



UNIVERZITET U NOVOM SADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET



Mr Marina Karić, dipl. ing. maš.

ISTRAŽIVANJE NOVIH MODELA SIMULACIJE PROCESA KONZERVIRANJA VOĆA SUŠENJEM

- Doktorska disertacija -

Novi Sad, 2014.

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
POLJOPRIVREDNI FAKULTET

Ključna dokumentacijska informacija

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	mr Marina Karić
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	dr Miladin Brkić, red. profesor Poljoprivredni fakultet, Novi Sad
Naslov rada: NR	Istraživanje novih modela simulacije procesa konzerviranja voća sušenjem
Jezik publikacije: JP	srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	srpski/engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	Vojvodina
Godina: GO	2014
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Departman za poljoprivrednu tehniku
Fizički opis rada: FO	8 poglavlja/ 188 strana/ 32 tabele/ 78 slika/ 142 navoda literature
Naučna oblast: NO	Poljoprivredna tehnika – Termotehnika i procesna tehnika
Naučna disciplina: ND	Toplotne operacije (sušenje)
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Ključne reči: jabuka, kondenzaciono sušenje, kinetika sušenja, matematički model, planiranje eksperimenta, analiza varijanse, statistička analiza, uticajni faktori, funkcija cilja

UDK	631.563:634.1(043.3)
Čuva se: ČU	Biblioteka poljoprivrednog fakulteta, Novi Sad
Važna napomena: VN	nema
Izvod: IZ	<p>U radu se na osnovu eksperimentalnih podataka analizira konvektivno sušenje jedne sorte jabuke u laboratorijskoj šaržnoj kondenzacionoj sušari vlastite konstrukcije. Istražuju se uticaj procesnih parametara na kinetiku sušenja i kvalitet sušenih proizvoda. U tu svrhu izabrana je široko rasprostranjena sorta „crveni delišes“, rezana na kolutove, početne relativne vlage oko 87% sušena na konačnu oko 7,5 - 8,5 %.</p> <p>Relevantnost pojedinih faktora i njihov uticaj na vreme trajanja procesa i parametre kvaliteta sušenih proizvoda određivani su metodom planiranog eksperimenta.</p> <p>Cilj primene procedure faktorskih planova eksperimenta je dobijanje matematičkih modela i grafičkih prikaza uticaja procesnih parametara na promenu merenog svojstva.</p> <p>Temperatura vazduha menjala se od 40 do 60⁰C, uz brzinu strujanja od 1 do 2 m/s i relativnu vlažnost vazduha od 55 do 75%. Utvrđene su krive kinetike sušenja a kvalitet sušenih jabuka ispitan je instrumentalnom analizom i ocenom potrošača o prihvatljivosti proizvoda. Dobijeni su sušeni proizvodi visokog kvaliteta. Regresionom analizom eksperimentalnih podataka dobijeni su matematički modeli koji opisuju zavisnost izlaznih veličina od procesnih parametara koji definišu režim sušenja. Izlazne veličine koje se prate (odzivi) i označavaju stanje sistema su: vreme trajanja procesa sušenja, sadržaj ukupnih kiselina izražene kao jabučna i sadržaj ukupnih šećera.</p> <p>Na osnovu matematičkog modela provešće se detaljna parametarska analiza istraživanog procesa, uticaj pojedine ulazne veličine na sam proces i omogućiti predviđanje svojstava sušenog proizvoda u različitim kombinacijama procesnih parametara.</p> <p>Rezultati istraživanja potvrđuju da se povećanjem temperature i smanjenjem relativne vlažnosti agensa sušenja (vazduha) značajno smanjuje vreme procesa sušenja kolutova jabuke. Na sadržaj ukupnih kiselina dobijen je značajan uticaj brzine strujanja vazduha, interakcije brzine strujanja i temperature, temperature i relativne vlažnosti vazduha.</p> <p>Očekujemo da će rezultati ovih istraživanja proizvesti dovoljno dobre matematičke modele za dobijanje kvalitetnih sušenih proizvoda koji će se moći primeniti kao osnova za optimizaciju i upravljanje procesima sušenja u poluindustrijskim i industrijskim razmerama.</p> <p>Značaj predloženog istraživanja je, uz očekivani naučni doprinos, dobijanje sušenih proizvoda ciljanih svojstava, uvažavajući kriterijum očuvanja kvaliteta, očuvanja energije i zaštite okoline.</p>
Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP	16. 05. 2008.
Datum odbrane: DO	

<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p>predsednik: dr Todor Janić, vanredni profesor n. o. Poljoprivredna tehnika Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <p>_____</p> <p>član: dr Miladin Brkić, redovni profesor, mentor n.o. Poljoprivredna tehnika Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <p>_____</p> <p>član: dr Damir Đaković, docent n. o. Procesna tehnika Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad</p> <p>_____</p>
---	---

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF AGRICULTURE**

Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD thesis
Author: AU	Marina Karić, MSc
Mentor: MN	Miladin Brkić, PhD, full professor Faculty of Agriculture, Novi Sad
Title: TI	Research on new models for simulating the process of fruit conservation by drying
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	Serbian/English
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2014
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Faculty of Agriculture, Trg D. Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Department of Agricultural Engineering
Physical description: PD	8 chapters and attachment/188 pages/ 32 tables / 78 figures/142 references
Scientific field SF	Agricultural technique- Thermal engineering and process engineering
Scientific discipline SD	Heat operations (drying)
Subject, Key words SKW	Key words: apple, condensation drying, drying kinetics, mathematical model, experiment planning, variance analysis, statistic analysis, influential factors, objective function
UDC	631.563:634.1(043.3)
Holding data: HD	Library of the Faculty of Agriculture, Novi Sad

Note: N	/
Abstract: AB	<p>The thesis analyzes, on the basis of experimental data, convective drying of a sort of apple in a laboratory batch condensation drying plant designed especially for the laboratory researches. The influence of process parameters on drying kinetics and quality of dried products is examined. For this purpose a widespread sort of apple called „Red Delicious“ is chosen. It is cut into slices with the starting and final moisture being about 87% and 7,5-8,5%, respectively.</p> <p>The relevance of certain factors and their effect on the duration of the process and parameters of the quality of dried products is determined by the method of planned experiment.</p> <p>The procedure of factor plans of the experiment is applied in order to obtain mathematical models and graphical illustrations of the influences of process parameters on the change of measured characteristic.</p> <p>Air temperature varies from 40 to 60°C, while the flow speed is from 1 to 2 m/s and relative moisture of air is in the range from 55 to 75%. The curves of drying speed are identified and the quality of dried apples is tested by instrumental analysis and consumers' evaluation on the product acceptability. The obtained dried products are of high quality. Regression analysis of experimental data results in mathematical models describing dependence of output values on process parameters which define drying mode. Output values (responses) which are monitored and which represent the state of the system are: duration of drying process, content of total acids expressed as malic acid and content of total sugars.</p> <p>On the basis of mathematical model, a detailed parameter analysis of the process is carried out as well as the influence of individual input value on the process itself and it will provide the prediction of characteristics of dried products in various combinations of process parameters.</p> <p>Research results confirm that the increase of temperature and decrease of relative moisture of drying agents (air) significantly reduce the process of drying apple slices. The content of total acids is significantly influenced by the speeds of air flow, interaction of flow speed and temperature, temperature and relative air moisture.</p> <p>The results of the research work are expected to produce mathematical models which are good enough to achieve high quality dried products which can be applied as a basis for optimization and control of drying processes in semi-industrial and industrial scopes.</p> <p>In addition to expected scientific achievement, the presented research is significant for obtaining dried products having defined qualities with regard to criteria of quality preservation, energy conservation and environment protection.</p>
Accepted on Scientific Board on: AS	16. 08. 2008.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>president: Todor Janić, PhD, associate professor Scientific field – Agricultural Engineering Faculty of Agriculture, Novi Sad</p> <p>member : Miladin Brkić, PhD, full professor, mentor Scientific field – Agricultural Engineering Faculty of Agriculture, Novi Sad</p> <p>member: Damir Đaković, assistant professor Scientific field – Process Engineering Faculty of Engineering, Novi Sad</p>

ZHVALNOST

Izgradnja simulacionog modela je dug i zahtevan posao i zahteva rad tima stručnjaka, onih kojima je posmatrani sistem predmet proučavanja i stručnjaka informatičara. Zahvalnost za pomoć u izradi ovog rada i svemu što je njemu prethodilo upućujem mnogim osobama. Prijatna mi je dužnost zahvaliti se svima, koji su mi na bilo koji način pomogli u izradi ovog rada. Ovom se prilikom želim posebno zahvaliti:

