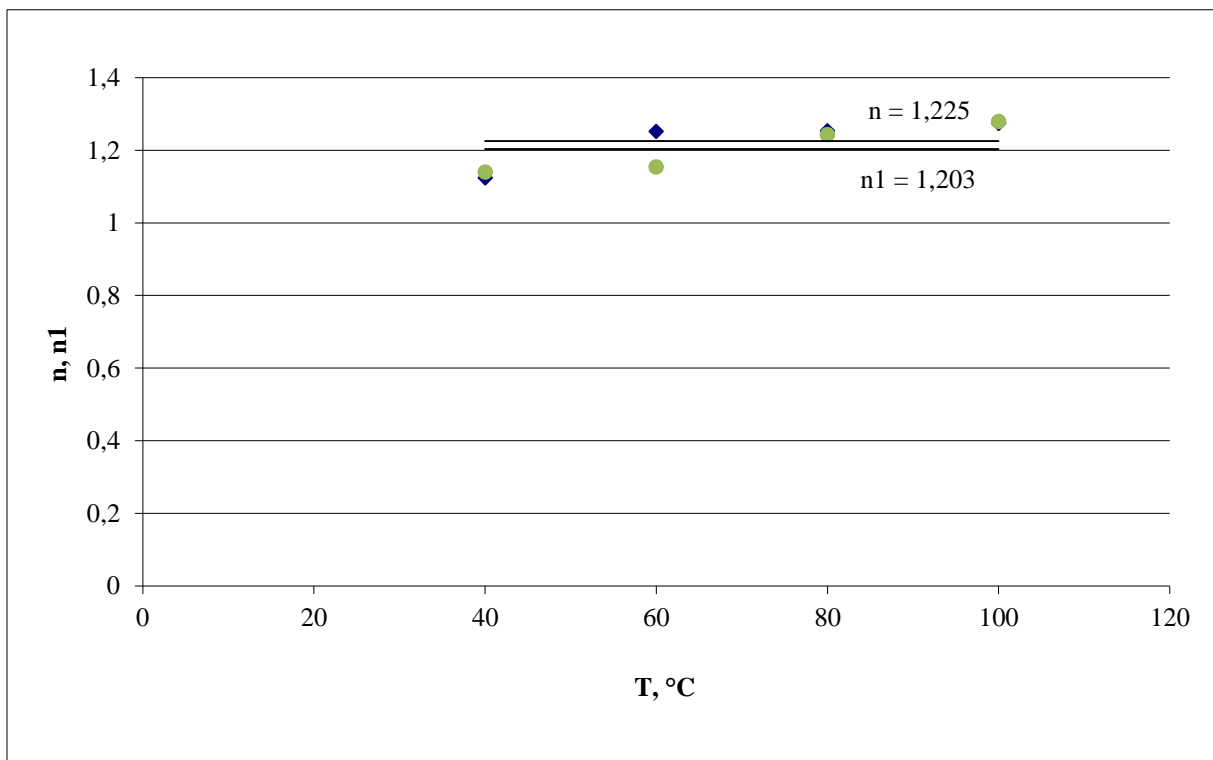
$T, ^\circ C$	40	60	80	100
$X_{cr}, kg/kg$	2,88	2,72	2,27	2,21

**Tablica 15.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke lišća peršina

$T, ^\circ C$	$a$	$b$
40	0,988021	-0,00048
60	0,985967	-0,00059
80	0,977888	-0,00055
100	0,979612	-0,00124

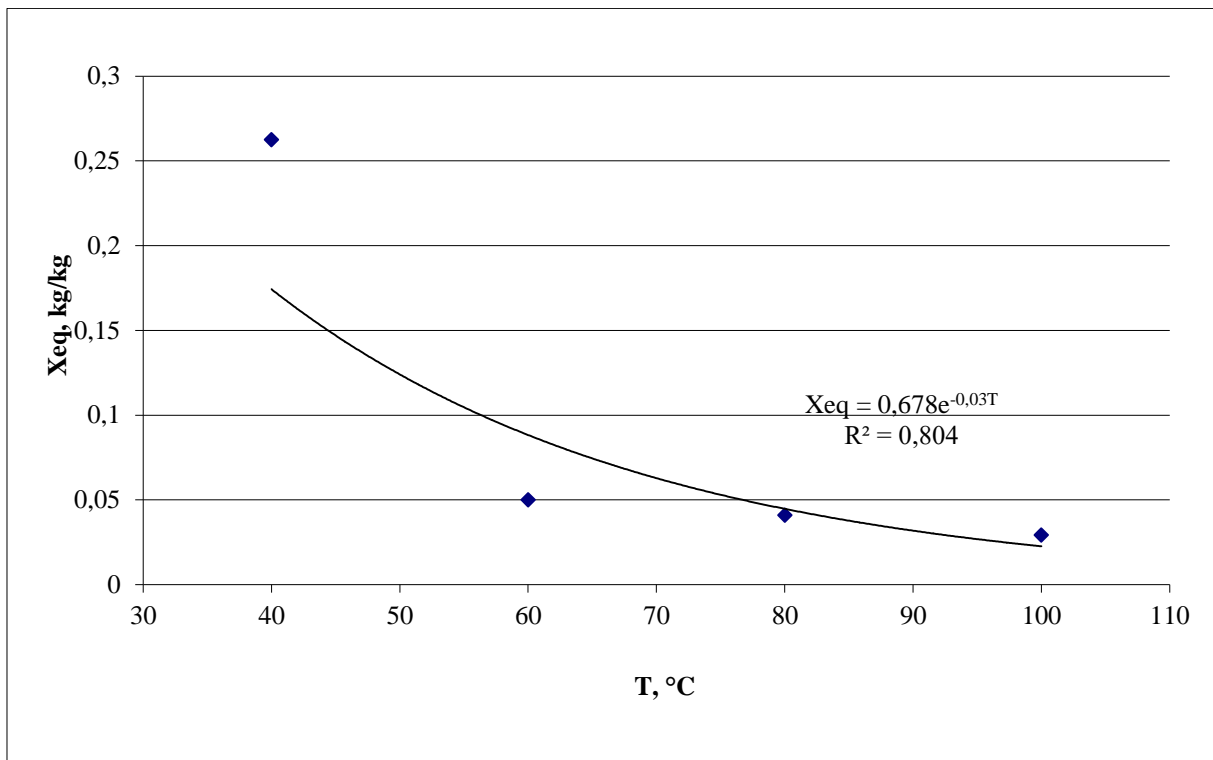


**Slika 77.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $k1$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke lišća peršina