- Mentoru prof. dr Miladinu Brkiću, iskrene zahvale na ukazanom poverenju i strpljenju, koji je svojim stručnim znanjem i brojnim naučno – stručnim savetima kroz sve ove godine, omogućio realizaciju ovog rada
 - Članovima komisije prof. dr Todoru Janiću i prof. dr Damiru Đakoviću za dobronamerne i konstruktivne savete tokom izrade rada
 - mr Zdravku Gračneru, dipl. maš. inž. za izuzetan trud i veliki doprinos izradi rada u svim fazama, posebno je zaslužan za izradu „pilot“ postrojenja na kome su izvedena eksperimentalna istraživanja, pa mu se ovom prilikom najlepše zahvaljujem
 - Vasi Nedeljkoviću, dipl. maš. inž. na angažovanju pri izradi tehničke dokumentacije komore
 - Pokojnom profesoru dr Petru Ivanoviću na predloženoj temi i brojnim savetima prilikom pisanja prijave teme doktorskog rada
 - Preduzeću „MAG Đorđević“ za uslugu izrade komore laboratorijske sušare u trajanju od 300 radnih sati
 - Predragu Dašiću, dipl. maš. inž. na brojnim savetima i pomoći prilikom planiranja eksperimenta, statističke obrade rezultata merenja i načinu prezentacije rezultata
 - Zavodu za javno zdravlje u Kruševcu, odeljenju za sanitarnu hemiju, na obavljenim hemijskim i senzorskim analizama sušenih jabuka
 - Preduzeću za pružanje laboratorijskih usluga „ALFA LAB“ Aleksandrovac na obavljenim fizičko hemijskim analizama svežih jabuka
 - Predragu Ivoviću za nesebičan trud uložen u tehničkom oblikovanju teksta, grafičkih prikaza i slika
 - školi – direktoru i šefu računovodstva na finansijskoj potpori
 - roditeljima na podršci i pomoći od prvih početaka mog obrazovanja do danas
- Posebno zahvaljujem članovima moje porodice
- Veliko hvala mojoj porodici:
 - suprugu Ljubiši na razumevanju, strpljenju, toleranciji, konkretnoj pomoći i podršci tokom dugog i vrlo zahtevnog perioda posvećenosti izradi doktorskog rada i
 - deci Dušanu i Anici, koja su imala razumevanja za ovu vrstu moje aktivnosti tokom proteklog perioda, koja svemu ovome daju smisao
 - Zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima koji su svojim mišljenjem, sugestijama i kritikama uticali na izradu rada.

Najiskrenije se zahvaljujem svima!

SADRŽAJ

PREDGOVOR	
POPIS OZNAKA I SKRAĆENICA	
POPIS SLIKA	
POPIS TABELA	
1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	5
2.1. METODE KONZERVISANJA VOĆA ODUZIMANJEM VODE – SUŠENJEM	5
2.1.1. Teorijske osnove procesa sušenja	5
2.1.2. Primena tehničkog sušenja	7
2.1.2.1. Postupci tehničkog sušenja materijala	8
2.1.2.2. Konvektivno sušenje materijala	13
2.1.3. Vlažan materijal	14
2.1.3.1. Oblici veze vlage sa suvim materijalom	16
2.1.4. Vlažan vazduh	17
2.1.5. Prenos toplote i materije	22
2.1.5.1. Prenos toplote i mase vlage u unutrašnjosti vlažnog materijala	22
2.1.5.2. Prenos toplote i mase vlage sa granične površine materijala i radnog medijuma	25
2.1.6. Statika procesa sušenja	27
2.1.7. Kinetika procesa sušenja	31
2.1.8. Vrste uređaja za konvektivno sušenje	36
2.1.9. Termički proračun uređaja za konvektivno sušenje – bilans mase i energije	41
2.1.10. Promene izazvane sušenjem	43
2.1.11. Sušeno voće	45
2.2. PREGLED REZULTATA ISTRAŽIVANJA VOĆA	46
2.3. STATISTIČKA ANALIZA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA - MODELIRANJE	55
2.3.1. POJAM I ZNAČAJ MODELIRANJA	55
2.3.1.1. Klasifikacija matematičkih modela	59
2.3.1.2. Uvod u eksperimentalnu identifikaciju sistema	63
2.3.1.3. Eksperiment kao objekat naučnog istraživanja	65
2.3.1.2. Statističko planiranje eksperimenta	69
2.3.1.4. Izbor uticajnih faktora i odziva	69
2.3.1.5. Plan eksperimenta	70
2.3.1.5. Faktorski plan	71
2.3.2. STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA I STATISTIČKI TESTOVI	78
2.3.2.1. Regresijska i korelaciona analiza	78
2.3.2.2. Model višestruke (multiple) regresije	82
2.3.2.3. Multivarijantna statistička analiza regresijskog modela	83
2.3.2.4. Inferencijalno statistička analiza – procena parametara i testiranje hipoteza o parametrima	83
2.3.2.5. Procena parametara	83
2.3.3. OCENA REPREZENTATIVNOSTI MODELA – VALIDACIJA	87
2.3.3.1. Analiza varijanse u modelu višestruke linearne regresije	88
2.3.3.2. Testovi značajnosti regresijskog modela	91

3. CILJ ISTRAŽIVANJA.....	94
3.1. HIPOTEZE RADA.....	95
4. MATERIJAL I METOD RADA.....	97
4.1. Materijal korišćen u radu.....	97
4.1.1. Jabuka kao predmet sušenja.....	101
4.1.2. Mehanička i hemijska analiza plodova jabuke.....	102
4.1.3. Priprema uzoraka jabuke za sušenje.....	105
4.2. Eksperimentalni deo.....	106
4.2.1. TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA.....	106
4.2.1.1. Pneumatski podsistem za stvaranje vakuuma (vakumiranje komore).....	110
4.2.1.2. Podsistem za odvlaživanje vazduha.....	114
4.2.1.3. Princip rada kondenzacijskog agregata – kompresijske toplotne pumpe.....	116
4.2.2.3. Uređaji za merenje i regulaciju (memo regulaciona oprema).....	121
4.3. METOD RADA.....	126
4.3.1. METODOLOGIJA KORIŠĆENA ZA IZRADU I VREDNOVANJE MATEMATIČKOG MODELA.....	126
4.3.1.1. Eksperimentalno istraživanje procesa sušenja.....	127
4.3.1.2. Postupak sušenja.....	129
4.3.2. UTICAJNI FAKTORI, FAKTORSKI NIVOI I PLAN IZVOĐENJA EKSPERIMENTA.....	133
4.3.2.1. Promenljivi parametri.....	135
4.3.2.2. Konstantni parametri.....	136
4.3.2.3. Opis kriterijskih varijabli.....	136
4.3.2.4. Izbor strukture modela.....	138
4.3.2.5. Plan izvođenja eksperimenta.....	141
4.3.2.6. Generisanje matrice eksperimenta sušenja.....	143
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA.....	146
5.1. MODELI KRIVIH Kinetike sušenja analizirane sorte jabuka.....	146
5.1.1. UTICAJ TEMPERATURE SUŠENJA NA KINETIKU SUŠENJA.....	148
5.1.2. UTICAJ BRZINE STRUJANJA NA KINETIKU SUŠENJA.....	152
5.1.3. UTICAJ RELATIVNE VLAŽNOSTI VAZDUHA NA KINETIKU SUŠENJA.....	155
5.2. Razvoj i provera modela Višestruke regresije.....	159
5.2.1. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA OPISIVANJE UTICAJA PROCESNIH PARAMETARA NA VREME TRAJANJA PROCESA SUŠENJA.....	161
5.2.2. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA OPISIVANJE UTICAJA PROCESNIH PARAMETARA NA SADRŽAJ UKUPNIH KISELINA.....	168
6. ZAKLJUČAK.....	175
7. LITERATURA.....	180
8. PRILOG.....	189
8.1. PRILOG 1. Sklopni crteži laboratorijske eksperimentalne sušare.....	189
8.2. PRILOG 2. Rezultati fizičko-hemijske analize sveže jabuke sorte „crveni delišes“.....	193
8.3. PRILOG 3. Izveštaji o ispitivanju sušenih plodova jabuke sorte „crveni delišes“.....	195
KRATKA STRUČNA BIOGRAFIJA.....	206

PREDGOVOR

Proizvodnja poljoprivredno - prehrambenih proizvoda (voća i povrća) u dovoljnim količinama, nameće važan zadatak a to je očuvanje proizvedene hrane. Usled nestabilnih uslova na tržištu poljoprivrednih proizvoda, proizvođači su često prinuđeni prodati ih po vrlo niskoj ceni. Uzrok tome je što se nakon dozrevanja, većina poljoprivrednih proizvoda može u okolnim uslovima očuvati samo kraći vremenski period, nakon čega dolazi do biološke degradacije. Procenjuje se da gubici u toku čuvanja i transporta prehrambenih proizvoda dostižu vrednost od 5-25% u razvijenim zemljama. Kod zemalja u razvoju taj procenat gubitaka je veći 25-50%, a u nerazvijenim zemljama taj procenat se kreće i do 75% za neke specifične kulture koje se skladište u skromnim uslovima. Za razliku od svežeg voća i povrća koje se mora prodati odmah, osušeni proizvodi se mogu uskladištiti i prodati onda kada su za to na tržištu najpovoljniji uslovi. Iz tog razloga su se povećale potrebe za kapacitetima prerade i konzerviranja istih. Otpor konzumenata raste prema hemijski konzerviranim prehrambenim proizvodima a sve više raste interes za visoko kvalitetnim dehidriranim proizvodima.

Sušenje različitih vrsta poljoprivrednih proizvoda je najstarija tehnologija konzervisanja i čuvanja hrane. Konzervisanje hrane sušenjem i stvaranje neophodnih zaliha za ishranu stalno se povećavalo, zato se i tehnologija sušenja usavršavala. U primeni je veliki broj različitih vrsta uređaja za sušenje od onih najjednostavnijih (pušnica) do savremenih kontinuiranih sa beskrajnom trakom za industrijsku primenu i automatskom regulacijom celokupnog procesa sušenja. Sušenje je složen nelinearan termodinamički proces u koji su uključeni prenos mase, energije i informacija. Razvoj tehnika matematičkog modeliranja i predviđanje promenljivosti složenih procesa dostiglo je poslednjih godina zavidan nivo. Pri tome je presudnu ulogu odigrala primena računara i odgovarajućih programa. Matematičko modeliranje i računarska simulacija procesa sušenja postali su neophodan alat za simulaciju, razumevanje, optimiranje i kontrolu, kako postojećih tako i novih procesa .

Prateći naučnu i stručnu literaturu, uočeni su brojni pokušaji, da se poboljša energetska efikasnost procesa sušenja i kvalitet sušenog proizvoda. Za analizu je odabran konkretan slučaj – istraživanja vezana za metodu konvektivnog sušenja poljoprivrednih proizvoda na laboratorijskoj sušari vlastite konstrukcije.

Tema ovog rada proistekla je iz autorovog višegodišnjeg bavljenja nastavnim delatnošću u oblasti termodinamike, grejne i rashladne tehnike i projektovanja procesne

opreme na Visokoj mašinsko-tehničkoj školi u Trsteniku. Tema disertacije je sintetizovala sva područja autorovog interesa.

U izradi rada cilj je bio postaviti matematički model objekta modeliranja – laboratorijske konvektivno-kondenzacione sušare, verifikovati model uporedivši rezultate simulacije s postojećim eksperimentalnim rezultatima i kasnije ekstrapolirati rezultate u poluindustrijske i industrijske razmere.

Doktorska disertacija ISTRAŽIVANJE NOVIH MODELA SIMULACIJE PROCESA KONZERVIRANJA VOĆA SUŠENJEM biće struktuirana u osam poglavlja. U skladu sa ciljem:

U prvom, uvodnom, delu rada izneta je teza, razmotren je teorijski okvir rada, obrazložena je motivacija za istraživački rad, ukazana je važnost teme, opisan je predmet rada, cilj istraživanja i svrha rada. Ovaj deo je od posebne važnosti za celokupno statističko istraživanje. Pre nego što se krene na prikupljanje podataka treba jasno i precizno definisati šta se želi postići statističkim istraživanjem, u suprotnom je moguće uzalud prikupljati veliki broj podataka koje nije moguće podvrgnuti statističkoj analizi i interpretaciji.

U drugom poglavlju Pregled literature dat je opsežan pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti sušenja biomaterijala i njegovog modeliranja. Definisana je proces sušenja, opisana tehnologija procesa sušenja i njen istorijski razvoj, prenos toplote i materije, statika i kinetika procesa sušenja, uređaji za sušenje i promene nastale tokom procesa i stanje u oblasti sušenja biomaterijala

U trećem poglavlju definisan je cilj istraživanja i hipoteza rada

U četvrtom – središnjem, eksperimentalnom delu rada, nastojala se obrazložiti i dokazati teza kroz prikupljanje podataka. Opisana je eksperimentalna sušara, koja je po konfiguraciji slična onima koje se koriste u praksi, izvođenje eksperimenta u Laboratoriji za procesnu tehniku Visoke mašinsko tehničke škole u Trsteniku i metodologija modeliranja procesa sušenja primenom faktorskog plana eksperimenta. Opisani su dodatni uređaji koji su omogućili merenje i održavanje parametara značajnih za dobijanje pokazatelja sušenja. Vrednosti su merene i beležene kontinuirano. Faktorski planovi primenjuju se za eksperimente koji uključuju više nezavisnih varijabli, tj. faktora, a potrebno je ispitati ukupni uticaj faktora na zavisnu varijablu. Izneta su osnovne karakteristike eksperimentalnih modela i ukazuje na njihovu osobitu prednost pri istraživanjima složenih procesa. Za postavljanje matematičkog modela procesa na osnovu rezultata eksperimenata najcelishodnija je statistička metoda – regresiona analiza. Postavljanjem regresione jednačine vrši se aproksimacija procesa sa određenom verovatnoćom koja je unapred poznata. Matematički

model ove vrste nema opšte važenje kao matematički zakon, već samo u opsegu variranja faktora. Opisane su postavke i razvoj statističkog modeliranja a nakon toga analiziran konkretni problem sušenja. Na primeru konvektivno kondenzacionog sušenja ilustrirana je primena eksperimentalnog modela. U toku eksperimenta sušeni su uzorci materijala pod različitim režimima sušenja. Prilikom izvođenja i analize eksperimenta upotrebljen je potpuni 2^k faktorni plan eksperimenta, koji omogućava uključivanje više faktora čiji se uticaji mogu istovremeno analizirati. Istraživan je sadržaj ukupnih kiselina, sadržaj ukupnih šećera i senzorsko ocenjivanje kvaliteta proizvoda. Ispitivanje ovih svojstava provedena su u specijalizovanoj Laboratoriji Zavodu za javno zdravlje u Kruševcu. Prikazani su rezultati ispitivanja svojstava sušenog proizvoda u funkciji od nezavisnih varijabli (režima sušenja).

U petom delu rada provedena je statistička obrada rezultata merenja i matematičko modeliranje metodom potpunog faktorskog plana. Izvedeni su matematički modeli zavisnosti ispitivanih veličina od izabranih varijabilnih ulaznih parametara procesa sušenja. Rezultati su prikazani tabelama, grafikonima i opisno.

U zaključku (poglavlje 6) su ukratko opisani rezultati vlastitih istraživanja i problemi koje sobom nosi istraživanje procesa sušenja tehnikom eksperimentalne identifikacije. Na osnovu stečenih saznanja predložen je smer daljih istraživanja.

Na kraju teksta doktorske disertacije, odnosno posle zaključka, naveden je spisak korišćene literature (poglavlje 7).

U prilogu rada dati su sklopni crteži laboratorijske eksperimentalne sušare, rezultati fizičko-hemijske analize sveže jabuke sorte „crveni delišes“ i izveštaji o ispitivanju sušenih plodova jabuka.

Dakle, ovaj doktorski rad posvećen je proučavanju uticaja parametara kondenzacionog sušenja na kinetiku sušenja i kvalitet sušenog proizvoda, kako bi se proširila saznanja o još neobjašnjenim pojavama pri sušenja biomaterijala.

S obzirom na činjenicu da je navedena tematika u prehrambenoj industriji malo zastupljena očekujemo da će ovaj rad biti prilog obradi te veoma zanimljive tematike i podsticaj za nove diskusije i dalja istraživanja procesa sušenja.

Autor

POPIS OZNAKA I SKRAĆENICA

Spisak korišćenih oznaka:

a_w - aktivnost vode

p - pritisak vlažnog vazduha, Pa

p_w - parcijalni pritisak vodene pare, Pa

p_L - parcijalni pritisak suvog vazduha, Pa

p_S - pritisak zasićenja vodene pare, Pa

τ - trajanje sušenja, h

v - brzina strujanja vazduha, m/s

T - apsolutna temperatura vazduha, K

t - temperatura vazduha, $^{\circ}C$

x - apsolutna vlažnost vazduha, kg/kg_{sv}

x_s - ravnotežna vlažnost vazduha, kg/kg_{sv}

M_w - molarna masa vodene pare, $kg/kmol$

M_L - molarna masa vazduha, $kg/kmol$

φ - relativna vlažnost vazduha, %

h - specifična entalpija vlažnog vazduha, kJ/kg

h_L - specifična entalpija suvog vazduha, kJ/kg

h_w - specifična entalpija vodene pare, kJ/kg

R_w - gasna konstanta vodene pare, $J/(kg \cdot K)$

r_w - latentna toplota isparavanja vode, J/kg

ρ - gustina, kg/m^3

c_p - specifični toplotni kapacitet, $J/(kg \cdot K)$

a - temperaturna provodljivost, m^2/s

dT/dx - temperaturni gradijent, K/m

S - površina sloja izložena sušenju, m^2

λ - toplotna provodljivost, $W/(m \cdot K)$

α - koeficijent prelaza toplote, $W/(m^2 K)$

Q - toplota, kJ

q - toplota po jedinici mase, kJ/kg

$dQ/d\tau$ - toplotni fluks, kJ/s

M_U - masa vlažnog materijala, kg

M_{SM} - masa suve materije, kg

W - masa vlage, kg

w - relativna vlažnost, %

w^S - vlažnost materijala u odnosu na suhu osnovu, kg/kg_{SM} (%)

w_R - ravnotežna vlažnost, %

w_K - kritična vlažnost, %

$dw^S/d\tau$ - brzina sušenja, $kg/(kg_{SM} \cdot h)$

c - masena zapreminska koncentracija vlage, kg/m^3
 dc/dx - koncentracioni gradijent vlage, kg/m^4
 D - difuzivnost, m^2/s
 β_w - koeficijent prelaza materije (vlage), m/s
 J - maseni fluks difundirane vlage, $kg/(m^2 \cdot s)$
 N - broj eksperimenata
 k - broj ulaznih varijabli
 n_0 - broj eksperimenata u nultoj tački
 \bar{Y} - aritmetička sredina podataka
 ε - odstupanje ili greška esperimenta
 b_i - koeficijenti linearne zavisnosti
 b_{ij} - koeficijenti interakcije
 b_{ii} - koeficijenti kvadratne zavisnosti
 R - koeficijent korelacije
 R^2 - koeficijent detriminacije
 X_i - faktori (nezavisno promenljive)
 x_i, x_j - kodirani ulazi ili nezavisno promenljive
 Y_i - vrednost merenog odziva
 \hat{Y}_i - računski vrednost odziva (zavisno promenljiva), pomoću nezavisnih promenljivih
 Y_1 - vreme trajanja procesa, h
 Y_2 - sadržaj ukupnih kiselina, %
 F_{rac} - računski vrednost F-testa (empirijski F-odnos)
 F_t - tablična vrednost F-testa