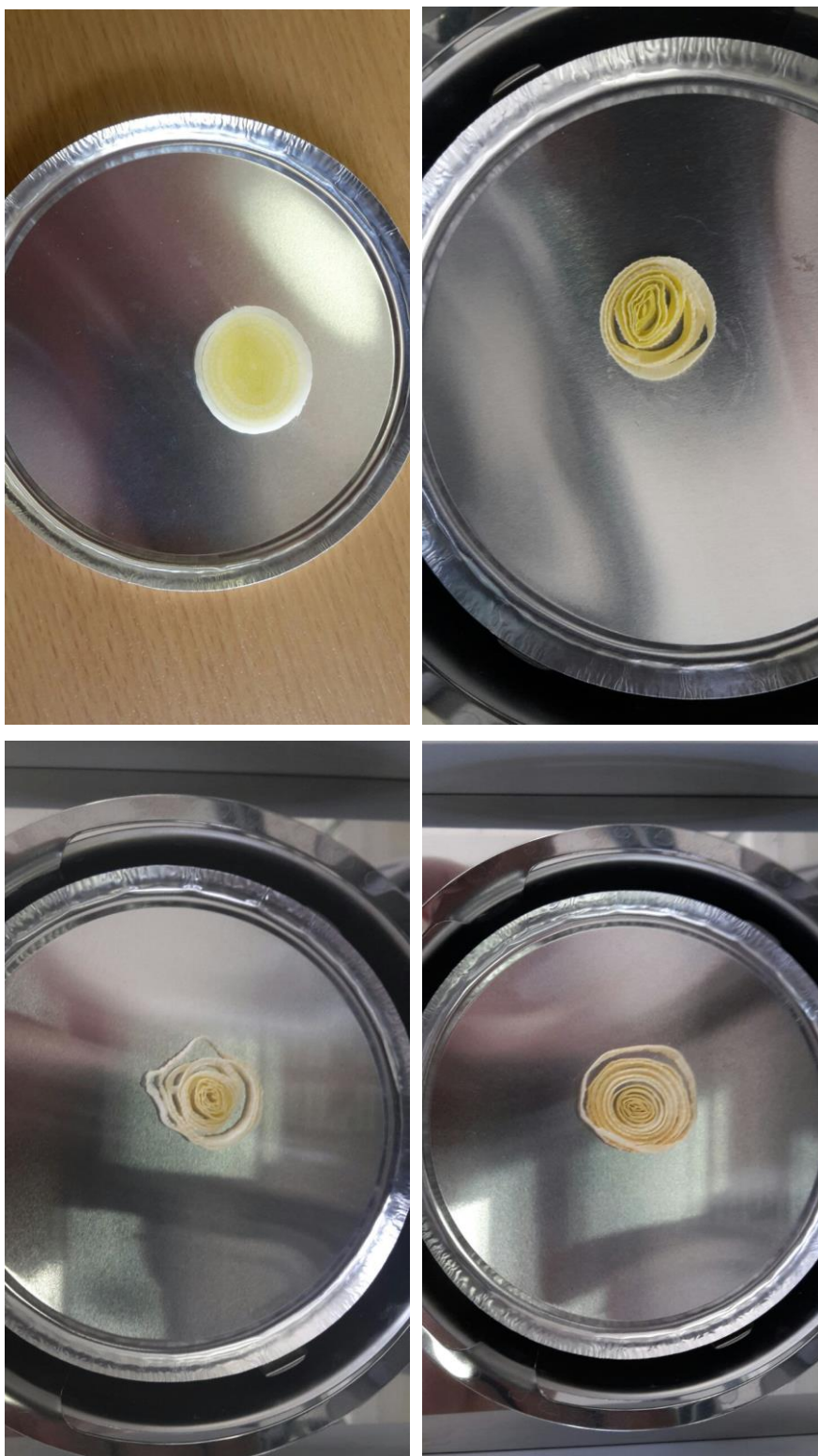
**Slika 78.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog  $n1$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke lišća peršina



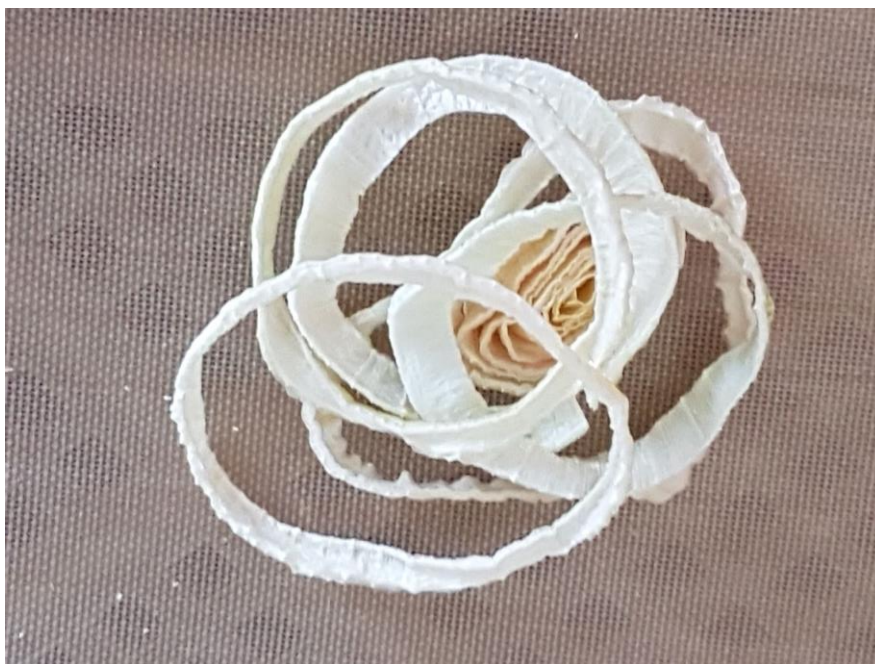


**Slika 79.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke lišća peršina

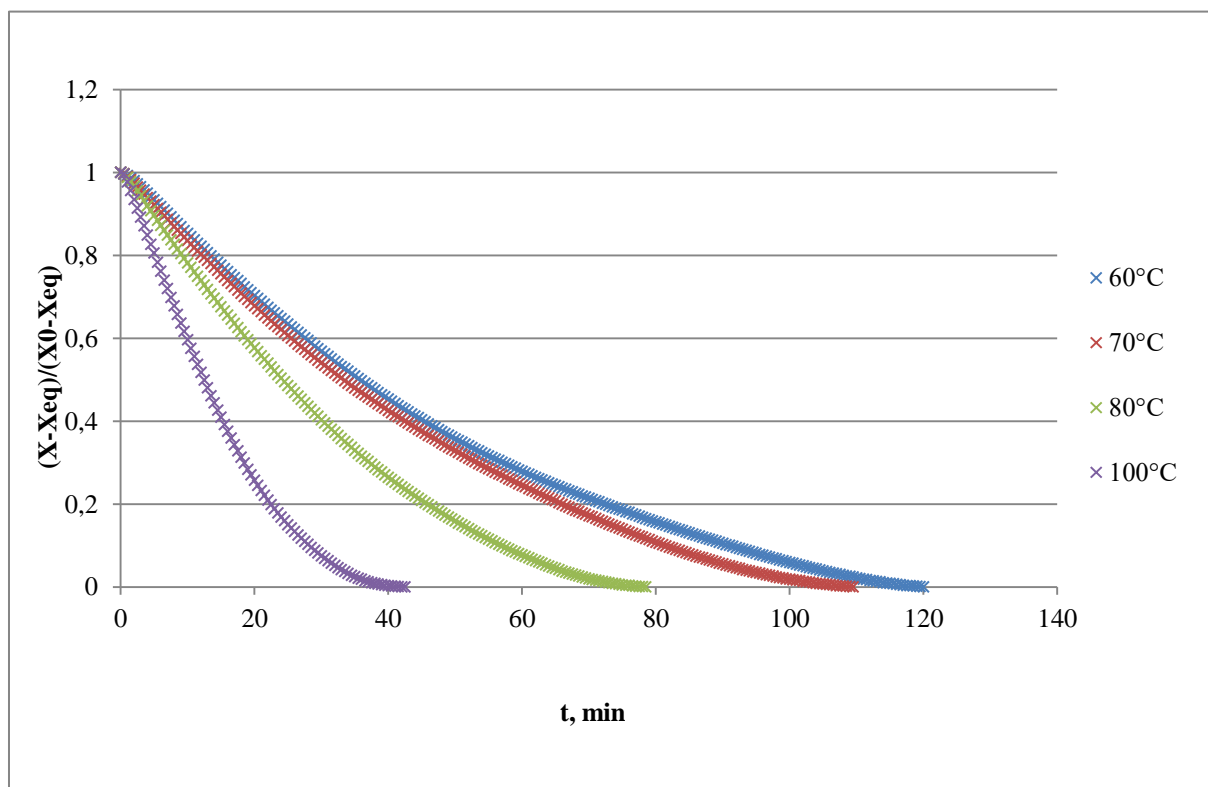
## 4.6 Poriluk



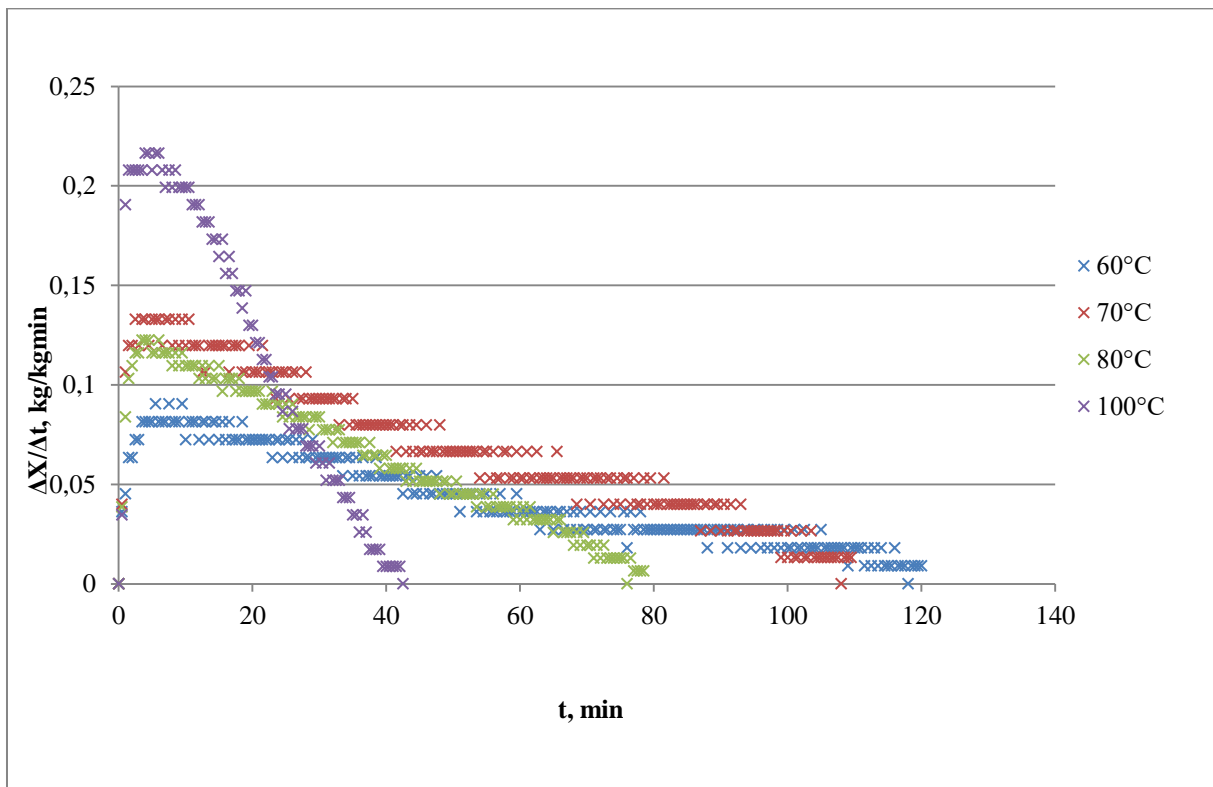
**Slika 80.** Uzorci poriluka prije i nakon sušenja u infracrvenom sušioniku pri 60 °C, 80 °C i 100 °C



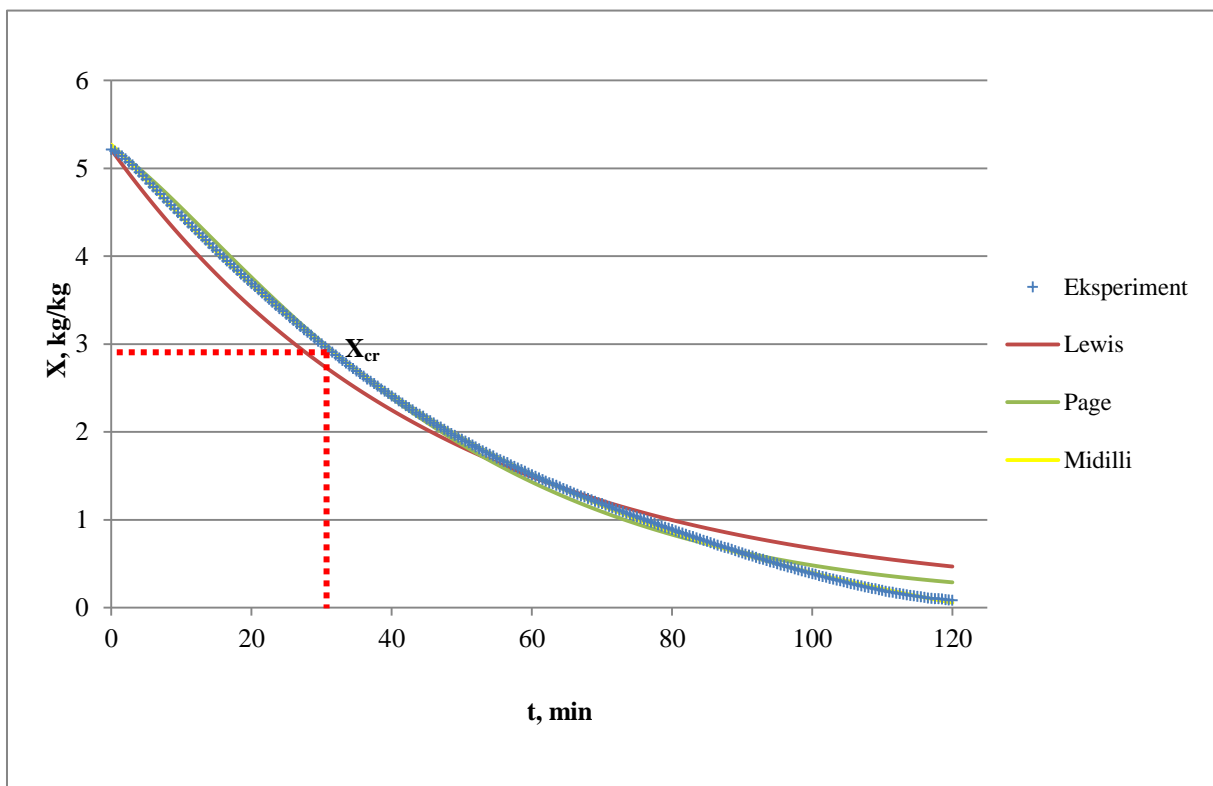
**Slika 81.** Uzorak poriluka nakon sušenja u konvekcijskom sušioniku



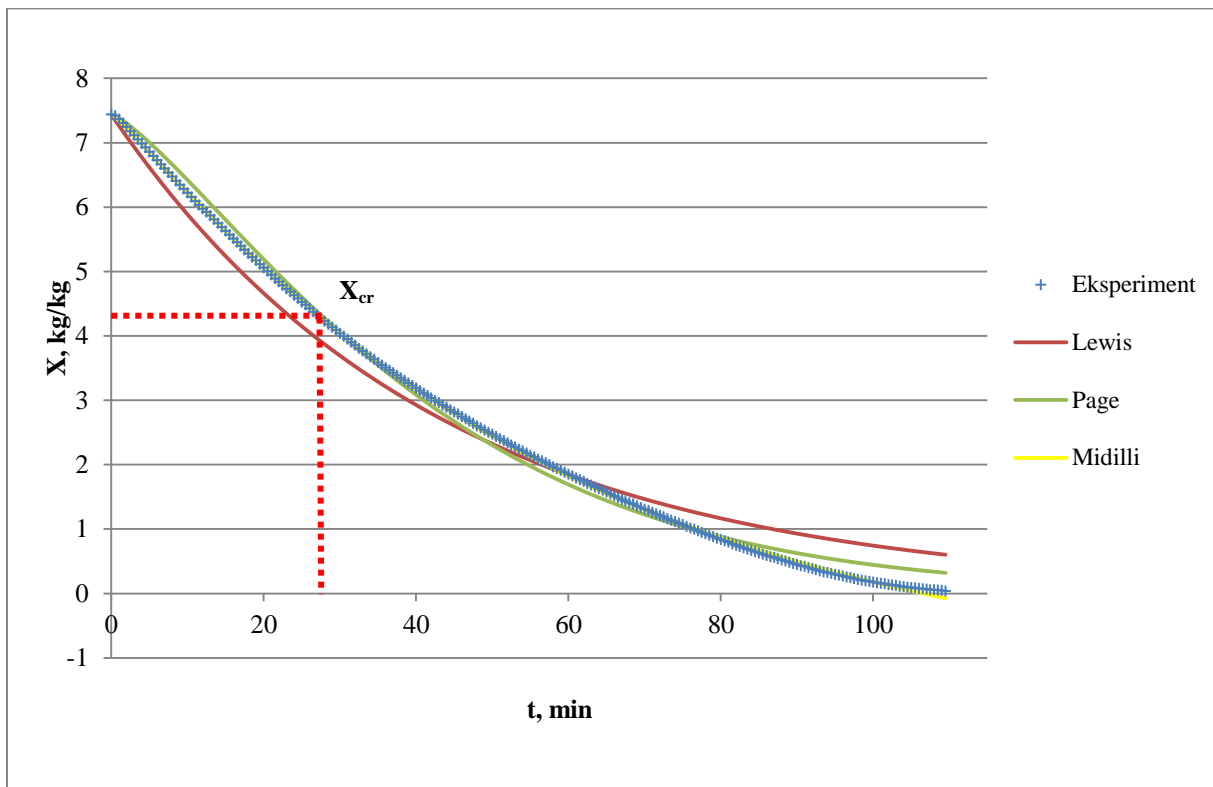
**Slika 82.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka poriluka s vremenom pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