Spisak korišćenih skraćenica

ANOVA	Analysis of variance	Analiza varijanse
CoREMED	Software package for Choice of Regression Equation of Multifactor Experiment Design with and without Repeating	Softverski paket za izbor regresione jednačine višefaktornih planiranih eksperimenata sa i bez ponavljanja
DOE	Design of experiments	Planiranje eksperimenata
FFD	Full factorial design	Potpuni faktorni plan
DF	Degrees of freedom	Stepeni slobode
MAE	Mean absolute error	Srednja apsolutna greška
MAPE	Mean absolute percentage error	Srednja apsolutna procentualna greška
MaxAPE	Maximum absolute percentage error	Maksimalna apsolutna procentualna greška
MSE	Mean square error	Srednja kvadratna greška
TE	Total effect factors	Totalni efekat faktora
RSM	Response surface method	Metod odziva površine
RSM	Response surface methodology	Metodologija odziva površine
RSM	Response surface model	Model odziva površine
RMSE	Root mean square error	Koren srednje kvadratne greške

POPIS SLIKA

- Slika 1: Načini uklanjanja vlage iz vlažnog materijala
Slika 2: Načini termičkog sušenja
Slika 3: Soženost toplotno separacijskih procesa
Slika 4: Mehanizam transporta vlage
Slika 5: Stanja vlažnog vazduha
Slika 6: Termodinamički dijagram stanja vlažnog vazduha (h-x dijagram) i grafički prikaz promena stanja vlažnog vazduha pri idealizovanom konvektivnom sušenju
Slika 7: Prenos materije usled razlike u koncentraciji
Slika 8: Izgled sorpcione izoterme neke namirnice
Slika 9: Krive izoterme sorpcije i desorpcije
Slika 10: Krive promene brzine sušenja, vlažnosti i temperature materijala pri konstantnim uslovima sušenja
Slika 11: Grafički prikaz zavisnosti brzine sušenja od: a) vremena b) sadržaja vlage
Slika 12: Stanje materijala tokom pojedinih perioda sušenja
Slika 13: Šema rada trakaste sušare
Slika 14: Šema rada tunelske sušare
Slika 15: Šema rada komorne sušare
Slika 16: Kondenzacijski agregat
Slika 17: Šema idealizovane adijabatske sušare i skica procesa u h-x dijagramu za vlažan vazduh
Slika 18: Šematski prikaz toplotnog bilansa sušare
Slika 19: Dijagram sušenja paprene metvice pri različitim temperaturama radnog medija-vazduha
Slika 20: Krive sušenja za pojedine režime ispitivanja
Slika 21: Krive sušenja ispitivanih sorti jabuke rezanih na kolutove
Slika 22: Multidisciplinarnost matematičkog modeliranja procesa
Slika 23: Šematski prikaz matematičkog modela M kojim se ulaznim veličinama X pridružuje skup izlaznih veličina
Slika 24: Relacije modeliranja i simulacije
Slika 25: Simulacijski proces
Slika 26: Klasifikacija matematičkih modela
Slika 27: Prikaz odnosa sistema i okoline
Slika 28: Pojednostavljeni prikaz modela crne kutije
Slika 29: Opšti model procesa - metoda crne kutije
Slika 30: Blok- dijagram eksperimenta tehnološkog procesa
Slika 31: Grafički prikaz 2^3 potpunog faktorskog plana
Slika 32: Grafički prikaz potpunog faktorskog plana eksperimenta 2^3 s ponavljanjem u centralnoj tački plana
Slika 33: Grafički prikaz plana s tri faktora za opis nelinearnog odziva
Slika 34: Model realizacije eksperimenta (šematski prikaz modeliranja procesa)
Slika 35: Tipovi regresionih modela
Slika 36: Izgled jabuke sorte "crveni delišes"
Slika 37: Tehnička vaga
Slika 38: Sekač za rezanje jabuke
Slika 39: Rezane jabuke na jednake delove
Slika 40: Uzorak jabuke: neposredno pre sušenja i nakon sušenja
Slika 41: Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja vakuum kondenzacione sušare za voće i povrće
Slika 42: Izgled uređaja za sušenje
Slika 43: Komora sušare sa lesama
Slika 44: Fotografija postrojenja na kome je izvršeno eksperimentalno istraživanje
Slika 45: Princip rada Venturijeve cevi
Slika 46: Jednostepeni ejektor
Slika 47: Tehnički simbol jednostepenog vakuum ejektora
Slika 48: Dvostepeni ejektor proizvođač PPT- Trstenik

Slika 49: Regulator pritiska

Slika 50: Vakuumska šema - podsistem za stvaranje vakuuma

Slika 51: Rashladni kompresor s pogonskim motorom

Slika 52: Princip rada i osnovne komponente parno-kompresorske toplotne pumpe

Slika 53: Tok kruženja vlažnog vazduha i rashladnog sredstva pri kondenzacijskom sušenju

Slika 54: Isparivač s lamelama

Slika 55: Termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha u h-x dijagramu stanja kod kondenzacionog sušenja

Slika 56: Kriva napetosti rashladnih materija

Slika 57: Fazni dijagram R134a i ciklus rada toplotne pumpe prikazan na p-h dijagramu

Slika 58: Struktura sistema za automatizaciju procesa u uređajima

Slika 59: Veza senzora s računarom i aktuatorima u procesu sušenja

Slika 60: Osnovna struktura regulacijskog kruga (blok-šema)

Slika 61: Senzor stanja vazduha **SVT-01P**

Slika 62: Regulator relativne vlažnosti i temperature **DRV-913P**

Slika 63: Termoanemometar

Slika 64: Simulacijski blok procesa sušenja

Slika 65: Dijagram toka eksperimentalnog rada (algoritam)

Slika 66: Prostorni prikaz plana eksperimenta

Slika 67: Krive sušenja $w^s [kg / kg_{sm}]$ ispitivane sorte jabuke na temperaturi $40^{\circ}C$ i $60^{\circ}C$

Slika 68: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau [kg / kg_{sm} h]$ ispitivane sorte jabuke na temperaturi sušenja 40 i $60^{\circ}C$

Slika 69: Krive sušenja $w^s [kg / kg_{sm}]$ ispitivane sorte jabuke pri brzini strujanja vazduha od $1m/s$ i $2m/s$

Slika 70: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau [kg / kg_{sm} h]$ ispitivane sorte jabuke pri brzini strujanja vazduha od $1m/s$ i $2m/s$

Slika 71: Krive sušenja $w^s [kg / kg_{sm}]$ ispitivane sorte jabuke pri relativnoj vlažnosti vazduha od 55% i 75%

Slika 72: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau [kg / kg_{sm} h]$ ispitivane sorte jabuke pri relativnoj vlažnostivazduha od 55% i 75%

Slika 73: Grafički prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

Slika 74: Grafički prikaz poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2) funkcije vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

Slika 75: Grafički prikaz uticaja faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

Slika 76: Grafički prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$

Slika 77: Grafički prikaz poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2) funkcije sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$

Slika 78: Grafički prikaz uticaja faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

POPIS TABELA

- Tabela 1: Matrica faktorskog plana s tri faktora na dva nivoa (2^3)
- Tabela 2: Opšti oblik tabele ANOVA za model višestruke linearne regresije
- Tabela 3: Matrična formulacija analize varijanse za linearni regresioni model k-varijabli
- Tabela 4: Mehanički sastav voća (www.pbf.hr: Dragović–Uzelac V. 2011, Sirovine za prehrambenu industriju, predavanje)
- Tabela 5: Hemijski sastav nekih vrsta voća (u 100 grama svežeg) (www.pbf.hr: Jeremić, T. 2011, Agro-Food Production System-Voćarstvo, predavanje)
- Tabela 6: Vrednosti mehaničkog sastava analizirane sorte
- Tabela 7: Rezultati hemijske analize kvaliteta sveže jabuke, sorte „crveni delišes”
- Tabela 8: Uticajni procesni parametri sušenja voća
- Tabela 9: Oznake faktora planiranog eksperimenta
- Tabela 10: Nivoi vrednosti faktora procesa ili uslovi izvođenja eksperimenta
- Tabela 11: Parametri koji su držani konstantnim tokom eksperimenta
- Tabela 12. Plan eksperimenta
- Tabela 13: Kodirani plan 2^3 faktorskog eksperimenta s 2 centralne tačke i dobijeni rezultati eksperimenta
- Tabela 14. Senzorska ispitivanja osušenog uzorka
- Tabela 15: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 16: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 17: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 18: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 19: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 20: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 1\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 21: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 1\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 22: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 23: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 24: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 75\%$
- Tabela 25: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$
- Tabela 26: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 75\%$
- Tabela 27: Plan matrica potpunog trofaktornog eksperimenta i izmerene vrednosti vremena trajanja procesa Y_1 u [h]
- Tabela 28: Tabela prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$
- Tabela 29: Analiza varijanse (ANOVA) za funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$
- Tabela 30: Plan matrica potpunog trofaktornog eksperimenta i izmerene vrednosti sadržaja ukupnih kiselina Y_2 u [%]
- Tabela 31: Tabela prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju sadržaja ukupnih kiselina y_2
- Tabela 32: Analiza varijanse (ANOVA) za funkciju sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$

1. UVOD

Potražnja za svežim, prirodno očuvanim i kvalitetnim prehrambenim proizvodima, koji su u toku prerade što manje fizički i hemijski tretirani, na svetskom tržištu je sve veća. Ovaj trend pred proizvođače nameće zadatak da obrate pažnju na usavršavanje metoda prerade koje isključuju veštačke aditive i konzervanse. Savremeni potrošač traži hranu visokog kvaliteta koja je sačuvala senzorske karakteristike sirovine od koje je proizvedena i da je bezbedna po zdravlje.