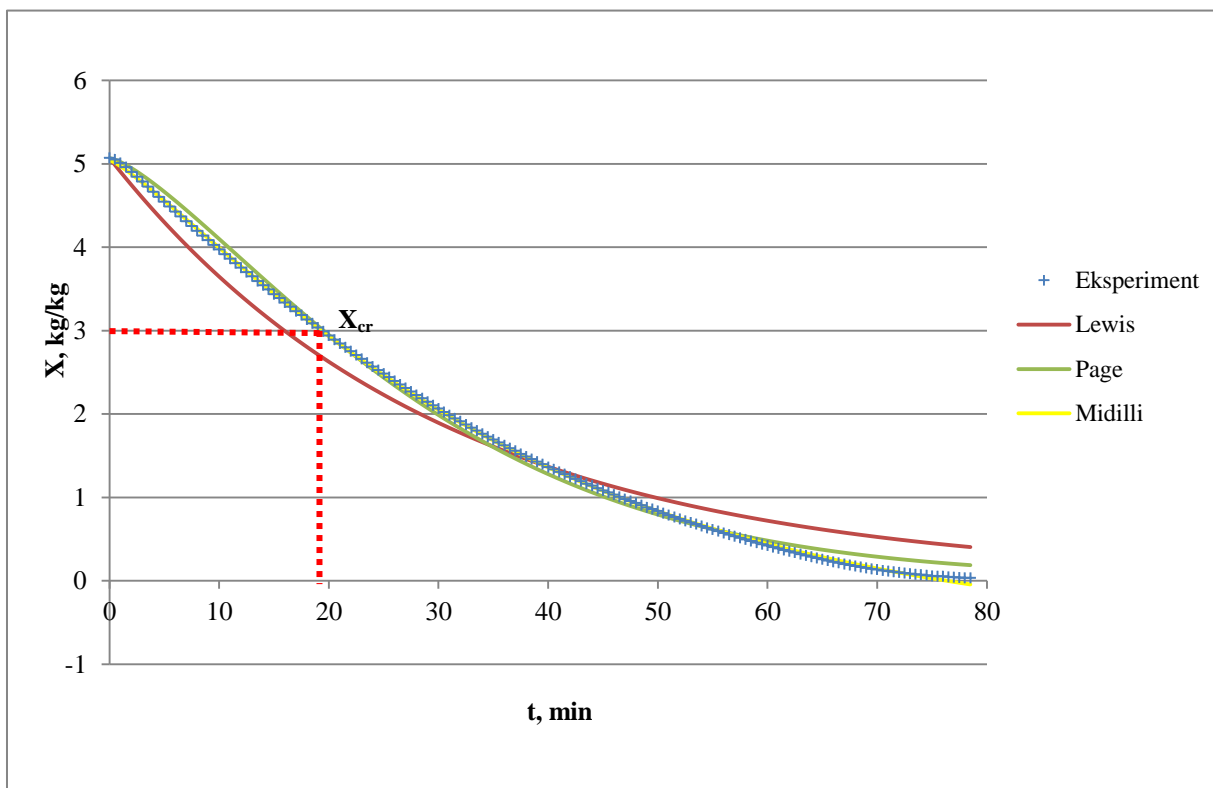
**Slika 83.** Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzorka poriluka o vremenu sušenja pri 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C



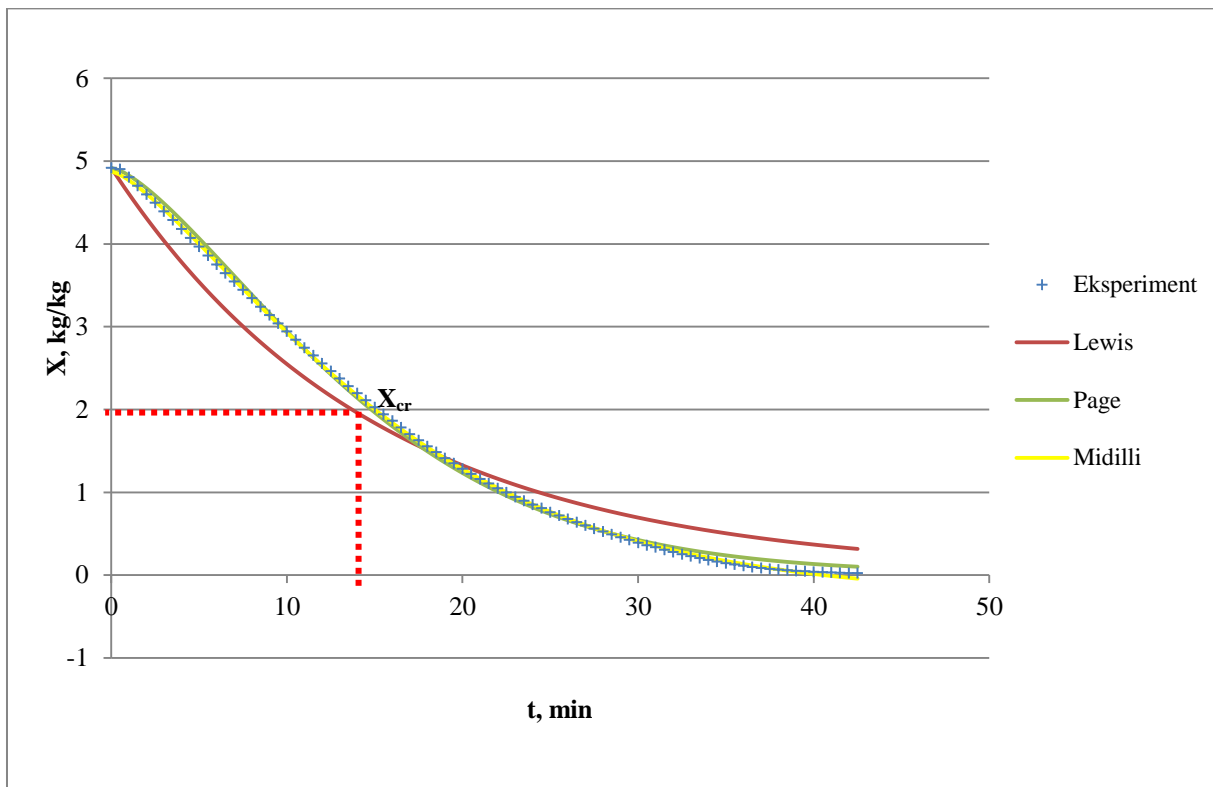
**Slika 84.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka poriluka s vremenom pri 60 °C te primjenjivost Lewis-ovog, Page-ovog i Midilli-Kucuk-ovog modela



**Slika 85.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka poriluka s vremenom pri  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



**Slika 86.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka poriluka s vremenom pri  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela



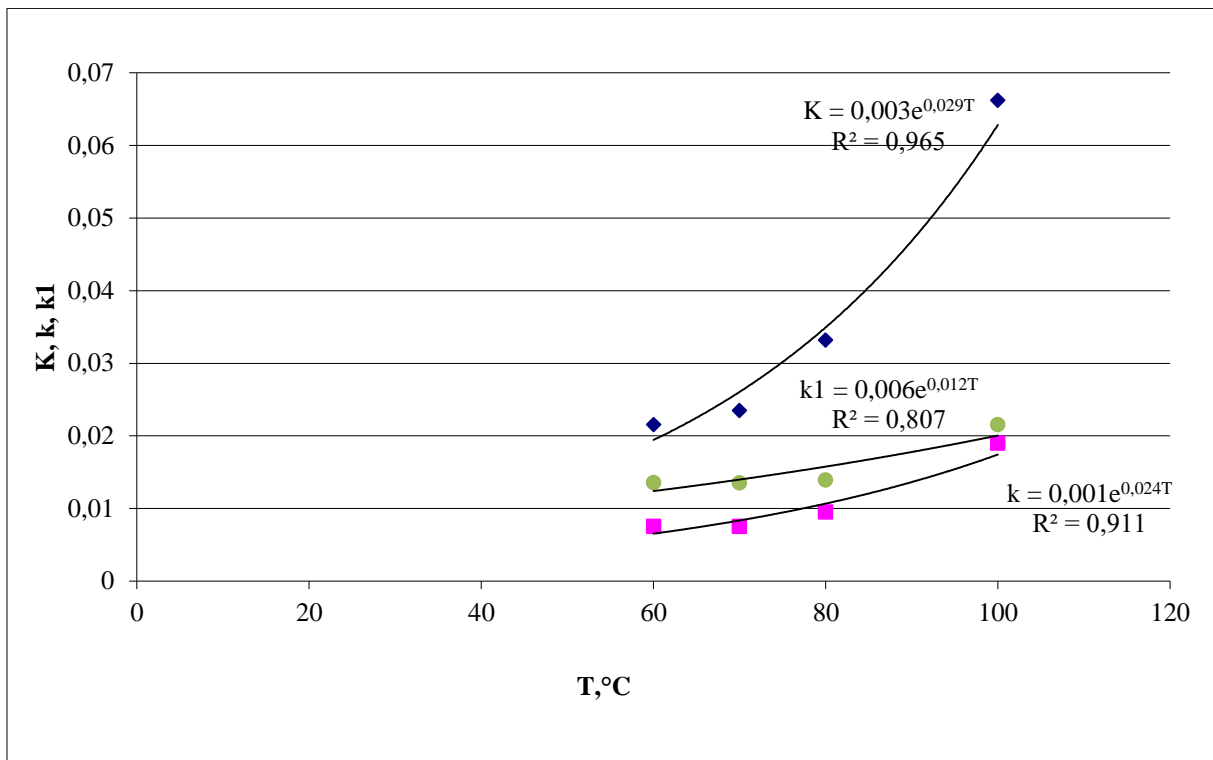
**Slika 87.** Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka poriluka s vremenom pri 100 °C te primjenjivost *Lewis*-ovog, *Page*-ovog i *Midilli-Kucuk*-ovog modela

**Tablica 16.** Ovisnost kritičnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke poriluka

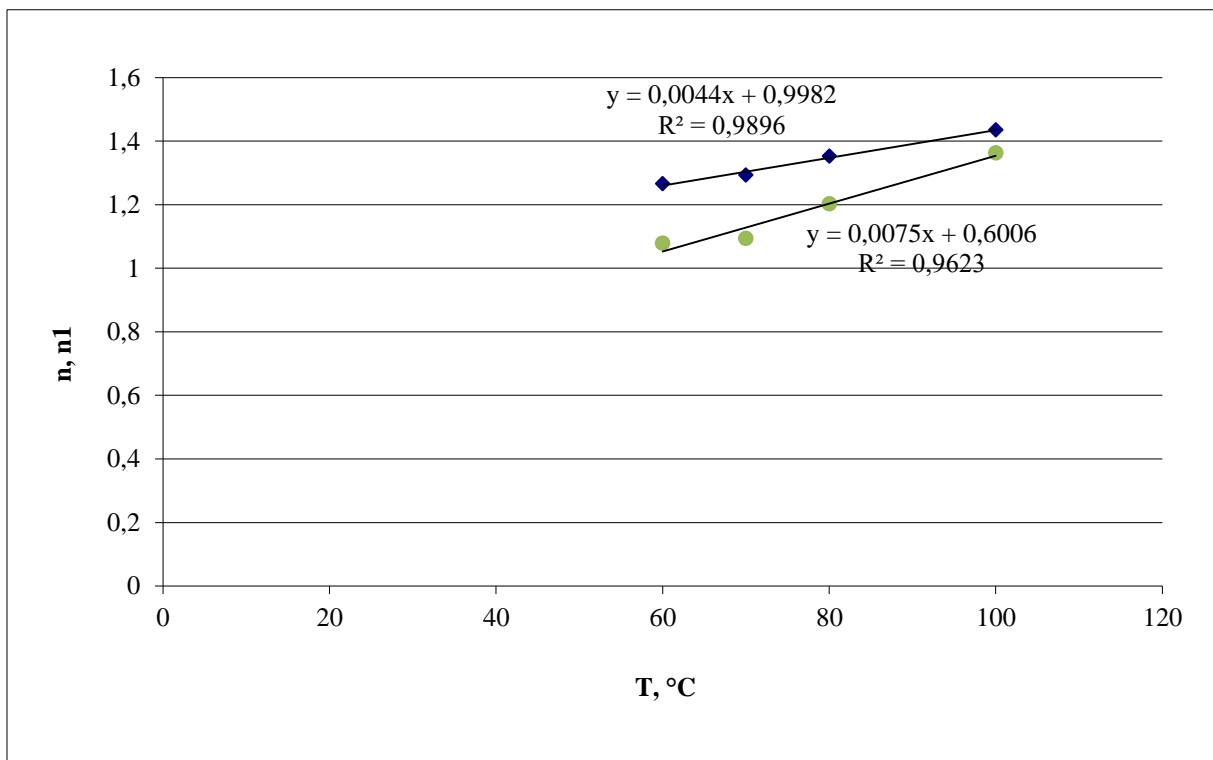
$T, ^\circ C$	60	70	80	100
$X_{cr}, kg/kg$	3,10	4,13	2,94	2,11

**Tablica 17.** Ovisnost parametara *Midilli-Kucuk*-ovog modela o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke poriluka

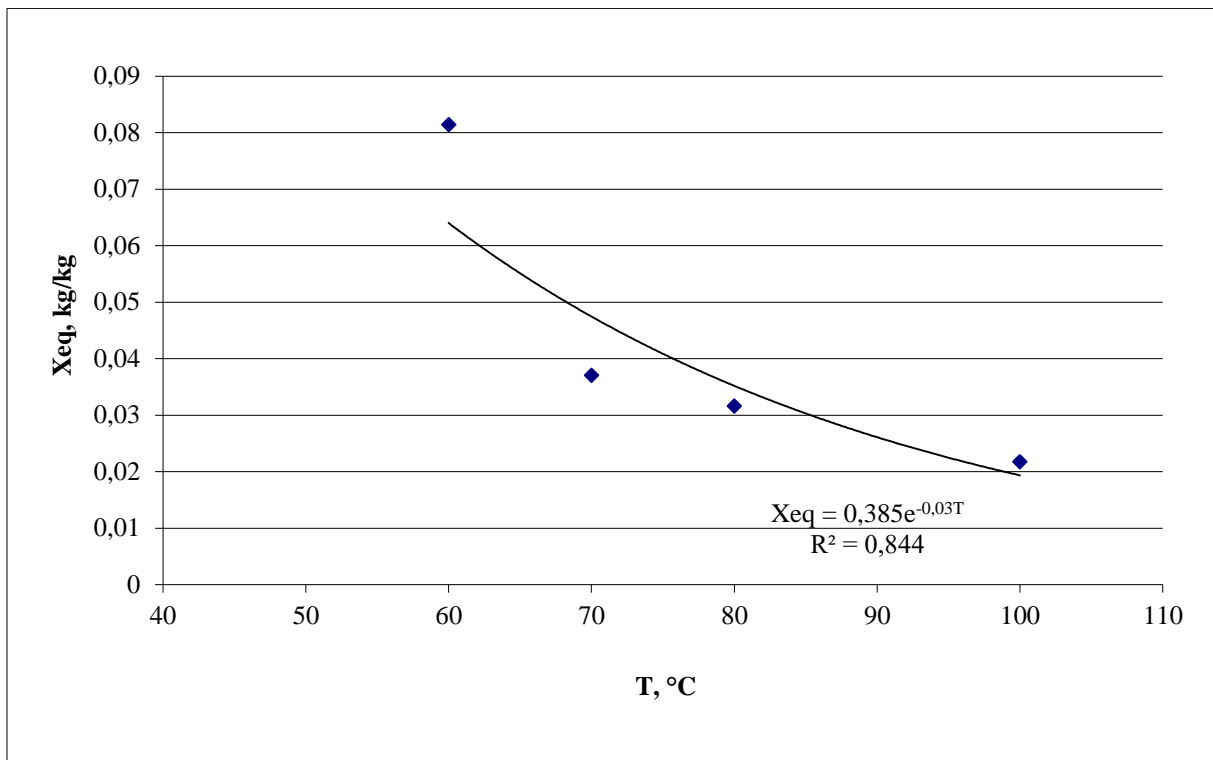
$T, ^\circ C$	$a$	$b$
60	1,010978	-0,00083
70	1,001925	-0,00106
80	0,995371	-0,00109
100	0,991483	-0,00097