Prehrambeni proizvodi se, zbog visokog sadržaja vlage, lako kvare i zato se moraju konzervisati. Postupkom konzervisanja se namirnice štite od nepoželjnih fizičko-hemijskih procesa i mikrobiološke razgradnje, pri čemu ne sme doći do promena organoleptičkih svojstava ni do smanjenja hranljive vrednosti prehrambenih proizvoda. Osnovni uzročnici kvarenja životnih namirnica su biohemijski i mikrobiološki faktori. Biohemijske promene izazivaju enzimi koji su prisutni u životnoj namirnici, dok mikrobiološke promene izazivaju mikroorganizmi (bakterije, kvasci i plesni). Postupkom konzervisanja se ostvaruju takvi uslovi pri kojima se usporava delovanje mikroorganizama ili se oni u potpunosti uništavaju. Najstarije metode koje su primenjivane u cilju konzervisanja su metode sušenja, soljenja i dimljenja.

Rezultati brojnih istraživanja ukazuju na pozitivan učinak sastojaka voća i povrća na zdravlje čoveka, pa je konzumiranje ovih namirnica doživelo ogroman porast u protekloj deceniji (Katalinić, 2006). Uslovi za proizvodnju voća i povrća, kao i potrebe za voćem i povrćem i prerađevinama od voća i povrća, imperativ su daljeg porasta proizvodnje i kapaciteta za preradu i konzervisanje istih, dodatnih ulaganja i naučno-istraživački rad u ovom području.

U cilju sprečavanja mikrobiološkog kvarenja i hemijske degradacije prehrambenog proizvoda u praksi se koriste različiti postupci konzervisanja.

Postupak sušenja, koji je neophodan kako bismo dobili proizvod sa visokim sadržajem suve materije, može bitno narušiti senzorne osobine biomaterijala (boja, ukus, tekstura). Stoga je važno posebnu pažnju posvetiti izboru načina i parametara procesa sušenja.

Kako bi postupci sušenja bili konkurentni u budućnosti, kontinuirano se mora ulagati u proizvodni proces s ciljem unapređenja procesa radi poboljšanja kvaliteta dobijenih proizvoda i povećanja produktivnosti i profita. Zato se u postojeći proizvodni proces moraju implementirati nove tehnologije, što je vrlo složen zahtev. U tom smislu, sve se veća pažnja poklanja primeni naučnih metoda u praćenju i otkrivanju mogućnosti poboljšanja procesa.

Primer tome su, pre svega, operacijska istraživanja. Metode operacijskih istraživanja temelje se na predstavljanju stvarnosti matematičkim modelima, čime se postiže optimalno ili približno optimalno rešenje složenih problema.

Sušenje je proces uzajamnog dejstva vlažnog materijala i okoline, čiji je rezultat prenos vlage iz materijala u agens sušenja. Sušenje biljnih materijala (plodova voća) kao termički osetljive materije predstavlja veoma kompleksan termotehnički proces. Energetski bilans procesa sušenja kvantitativno definišu termofizičke osobine materijala i tehnički parametri uređaja.

Proces sušenja je veoma složen, pa ga je veoma teško opisati analitički, u takvim slučajevima prikladna je primena simulacijskog modeliranja kojom se upotrebom računara modelirani proces opisuje i na osnovu sakupljenih i obrađenih informacija definiše proces. Veća primena simulacijskih modela u projektovanju procesa sušenja tek se očekuje, a predmet ovog rada biće predlog primene osnovne metodologije za projektovanje procesa primenom metode simulacijskog modeliranja uz upotrebu odgovarajućih alata operacijskih istraživanja.

Simulacijsko modeliranje je proces definisanja modela stvarnog procesa nad kojim se zatim provode eksperimenti u cilju analize i razumevanja rada sistema, projektovanja novog ili optimiranja postojećeg sistema. Pomoću simulacijskog modela provode se analize sistema kao celine, umesto skupog eksperimentisanja. Zahvaljujući ubrzanom razvoju računarske opreme koji se ogleda u povećanom kapacitetu i brzini obrade podataka, primena računarskih simulacijskih modela postaje opravdana sa stanovišta cene i utroška vremena. Razvijeni simulacijski modeli omogućavaju istraživanje karakteristika procesa sušenja pri režimima koji bi u eksperimentalnim uslovima bili rizični po ispitivani sistem ili okolinu. Iz navedenih razloga potrebna je izrada matematičkih modela kojima se opisuju uzročno – posledične veze između ulaznih i izlaznih varijabli procesa sušenja koje se odvijaju u posmatranom sistemu.

U cilju modeliranja i optimizacije a potom i automatizacije procesa sušenja, provešće se laboratorijska istraživanja činilaca koji imaju uticaja na kinetiku sušenja i kvalitet sušenog proizvoda. Ispitivaće se uticaj različitih uslova sušenja (temperatura, brzina strujanja vazduha i relativna vlažnost vazduha) na neke od parametara kvaliteta sušenog voća.

U slučaju da je nemoguće sprovesti eksperimentalnu identifikaciju objekta, a analitičke metode su neefikasne zbog složenosti procesa, budući tehnološki proces, ili njegovi pojedini delovi razrade se u laboratorijskim uslovima, a zatim se izgradi eksperimentalni fizički model. Fizički model mora u određenom smislu odgovarati realnom objektu. Ta korespondencija naziva se teorija sličnosti (podudarnosti). Sličnost mora biti dvojaka: a) geometrijska sličnost radnih zapremina modela i objekta i b) sličnost samih tehnoloških

procesa. Fizičko modeliranje sastoji se u provođenju eksperimentalnih istraživanja na modelu u kome teku identični prirodi procesa u objektu sa preračunavanjem rezultata u cilju dobijanja rezultata koji su adekvatni realnom objektu (ekstrapolacija).

Cilj istraživanja je smanjiti količinu vode u svežem voću, uz niže temperature vazduha za sušenje i dobiti kvalitetniji suvi proizvod, tj. definisati parametre sušenja jabuke sorte crveni delišes, u kondenzacionoj sušari, koji mogu da:

- skrate vreme trajanja procesa sušenja
- poboljšaju kvalitet sušenog proizvoda meren kroz promene u hemijskom sastavu i senzornim svojstvima,
- ostvare zdravstvenu bezbednost, izraženu količinom mikroorganizama

Cilj ovog rada je da se ispita uticaj režima sušenja na promene kvaliteta osušenih jabuka (sorte “crveni delišes”) i trajanje procesa sušenja jabuke. Ubrzati proces sušenja znači poboljšati prenos mase, što rezultira boljim kvalitetom gotovog proizvoda i dovodi do veće ekonomske i ekološke koristi. Praćenjem promena u hemijskom sastavu i senzornim svojstvima treba doći do matematičkog modela procesa kondenzacionog sušenja primenom eksperimentalne identifikacije, tj. korišćenjem matematičkih i statističkih tehnika konstruisati empirijski model na osnovu eksperimentalnih podataka koje generiše proces. Eksperimentalna istraživanja vršena su u specijalno konstruisanom pilot postrojenju za sušenje bioloških materijala, metodom planiranog eksperimenta. Statističko planiranje eksperimenta može znatno povećati efikasnost procesa eksperimentisanja i dovesti do boljih i pouzdanijih rezultata. Istraživan je uticaj procesnih parametara na kvalitet sušenog proizvoda. Procesni parametri moraju biti tako odabrani da se promene usmere u željenom pravcu uz izbegavanje i minimiziranje neželjenih promena. Istraživanja u pilot postrojenu služe da se prethodno dobijeni podaci pregledom literature i postavljene hipoteze ispituju i dobiju bolje informacije o procesnim parametrima i definiše najprikladniji procesni režim za istraživani prehrambeni proizvod.

Svrha istraživanja u ovom radu je analiza i unapređenje procesa sušenja biomaterijala i provođenje različitih “what-if” scenarija na njegovom simulacionom modelu i proširivanje dosadašnjih saznanja u oblasti sušenja, odnosno prehrambenog inženjerstva.

Veliki broj istraživanja u nauci i inženjerstvu, a pogotovu u industriji je eksperimentalno. U radu su na primeru eksperimentalnog ispitivanja procesa sušenja u zavisnosti od tri faktora prikazani 2^3 faktorski plan i njegova statistička analiza, koja rezultira izgradnjom regresionog modela procene zavisne promenljive na osnovu vrednosti nezavisnih varijabli. Regresioni model će poslužiti za simulaciju procesa na računaru i predviđanje

budućeg ponašanja procesa tj predviđanje kako će se sistem ponašati za neku ulaznu veličinu koja nije direktno izmerena. Simulacijom se omogućava „eksperimentisanje“ na matematičkom modelu umesto na stvarnom sistemu što je posebno važno u fazi projektovanja procesa sušenja (realnog sistema). Na osnovu saznanja iz dosadašnjih istraživanja, imajući u vidu složenost procesa sušenja, u izgradnji regresijskih modela procene parametara kvaliteta korištene su tri nezavisne varijable i to: temperatura, brzina strujanja i relativna vlažnost agensa sušenja.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju u kojoj meri različiti uslovi procesa sušenja utiču na trajanje procesa sušenja i parametre kvaliteta sušenih proizvoda.