**Slika 88.** Grafički prikaz ovisnosti parametara *Lewis*-ovog ( $K$ ), *Page*-ovog ( $k$ ) i *Midilli-Kucuk*-ovog ( $k1$ ) modela o temperaturi  $T$  za uzorke poriluka



**Slika 89.** Grafički prikaz ovisnosti parametra *Page*-ovog modela  $n$  i *Midilli-Kucuk*-ovog  $n1$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke poriluka



**Slika 90.** Grafički prikaz ovisnosti ravnotežnog sadržaja vlage  $X_{eq}$  o temperaturi sušenja  $T$  za uzorke poriluka



**Tablica 18.** Primjenjivost modela

		<i>Lewis</i>	Page	Midilli-Kucuk
		<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>
Celer	$T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,980069	0,998206	0,999554
	$T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,97308	0,998256	0,999582
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,977691	0,999098	0,999676
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,978927	0,999243	0,999659
	Uzorak 1	0,975793	0,998554	0,999853
	Uzorak 2	0,975787	0,998796	0,999914
	Uzorak 3	0,978927	0,999243	0,999659
	Uzorak 4	0,971834	0,998455	0,999897
Mrkva	$T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,991300	0,999506	0,999975
	$T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,993814	0,998924	0,999945
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,986773	0,997335	0,999764
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,989158	0,998834	0,999937
Paprika	$T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,989582	0,998105	0,999948
	$T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,988483	0,997618	0,999747
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,986361	0,997829	0,999583
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,982997	0,997509	0,999523
Korijen peršina	$T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,997321	0,997285	0,999638
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,994103	0,996526	0,999903
	$T= 90\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,995247	0,998843	0,999989
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,988095	0,998270	0,999829
Lišće peršina	$T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,994917	0,997046	0,999824
	$T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,991268	0,998708	0,999842
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,991479	0,998630	0,999741
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,990819	0,998596	0,999559
Poriluk	$T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,989268	0,998169	0,999951
	$T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,987150	0,997376	0,999916
	$T= 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,984371	0,998075	0,999917
	$T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,981032	0,999091	0,999883

**Tablica 19.** Usporedba vremena sušenja uzoraka u konvekcijskom i infracrvenom sušioniku

Uzorak	$W_{vlaga}$ %	Infracrveni sušionik		Konvekcijski sušionik
		$T, ^\circ C$	$t, min$	$t, min$
Celer	6,19	60	134,5	420
		70	97	
		80	78	
		100	38	
Mrkva	11,52	60	266	420
		70	233	
		80	148,5	
		100	95	
Paprika	12,25	60	-	420
		70	-	
		80	-	
		100	48,5	
Korijen persina	5,3	70	335,5	420
		80	197,5	
		90	158	
		100	87	
Lišće persina	8,66	40	-	180
		60	46	
		80	18,5	
		100	11	
Poriluk	9,18	60	117,5	420
		70	104	
		80	72	
		100	36,5	

**Tablica 20.** Geometrijske karakteristike uzoraka

Celer						
	Površina, mm <sup>2</sup>	Perim, mm	Kružnost	Feret, mm	AR	Zaobljenost
mokri	406,618	231,371	0,095	62,523	7,921	0,126
suhi IR	102,599	100,538	0,128	38,710	6,441	0,155
Mrkva						
	Površina, mm <sup>2</sup>	Perim, mm	Kružnost	Feret, mm	AR	Zaobljenost
mokri	1115,724	130,224	0,827	39,298	1,011	0,989
suhi IR	409,993	84,241	0,726	25,987	1,138	0,879
suhi konv.	296,792	168,875	0,131	28,065	1,372	0,729
Paprika						
	Površina, mm <sup>2</sup>	Perim, mm	Kružnost	Feret, mm	AR	Zaobljenost
mokri	141,675	62,036	0,463	22,582	3,264	0,306
suhi IR	76,939	50,133	0,385	20,042	4,280	0,234
suhi konv.	39,250	51,139	0,189	16,500	3,543	0,282
Korijen peršina						
	Površina, mm <sup>2</sup>	Perim, mm	Kružnost	Feret, mm	AR	Zaobljenost
mokri	983,235	137,554	0,659	38,907	1,110	0,902
suhi IR	372,251	81,237	0,709	24,534	1,210	0,826
suhi konv.	613,317	325,123	0,073	34,708	1,141	0,876

## 5 Rasprava

Ispitana je kinetika sušenja različitog povrća (celera, korijena peršina, lišća peršina, mrkve, paprike i poriluka) dobivenog iz ekološke proizvodnje, pri različitim uvjetima provedbe procesa.

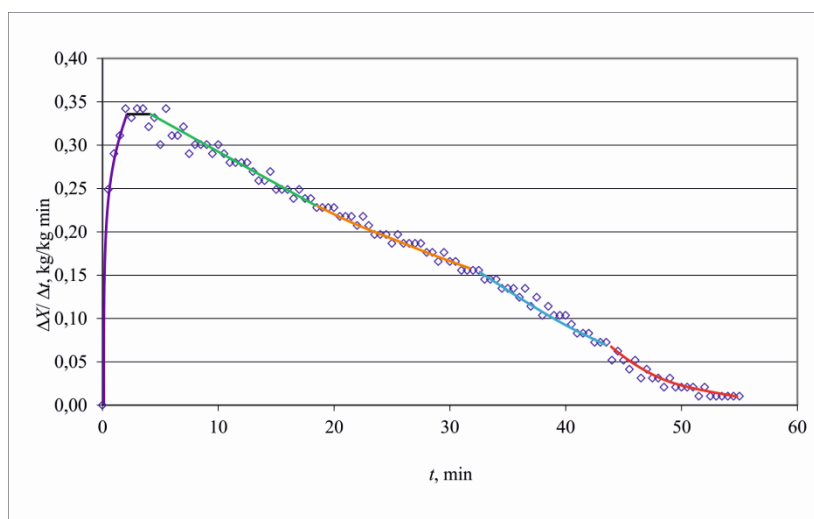
Sušenje je provedeno u infracrvenom sušioniku pri različitim temperaturama i atmosferskom tlaku. Celer, mrkva, paprika i poriluk su sušeni na temperaturama: 60 °C, 70 °C, 80 °C i 100 °C. Lišće peršina je sušeno na temperaturama: 40 °C, 60 °C, 80 °C i 100 °C, a korijen peršina na: 70 °C, 80 °C, 90 °C i 100 °C. Sušenje korijena peršina je provedeno na višim temperaturama od ostalog povrća jer prilikom sušenja na temperaturi  $T= 60$  °C ne ispari sva voda te se ne postigne ravnotežni sadržaj vlage materijala koji je potreban u daljnjem proračunu određivanja kinetičkih krivulja sušenja (slika 91.). U svrhu ispitivanja ovisnosti kinetičkih krivulja sušenja o oplošju uzoraka, četiri uzorka celera različite vrijednosti oplošja su sušeni u infracrvenom sušioniku na temperaturi  $T= 100$  °C i atmosferskom tlaku. Nakon sušenja pri danim temperaturama, uzorak se ponovo suši na temperaturi  $T= 120$  °C kako bi isparila sva vlaga te se odredila masa suhog materijala.