Konačni rezultat rada je efikasniji, konkurentniji i fleksibilniji proces proizvodnje sušenih proizvoda.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. METODE KONZERVISANJA VOĆA ODUZIMANJEM VODE – SUŠENJEM

2.1.1. TEORIJSKE OSNOVE PROCESA SUŠENJA

Voće i povrće kao i svi drugi lako kvarljivi proizvodi, pre nego što se prerade ili primene moraju da se konzervišu. Pod konzervisanjem se podrazumeva završna operacija kojom se ili uništavaju prisutni mikroorganizmi ili se zaustavlja njihovo razviće i razmnožavanje (Niketić-Aleksić, 1994). Ova operacija ustvari obezbeđuje da proizvod može da se čuva određeno vreme bez promena i na taj način da se koristi i van sezone i van mesta proizvodnje.

Sveže ubrano povrće ne može dugo da se očuva (nekoliko dana). Da bi smo imali povrća preko cele godine potrebno ga je doraditi ili preraditi različitim tehnološkim postupcima: konzerviranjem, zamrzavanjem ili sušenjem. Konzerviranje zahteva skupu i kabastu ambalažu, a zamrzavanje skupu opremu (tunele za zamrzavanje). Najveći nedostatak ovih postupaka je u tome koliko se povrća uzme iz ambalaže ili objekta za čuvanje, toliko mora odmah da se potroši. Nasuprot ovome, postupak sušenja povrća ima najširu primenu u praksi. Ono može da se prevozi na velika rastojanja bez posebnih zahteva, da se koristi preko cele godine, može da se pakuje u jeftinu ambalažu, zauzima manji prostor za skladištenje, čuvanje i transport, ne gubi hranljivu vrednost na duže vreme, kvašenjem brzo prelazi u sveže stanje. Na žalost, sušeno povrće se kod nas uvozi. Za dobijanje kvalitetnog osušenog povrća potrebno je odabrati adekvatnu sortu, unutar određene vrste povrća (Brkić, Janić, 2006.)

U oblasti industrijske prerade voća i povrća sušenje je jedna od najstarijih metoda konzervisanja, koja se zbog mnogih prednosti zadržala i do današnjih dana. Ova metoda se razvijala, tako da danas imamo brojne tehnološke postupke i sušare koje omogućavaju sušenje proizvoda na različite načine. Sa razvojem tehnike i tehnologije sušenja postizao se i sve bolji kvalitet pa se savremeno osušeni i rehidrisani proizvodi malo razlikuju po sastavu od svežih proizvoda.

Princip ove metode konzervisanja je odstranjivanje vode kao osnovnog uslova za normalni metabolizam mikroorganizama. Modernim industrijskim postupcima voće se najčešće suši do masenog udela vode 16-25% (najviše 27%) (Živković, 2003). Smanjivanjem sadržaja vode i povećanjem koncentracije ostalih sastojaka (šećera, kiselina, mineralnih materija,...), povećava se osmotski pritisak, čime su ishrana i razvoj mikroorganizama onemogućeni. Voda se može uklanjati prirodnim putem sunčevim zračenjem i prirodnim strujanjem i veštačkim sušenjem pod kontrolisanim mikroklimatskim uslovima. Najstariji postupci sušenja zasnivali su se na korišćenju energije Sunca i vetra. Prirodno sušenje, koje je nekada bilo dominantno,

sprovodilo se u tankom sloju biljnog materijala, na suncu ili provetrenom nadkrivenom prostoru. Prednost ovog postupka sušenja je ta što se ne koristi gorivo, a mane su mali učinak, razvoj mikroorganizama i opasnost od infekcije insektima, glodarima i drugim. Prirodno sušenje je ograničeno na određena klimatska područja. Iz navedenih razloga u praksi dominira tehničko sušenje, čije su mogućnosti primene mnogo šire. Tek sredinom prošlog veka ovaj postupak konzervisanja podignut je na nivo tehnologije. Savremene tehnologije sušenja pojedinih vrsta voća nastale su pre svega kao zamena za njihovo sušenje na Suncu. Tehničko sušenje zbog visokih troškova energije može biti neekonomično. Iako sušenjem može da se konzerviraju bilo koja namirnica najčešće se suši voće i povrće (krompir, šargarepa, kupus, paprika, celer, pečurke, grašak, boranija, kajsija, smokva, jabuka, breskva, grožđe, šljiva i td.). Kada je reč o sušenju, podrazumeva se da namirnice pre sušenja mogu biti u čvrstom (šljiva, grožđe) ili tečnom (mleko) agregatnom stanju, a da je finalni proizvod u čvrstom agregatnom stanju. Važno je naglasiti da se za razliku od nekih drugih postupaka čuvanja hrane, u osušene proizvode ne dodaju nikakva hemijska sredstva, pa se osušeni proizvodi smatraju zdravom hranom.

Sušenje primenom sunčeve energije je prirodan, jeftin, najrašireniji i najstariji postupak za čuvanje poljoprivrednih proizvoda u svetu. Međutim taj postupak ima i niz nedostataka kao što su onečišćenje materijala prašinom, česticama zemlje, insektima, zavistan je od vremenskih uslova i zahteva potrebu za velikim površinama za izlaganje sirovina suncu. Takođe taj postupak sušenja može biti vremenski prilično dug. Zbog navedenog postupak sušenja treba se provoditi u zatvorenim sušionicama kako bi se doprinelo povećanju kvaliteta konačnog proizvoda (Ertekin i Yaidz, 2004). Veštačko sušenje je sušenje pod kontrolisanim mikroklimatskim uslovima, često se naziva i dehidracija. Da bi izbegli rizike prirodnog sušenja mnogi kupci prihvataju samo veštački osušene proizvode.

Dehidracija je tehnološka operacija kojom se uklanja deo vode, isparavanjem, iz čvrstog dela voća i povrća u kontrolisanim uslovima. Dehidracija voća i povrća jedna je od najvažnijih metoda konzervisanja, a cilj ove metode je produženje trajnosti voća i povrća uklanjanjem dela vode i smanjenjem vrednosti aktivnosti vode. Važan faktor kojeg treba poznavati prilikom procesa čuvanja i prerade namirnica je aktivnost vode pomoću kojeg se može kontrolisati rast i razvoj mikroorganizama. Smanjenjem aktivnosti vode stvaraju se nepovoljni uslovi za rast i razmnožavanje mikroorganizama koji izazivaju kvarenje i povećava se stabilnost proizvoda. Aktivnost vode predstavlja odnos između parcijalnog pritiska vodene pare namirnice (p) i pritiska zasićene vodene pare (p_s) pri istoj temperaturi:

$$a_w = \frac{p}{p_s}, \text{ odnosno } a_w = \frac{\text{relativna vlažnost vazduha (\%)}}{100} \quad (1)$$

Za razvoj mikroorganizama u namirnici nije bitan ukupan sadržaj vode, nego deo koji oni mogu koristiti, tj. sadržaj slobodne vode. Sušenje je jedan od procesa korišćenih za redukciju količine slobodne vode u hrani. Aktivnost vode je važna veličina stanja namirnice jer se njenim porastom intenziviraju procesi kvarenja hrane.

Pomoću a_w vrednosti može se proceniti koliki deo slobodne vode stoji na raspolaganju prisutnim mikroorganizmima u odvijanju metabolizma. Uticaj a_w vrednosti je selektivan na aktivnost rasta mikroorganizama, pored ovog dokazan je i uticaj a_w vrednosti na brzinu odvijanja raznih nepoželjnih hemijskih promena u hrani (neenzimatsko posmeđivanje, enzimska aktivnost, aktivnost bakterija). Za a_w usko je vezana higroskopnost, odnosno mogućnost upijanja i otpuštanja vodene pare iz okoline u kojoj je uskladišteno voće.