**Slika 91.** Zaostala voda nakon sušenja uzorka korijena peršina na temperaturi  $T= 60$  °C

Na temelju eksperimentalnih podataka promjene mase uzoraka tijekom procesa sušenja, izračunate su vrijednosti sadržaja vlage materijala  $X$ , te su grafički prikazane u ovisnosti o vremenu  $t$  (slike 18., 38., 49., 60., 71., 82.) i u ovisnosti o oplošju  $O$  (slika 25.). Vrijednosti sadržaja vlage dane su u nomiranom obliku zbog lakše usporedbe i zbog malog odstupanja početnog sadržaja vlage među uzorcima. Usporedbom tih krivulja, vidljivo je da se povećanjem temperature, odnosno smanjenjem vrijednosti oplošja smanjuje vrijeme trajanja procesa. Određene su vrijednosti kritičnog sadržaja vlage, odnosno točke u kojima počinje

period padajuće brzine sušenja. To je period u kojemu je površina materijala djelomično suha, a ograničavajući stupanj procesa sušenja je dovođenje vlage iz unutrašnjosti materijala na površinu. Vrijednosti kritičnog sadržaja vlage se smanjuju povišenjem temperature, odnosno povišenjem temperature raste pokretačka sila procesa prijenosa topline i tvari što rezultira većom brzinom prijenosa vlage iz unutrašnjosti na površinu materijala, a time i većom brzinom sušenja i kraćim vremenom trajanja procesa. To je moguće i vidjeti na slikama koje prikazuju ovisnost brzine sušenja  $\Delta X/\Delta t$  o vremenu sušenja (slike 19., 39., 50., 61., 72., 83.). Pri višim temperaturama u kraćem se vremenu postiže maksimalna brzina sušenja, odnosno period stabilizacije je kraći. Vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja smanjuje se s porastom temperature sušenja, tako da je pri najvišoj temperaturi njegovo trajanje gotovo zanemarivo za neke uzorke. Nakon perioda konstantne brzine sušenja, može se uočiti prvi period padajuće brzine sušenja tijekom kojeg je ovisnost brzine sušenja o vremenu linearna u kojemu se prijenos vlage iz unutrašnjosti odvija kapilarnim tokom. Daljnjim sušenjem dolazi do deformacije sušene tvari, pri čemu se djelomično ili potpuno zatvaraju pore kroz koje se prenosila vlaga, što za posljedicu ima promjenu kontrolirajućeg mehanizma prijenosa vlage. Naime kroz pore promjera manjeg od  $10^{-7}$  m vlaga se prenosi difuzijskim mehanizmom. Promjena mehanizma prijenosa vlage tijekom perioda padajuće brzine sušenja vidi se kao promjena ovisnosti brzine sušenja sa linearne na eksponencijalnu.



Slika 93. Periodi sušenja paprike pri 100 °C

Na slici 93. može se uočiti postojanje četiri perioda padajuće brzine sušenja. S obzirom da se radi o prirodnim materijalima sklonim skupljanju i deformaciji tijekom sušenja postojanje više perioda padajuće brzine sušenja je očekivano. Veće brzine sušenja postižu se kod uzoraka manjeg oplošja, odnosno manjeg volumena zbog kraćeg puta prijenosa vlage iz unutrašnjosti

na površinu. Vrijeme sušenja smanjuje se sa smanjenjem dimenzija uzoraka zbog manje mase vode koju uzorak sadrži i manjih unutrašnjih otpora prijenosu tvari.

Eksperimentalno dobivene kinetičke krivulje aproksimirane su *Lewis*-ovim, *Page*-ovim i *Midilli-Kucuk*-ovim modelom (slike 20-23; 29-32; 40-43; 51-54; 62-65; 73-76 i 84-87). Tablica 18. prikazuje indekse korelacije modela za određeni uzorak. Teorijski jednoparametarski *Lewis*-ov model očekivano najviše odstupa od eksperimentalnih vrijednosti sa srednjim indeksom korelacije  $\hat{r} = 0,97208$ . Model se obično uspješno primjenjuje za opis kinetike sušenja materijala čija se struktura tijekom sušenja ne mijenja te kada je kontrolirajući mehanizam prijenosa vlage u periodu padajuće brzine sušenja difuzija. Uočava se da povišenjem temperature sušenja odstupanje raste. Ovisnost *Lewis*-ovog parametra  $K$  o temperaturi sušenja prikazana je slikama 24., 44., 55., 66., 77., i 88., a ovisnost o veličini oplošja uzorka slikom 31. Funkcija koja opisuje ovisnost *Lewis*-ovog parametra  $K$  o temperaturi i oplošju je eksponencijalna. Povišenjem temperature sušenja parametar  $K$  raste, a povećanjem oplošja uzorka on pada. Dvoparametarski *Page*-ov model pokazuje manja odstupanja od eksperimentalnih podataka,  $\hat{r} = 0,996584$ . Manje odstupanje pripisuje se empirijskom parametru  $n$  čija se vrijednost kod svih uzoraka i temperatura kreće od 1,018 i 1,548. Utjecaj temperature i oplošja na vrijednost parametra  $n$  je prikazana slikama 25., 34., 45., 56., 67., 78. i 89. Vrijednost parametara  $n$  ne mijenja se s temperaturom i dimenzijama celera i mrkve, no njegova vrijednost raste s porastom temperature (linearna ovisnost) za ostala povrća. Ovisnost drugog *Page*-ovog parametra  $k$  o temperaturi je prikazana slikama 24., 44., 55., 66., 77., i 88., a ovisnost o veličini oplošja uzorka slikom 31. Uočljiva je eksponencijalna ovisnost parametra  $k$  o temperaturi i oplošju uzorka. Ponaša se kao i *Lewis*-ov parametar  $K$ , odnosno povišenjem temperature sušenja raste, a povećanjem oplošja uzorka pada. Iako *Page*-ov model zadovoljavajuće dobro opisuje kinetiku sušenja ispitivanog povrća, empirijski model *Midilli-Kucuk* daje najviše vrijednosti  $r$  za sva povrća i pri svim procesnim uvjetima te je njegov srednji indeks korelacije  $\hat{r} = 0,999587$ . Taj model puno bolje opisuje područje perioda padajuće brzine sušenja i postizanja ravnotežnog sadržaja vlage. Sastoji se od 4 parametra čije su ovisnosti o uvjetima procesa sušenja dane tablično ( $a$  i  $b$ ; tablica 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17.) i grafički ( $kl$  i  $nI$ ). Vrijednosti parametra  $a$  za sve uzorke kreće oko 1 i može se reći da ne ovisi o uvjetima sušenja i vrsti materijala koji se suši. Parametar  $b$  ne prikazuje nikakvu funkcijsku ovisnost o procesnim uvjetima temperaturi i oplošju. *Midilli-Kucuk*-ov parametar  $kl$  je eksponencijalno ovisan o temperaturi i oplošju, te kao *Lewis*-ov  $K$  i *Page*-ov  $k$  raste sa uvjetima koji ubrzavaju proces sušenja, a pada sa uvjetima koji ga

uspoređuju. Parametar  $nI$  mijenja se s temperaturom i dimenzijama uzoraka na isti način kao i Page-ov parametar  $n$ .

U ovom su radu uzorci sušeni do postizanja ravnotežnog sadržaja vlage. Ravnotežni sadržaj vlage je u pravilu niži kod sušenja na većim temperaturama zbog veće pokretačke sile prijenosa tvari. Osim toga, relativna vlažnost zraka zagrijanog na veću temperaturu je manja pa je veća i pokretačka sila za proces prijenosa tvari. Ovisnost ravnotežnog sadržaja vlage o temperaturi sušenja i oplošju uzorka je eksponencijalna.

Na kraju su uspoređeni uzorci sušeni u komercijalnom konvekcijskom sušioniku i infracrvenom sušioniku. Iz priloženih slika uzoraka (16-17., 36-37., 47-48., 58-59., 69-70., 80-81.) uočavamo da sušenjem u infracrvenom sušioniku na temperaturi  $T= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  dolazi do znatnih deformacija i promjene boje uzoraka, odnosno dolazi do termičkog uništavanja površine. Uzorci sušeni u infracrvenom sušioniku na nižim temperaturama oblikom i bojom odgovaraju uzorcima sušenima u komercijalnom konvekcijskom sušioniku. U tablici 19. su uspoređena vremena trajanja procesa sušenja u infracrvenom i konvekcijskom sušioniku za postizanje potrebnog konačnog sadržaja vlage materijala. Vrijeme sušenja u infracrvenom sušioniku je znatno kraće (do 16x kod lišća peršina na temperaturi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ali na nižim temperaturama kod paprike ( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i lišća peršina ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nije postignut traženi sadržaj vlage, odnosno ravnotežni je sadržaj vlage veći od potrebnog. Osim s obzirom na vrijeme trajanja procesa uzorci su uspoređeni i s obzirom na geometrijske odnosno morfološke karakteristike uzoraka prije i nakon sušenja. U tu svrhu korišten je program za analizu slika (ImageJ). Deformacija uzorka potvrđena je svim procijenjenim parametrima. Tijekom sušenja dolazi do smanjenja dimenzija uzoraka što se vidi iz manjih vrijednosti površine, opsega i Feretovog promjera uzoraka. Uzorcima kružnog poprečnog presijeka vrijednost AR ne mijenja se u velikoj mjeri.