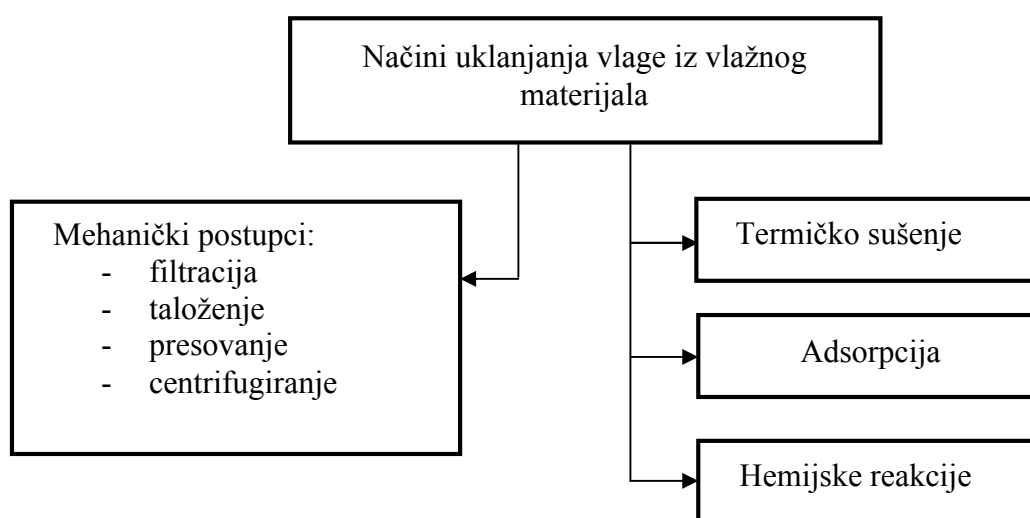
Voda se uklanja do tog stepena da takva namirnica može godinama da bude zaštićena od kvarenja, plesnivljenja i gubitka ukusa. Pri tome se ne sme oduzeti celokupna količina vode jer to negativno deluje na elastičnost i na sposobnost za ponovno upijanje vode. Većinu namirnica treba sušiti do onog sadržaja ravnotežne vlažnosti koju namirnica sadrži na 60-70% relativne vlažnosti vazduha, tj. do postizanja ravnotežne vlažnosti. Ravnotežna vlaga – izjednačavanje parcijalnih pritisaka pare na površini materijala i parcijalnog pritiska pare u vazduhu, zavisi od relativne vlažnosti vazduha, odnosno od temperature vazduha. Ravnotežna vlažnost je ona količina vlage koja pri daljem izlaganju materijala vazduhu ostaje nepromenjena, a to znači da ako materijal ima veću vlažnost od ravnotežne sušiti će se do ravnotežne vlažnosti, a ako je vlažnost materijala manja od ravnotežne materijal će apsorbovati vlagu.

2.1.2. PRIMENA TEHNIČKOG SUŠENJA

Sušenje se primenjuje u laboratorijama i u gotovo svim industrijskim granama (hemijska, prehrambena - za poljoprivredne proizvode i mesne prerađevine, papirna, tekstilna, farmaceutska, keramička, drvena i dr.). Može se reći da danas gotovo i nema proizvoda koji na svom putu od sirovine do gotovog proizvoda barem jednom nije sušen. U prehrambenoj industriji se uklanjanjem vlage iz hrane onemogućuje mikrobiološka aktivnost i odvijanje pojedinih biohemijskih i hemijskih reakcija čime joj se produžuje trajnost. Osušena hrana ima manju masu i zapreminu pa je za pakovanje potrebno manje ambalaže, lakše se transportuje, jednostavnija je za upotrebu, može se čuvati na sobnoj temperaturi, a hranljive materije ostaju nepromenjene.

2.1.2.1. Postupci tehničkog sušenja materijala

Dehidracijom se naziva proces izdvajanja vlage iz čvrstog dela voća i povrća u kontrolisanim uslovima. Iako se vlaga iz materijala može uklanjati mehaničkim i hemijskim metodama kada se govori o sušenju misli se na termički proces, pri kome se vlaga uklanja dovođenjem toplote materijalu a da mu se pri tom ne umanji kvalitet. Kada vlaga u procesu uklanjanja ne menja svoje agregatno stanje radi se o mehaničkim procesima (presovanje, centrifugiranje, filtriranje). U termičkim procesima sušenja vlaga menja svoje agregatno stanje u gasovito. U praksi se najviše upotrebljavaju termički procesi sušenja, a oni su praćeni sa dve istovremene pojave: prenosom toplote potrebne za isparavanje vlage i prenosom vlage iz materijala u okolnu sredinu slika 1 (Mujić i Alibabić, 2005).



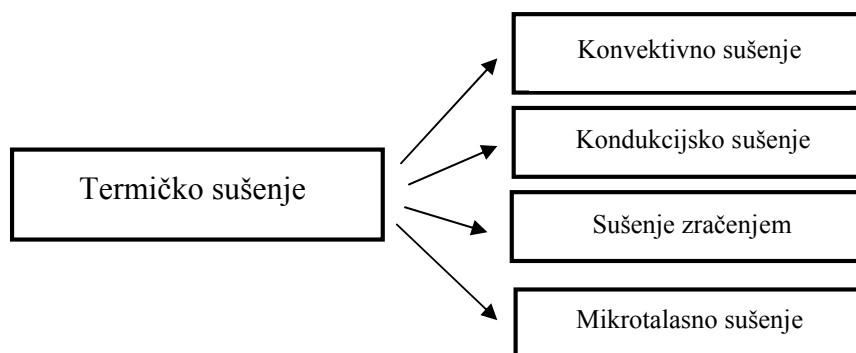
Slika 1: Načini uklanjanja vlage iz vlažnog materijala (Mujić i Alibabić, 2005)

Sušenje je glavni postupak za konzervisanje i očuvanje kvaliteta prehrambenih proizvoda. Prehrambeni materijali mogu sadržati znatne količine vlage, koju je potrebno u što većoj meri ukloniti mehaničkim (taloženje, filtracija, centrifugiranje) i hemijskim metodama.

Kada se vlaga uklanja iz nekog materijala dovođenjem toplote, koje je praćeno isparavanjem vode, reč je o termičkom sušenju materijala. Ako se kao nosilac potrebne energije za isparavanje vlage i istovremeno medijum koji prihvata vlagu, koristi neki gasoviti agens koji struji oko materijala, za takvo sušenje se koristi termin konvektivno sušenje (Valent, 2001). Najčešće korišćen agens za sušenje, posebno u prehrambenoj tehnologiji, je nezasićen vazduh.

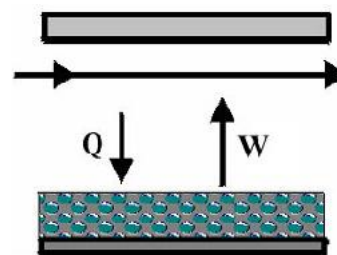
Povećana potreba za efikasnom proizvodnjom visokokvalitetnih proizvoda po prihvatljivoj ceni dovodi do korišćenja različitih metoda sušenja u praksi. Iz niza postupaka izdvojiće se sušenje u kojem je suštinski proces razmena toplote tkz. termičko sušenje.

S obzirom na način razmene toplote, termičko sušenje se izvodi na nekoliko principijelno različitih načina slika 2 (Seader i Henley, 2006):



Slika 2: Načini termičkog sušenja (Seader i Henley, 2006)

Konvektivno sušenje karakteriše se konvektivnom razmenom toplote između sušenog materijala i gasa koji apsorbuje vlagu. Određena količina toplote Q vlažnom materijalu dovodi se strujom vrućeg gasa. Sa agensa sušenja toplota se predaje konvekcijom. Agens sušenja je okolni vazduh, jer ga kao sirovine ima u izobilju. Ovo je najčešći način dovođenja potrebne toplote za sušenje različitih vrsta materijala. Vlažan vazduh pri ovom načinu sušenja ima još jednu funkciju, a ona se sastoji u prihvatanju i odvođenju iz sistema određene mase vlage W . Procesi prenosa materije i toplote odvijaju se u suprotnim smerovima. Takvi se sušionici obično nazivaju direktni sušionici.

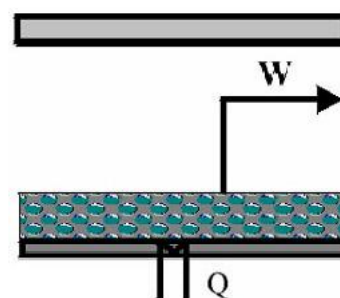


Kod konvektivnog dovođenja toplote režim sušenja se definiše:

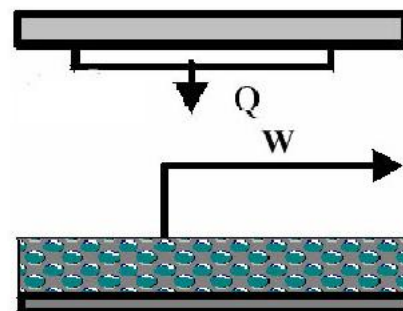
- temperaturom, t
- brzinom strujanja, v
- relativnom vlažnošću vazduha, φ .

Ovi parametri određuju vreme sušenja materijala.

Konduktivno sušenje se izvodi u pogonu sa neposrednim dodiranjem grejne površine povišene temperature i sušenog materijala, tako da se toplota među njima razmenjuje provođenjem. Za odvođenje mase vlage koja je isparila iz materijala koristi se okolni vlažan vazduh, koji u ovom slučaju služi samo kao nosioc vlage ili se isparena vlaga odvodi iz sušionika vakuumom. Kondukcijski ili indirektni sušionici su toplotno efikasniji od konvekcijskih.

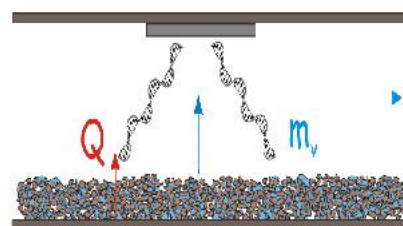


Sušenje zračenjem - kada se određena količina toplote sušenom materijalu predaje elektromagnetnim talasima različitih talasnih dužina. Površina materijala apsorbuje samo deo ulaznog zračenja, koje emituje izvor, zavisno od njegove talasne dužine i upadnog ugla, ali i stepena crnoće i površine tela izložene zračenju i na taj način zagreva vlažan materijal pri čemu vlaga isparava. Može se izvoditi i pomoću specijalnih postupaka za poboljšanje površina za odavanje toplote. U



ovom slučaju vlažan vazduh se koristi da odnese masu vlage koja je isparila iz sistema.