## 6 Zaključak

U radu je istražena kinetika sušenja različitog povrća u infracrvenom sušioniku. Istražen je utjecaj temperature i veličine uzoraka pri čemu su dobiveni rezultati korelirani Lewis-ovim, Page-ovim i Midilli-Kucuk-ovim matematičkim modelom. Provedena je usporedba vremena trajanja procesa sušenja u infracrvenom i konvekcijskom sušioniku te su uspoređeni oblici i boje osušenih uzoraka. Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Brzina sušenja veća je pri višim temperaturama zbog veće pokretačke sile procesa prijenosa topline i tvari te manjih odgovarajućih otpora.
- Manji uzorci odnosno uzorci manje vrijednosti oplošja se osuše većom brzinom u kraćem vremenu.
- Eksperimentalni podaci opisani su uz visok stupanj korelacije Lewis-ovim, Page-ovim i Midilli-Kucuk-ovim modelom. Najviši stupanj korelacije postiže Midilli-Kucuk-ov model, a najniži Lewis-ov. Vrijednosti parametara modela  $K$ ,  $k$  i  $k_1$  rastu s porastom temperature, a smanjuju se porastom veličine uzorka.
- Sušenjem u infracrvenom sušioniku na temperaturi 100 °C dolazi do znatnih deformacija i promjene boje uzoraka, odnosno dolazi do termičkog uništavanja površine. Uzorci sušeni u infracrvenom sušioniku na nižim temperaturama oblikom i bojom odgovaraju uzorcima sušenima u komercijalnom konvekcijskom sušioniku.
- Vrijeme trajanja procesa sušenja u infracrvenom sušioniku je znatno kraće nego u konvekcijskom sušioniku.
- Sušenjem se smanjuju dimenzije uzoraka, odnosno dolazi do njihovog skupljanja i deformacije što za posljedicu ima promjenu mehanizma prijenosa tvari iz unutrašnjosti materijala na njegovu površinu. Promjena mehanizma prijenosa se očituje kao postojanje više perioda padajuće brzine sušenja. U linearnim periodima je prisutan kapilarni prijenos vlage, a u eksponencijalnim difuzijski prijenos vlage.



## 7 Popis simbola

$A$	površina, $m^2$
$AR$	omjer dviju okomitih dimenzija uzorka
$a$	parametar <i>Midilli-Kucuk</i> -ovog modela, -
$b$	parametar <i>Midilli-Kucuk</i> -ovog modela, -
$D$	duljina, m
$D_{ef}$	efektivni koeficijent difuzije, $m^2/s$
$d_p$	promjer pora vlažnog materijala, m
$IR$	infracrveno elektromagnetsko zračenje
$K$	parametar <i>Lewis</i> -ovog modela, -
$k$	parametar <i>Page</i> -ovog modela, -
$k1$	parametar <i>Midilli-Kucuk</i> -ovog modela, -
$m_{sm}$	masa suhog materijala, kg
$m_v$	masa vlage, kg
$m_{vm}$	masa vlažnog materijala, kg
$n$	parametar <i>Page</i> -ovog modela, -
$n1$	parametar <i>Midilli-Kucuk</i> -ovog modela, -
$O$	oplošje, $m^2$
$Q$	brzina prijenosa topline, W
$r$	indeks korelacije, -
$\hat{r}$	srednji indeks korelacije, -
$\check{S}$	širina, m
$T$	temperatura, K
$T_{MT}$	temperatura mokrog termometra, K
$T_s$	temperatura unutrašnjsti vlažnog materijala, K

$T_p$	temperatura površine vlažnog materijala, K
$T_z$	temperatura zraka, K
$t$	vrijeme, s
$V$	visina, m
$w_{vlaga}$	maseni udio vode u uzorku, %
$X$	sadržaj vlage materijala, $kg_v/kg_{sm}$
$X_{eq}$	ravnotežni sadržaj vlage materijala, $kg_v/kg_{sm}$
$X_{cr}$	kritični sadržaj vlage materijala, $kg_v/kg_{sm}$
$x_{max}$	maksimalni promjer čestice, m
$x_{min}$	minimalni promjer čestice, m
$Y$	apsolutna vlažnost, $kg_v/kg_{sz}$

### Grčka slova

$\alpha$	faktor refleksije svjetlosti, -
$\rho$	faktor apsorpcije svjetlosti, -
$\tau$	faktor transmisije svjetlosti, -
$\varphi$	relativna vlažnost zraka, -
$\psi$	normirani sadržaj vlage, -

### Indeksi

$cr$	kritično
$eq$	ravnotežno
$p$	površina
$s$	sredina
$sm$	suhi materijal
$sz$	suhi zrak
$v$	voda
$vm$	vlažni materijal
$z$	zrak

## 8 Literatura

1. Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49852> (pristup 14. lipnja 2017.)
2. H. P. Schuchmann, H. Schuchmann, Lebensmittelverfahrenstechnik- Rohstoffe, Prozesse, Produkte, Wiley-VCH Verlag, 2005., Str. 74-77.
3. Ž. Lambaša – Belak, Tehnologija hrane, Visoka škola za turistički menadžment u Šibeniku, 2006., Str. 11-29.
4. A.S.Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Third Edition, CRC Press, 2006., Str. 606-609.
5. I. T. Togrul, D. Pehlivan, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, Journal of Food Engineering 65, 2004., Str. 413–425.
6. T. Lovrić, Procesi u prehrambenoj industriji, HINUS, Zagreb, 2003., Str. 196-199.
7. H. G. Maier, Lebensmittel und Umweltanalytik, Methoden und Anwendungen, Steinkopff Verlag, Heidelberg, 1990., Str. 18-20.
8. C.J.Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, 3rd Edition, Prentice Hall, Boston, 1993., Str. 520-524, 536-565.
9. Don W. Green, R. Perry, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th Edition, McGraw-Hill, 2008., 5-58.
10. E. K. Akpınar, Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits, Journal of Food Engineering 73, 2006, Str. 75–84.
11. E. Akhondi, A. Kazemi, V. Maghsoodi, Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer, Scientia Iranica Volume 18, Issue 6, 2011, Str. 1397-1401.
12. A. Midilli, H. Kucuk, Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, Energy Conversion and Management Volume 44, Issue 7, 2003, Str. 1111-1122.
13. K. Kröll, Trocknungstechnik Zweiter Band- Trockner und Trocknungsverfahren, Springer Verlag, 1978., Str. 393-394.

14. D. Nowak, P. P. Lewicki, Infrared drying of apple slices, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5, 2004., Str. 353– 360.
15. H. G. Merkus, *Particle Size Measurements-Fundamentals, Practice, Quality*, Springer Netherlands, 2009., Str. 12-34.

## 9 Životopis

Osobni podaci:

Ime: Mihael

Prezime: Antonije Koščak

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Obrazovanje:

Od 09/2015	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Diplomski studij- Kemijsko inženjerstvo Modul- Kemijske tehnologije i proizvodi
07/2011- 07/2015	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Preddiplomski studij- Kemijsko inženjerstvo
07/2007- 05/2011	Prva gimnazija Varaždin -završeno odličnim uspjehom
09/1999- 06/2007	II. Osnovna škola Varaždin

Stručna praksa:

08/2013- 09/2013

Kemijski tehničar u laboratoriju pročišćivača otpadne vode  
Motičnjak- Varkom d.d., odjel RJ Kanalizacija

01/2015- 04/2015

BZ- ATS Aggregate Wasserkreislauf, BZ- Antriebstrang  
Verifikation und Prueffeld- Daimler AG, Daimel Research &  
Development Nabern

Nagrade:

Osvojio dekanovu nagradu za rad „Od sirovine do biodizela”

Osvojio 1. mjesto na 20. međunarodnoj Tehnologijadi u Rovinju

“Primjena eutektičkih smjesa u proizvodnji biodizela”

Kongresi:

Sudjelovao na XI. Susret mladih kemijskih inženjera u Zagrebu