Mikrotalasno sušenje izvodi se postavljanjem vlažnog materijala u visokofrekventno elektromagnetno polje. Zagrevanje mikrotalasnom energijom je zapreminsko, pri čemu elektromagnetno polje zagreva jednoliko kompletnu zapreminu materijala. Do grejanja dolazi trenutno i veoma brzo. Toplota se generiše unutar materijala zbog interakcije



elektromagnetnih talasa i vode tako da su vlažni delovi materijala na višoj temperaturi od delova koji su manje vlažni. Temperatura je veća u unutrašnjosti nego na površini materijala (temperaturni je gradijent suprotan od onoga koji se sreće kod konvencionalnih metoda zagrevanja). Prenos mase m_v i toplote Q odvijaju se u istom smeru pa je stoga proces ubrzan.

Bez obzira na način dovođenja toplote, kod svakog procesa sušenja neophodna je struja nekog gasa koji će apsorbovati paru nastalu zagrevanjem vlažnog materijala. Termički proces sušenja svodi se u suštini na proces isparavanja (ishlapljivanja) vode u nezasićenu struju gasa (Bijedić i Delalić, 2004). Bitno će se razlikovati proces izdvajanja vlage iz materijala sa kojim je ona samo mehanički vezana i proces izdvajanja higroskopne vlage. U prvom slučaju taj će proces biti potpuno identičan ishlapljivanju vode u vazduh (barem one slobodne vode koja je u neposrednom dodiru sa vazduhom). Malo odstupanje će nastati zbog otežanog stvaranja konstantnog parovitog sloja na dodirnoj površini sa vazduhom. Naime, proces sušenja teče tako što vazдушna struja odnosi sa sobom paroviti sloj sa površine materijala a novi sloj se stvara izlaskom na površinu nove količine vlage. Razume se da ovaj izlazak može biti ometen difuzionim otporom.

Radi ubrzavanja sušenja, uštede energije i dobijanja boljeg kvaliteta finalnog proizvoda, sem sušenja pri uobičajenom atmosferskom pritisku, sušenje može da se obavi i pri smanjenom pritisku radnog fluida (vakuumu), odnosno pri nižoj temperaturi sušenja. Sušenje pod sniženim pritiskom je pogodna metoda za sušenje materijala osetljivih na visoke

temperature i materijala sklonih oksidaciji (Hill, 1967; Schlunder, 1993). Na sniženom pritisku snižava se i tačka ključanja vode u materijalu - temperatura na kojoj voda isparava, a time i brzina štetnih procesa kao što su hemijska razgradnja u prisustvu veće količine kiseonika. Pored toga podpritisk dobro utiče na protok vlage (pospešuje kretanje vodene pare kroz poroznu kapilarnu strukturu) i povećava potencijale (veća je razlika u pritisku između unutrašnjih slojeva i površine, kao i između površine i okoline). Kada se voda nalazi u vakuumu njeno isparavanje je brže i to direktno je srazmerno s dubinom vakuuma, pa je za sušenje potrebno znatno manje vremena nego u ostalim tipovima sušara. Glavna poteškoća kod sušenja u vakuumu je slaba konvekcija toplote i usled toga otežano zagrevanje materijala. U vakuum sušarama vakuum se postiže upotrebom mehaničkih kompresora, vakuum pumpe ili vakuum sisaljkom.

Sušenje sublimacijom – vlaga se u materiji najpre smrzne hlađenjem materijala a zatim se uklanja sublimacijom kondukcijskim, konvekcijom ili radijacijskim zagrevanjem pod sniženim pritiskom. Sublimacija se dešava kada smrznuta vlaga prelazi direktno u gasovito stanje bez prolaska kroz tečnu fazu. Zagrevanje je kontrolisano kako bi se izbeglo topljenje vlage ili razgradnja materijala. Koristi se za sušenje bioloških i farmaceutskih materijala i prehrambenih proizvoda. Materijal ostaje porozan, odnosno ne dolazi do skupljanja, pa se dobijaju kvalitetni proizvodi (Janković i sar., 2010.).

Sušenje je star, proveren i najefikasniji način konzerviranja voća. Suština sušenja je u tome da pomoću toplote i strujanja vazduha potpuno ili delimično odstrani vlaga iz strukture sušenog materijala u kontrolisanim uslovima. Uklanjanjem dela vode voće postaje vrlo stabilno čime mu se produžava trajnost i smanjuje vrednost aktivnosti vode (a_w – vrednost), odnosno smanjenja sadržaja slobodne vode dostupne mikroorganizmima, čime se stvaraju nepovoljni uslovi za rast i razmnožavanje mikroorganizama - uzročnika kvarenja. Sa pravilnim sušenjem, posebno na umerenim temperaturama vazduha za sušenje voće sačuva sve hranljive materije, vitamine i prirodnu boju.

Sa tehnološkog aspekta proces sušenja je proces izdvajanja vlage, obično vode, a sa termodinamičkog aspekta to je termodifzioni nestacionarni proces uzajamnog prenosa toplote i materije (Topić i Bogner 2002). Sušenje je složeni proces uzajamnog dejstva vlažnog materijala i okoline, rezultat kojeg je prelaz vlage iz materijala u okolinu. Okolina može biti, čvrsta, tečna ili gasovita materija, koja ima higroskopna svojstva.

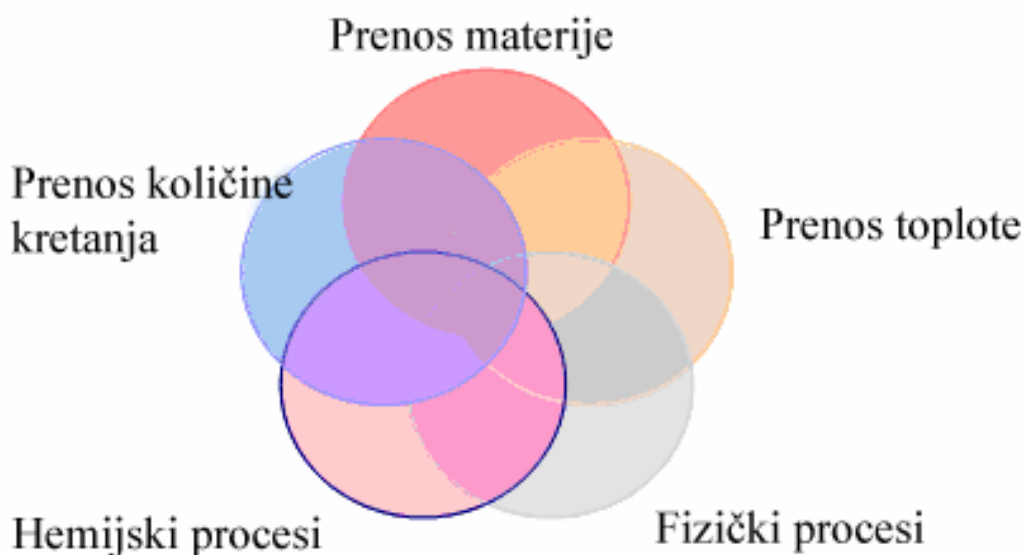
Sušenje je tehnološka operacija kojim se iz prehrambenog proizvoda uklanja određena količina vlage, kako bi se omogućilo njihovo dugotrajno čuvanje na sobnoj temperaturi bez

znatnijeg narušavanja kvaliteta. Pri malom sadržaju vode zaustavlja se mikrobiološka aktivnost i ostali biološki procesi koji uzrokuju kvarenje proizvoda.

U tehnološkim procesima uvek dolazi do neke vrste prenosa: materije, toplotne energije ili količine kretanja. Do prenosa količine kretanja, materije ili energije dolazi ukoliko postoji pokretačka sila. Odgovarajuće pokretačke sile su:

- razlika pritiska – za pokretanje fluida kroz cev
- razlika temperature - za prenos toplote
- razlika koncentracije – za prenos materije.

Proces se odvija do postizanja ravnotežnog stanja (do izjednačavanja pritiska, temperature i koncentracije) odnosno kada više ne postoji pokretačka sila. Tokom većine tehnoloških procesa (jedinične operacije) odvija se više od jednog procesa, slika 3 (Sander, 2011).



Slika 3: Soženost toplotno separacijskih procesa (Sander, 2011)

Uopšteno rečeno, sušenje je proces uklanjanja vlage iz materijala. Kada vlaga u procesu uklanjanja ne menja svoje agregatno stanje, radi se o mehaničkim procesima (prešenje, filtriranje, centrifugiranje), dok su procesi u kojima se vlaga uklanja uz pomoć toplote označeni kao termički (Mujić i Alibabić, 2005). U njima vlaga menja svoje agregatno stanje u gasovito. Osim navedenih vlaga se iz materijala može ukloniti korištenjem sorpcijskih karakteristika, električnog polja i dr. U praksi se najčešće koriste termički procesi sušenja i oni su praćeni s dve istovremene pojave: prenos toplote potrebne za isparavanje vlage i prenosom vlage iz materijala u okolnu sredinu.

Svrha termičkog veštačkog sušenja je odstranjivanje dela vlage (prenos materije), izazvan delovanjem toplote, što je moguće brže, sa sto manjim troškovima, a da mu se pri tome ne umanjati kvalitet.

Uprkos napretku i primeni novih tehnologija u praksi preovladava primena konvektivnog sušenja. Koristi se uglavnom u prehrambenoj industriji sa atmosferskim pritiskim radnog fluida i sušenje u vakuumu pa će u narednom poglavlju biti opisana ova vrsta termičkog sušenja.

2.1.2.2. Konvektivno sušenje materijala

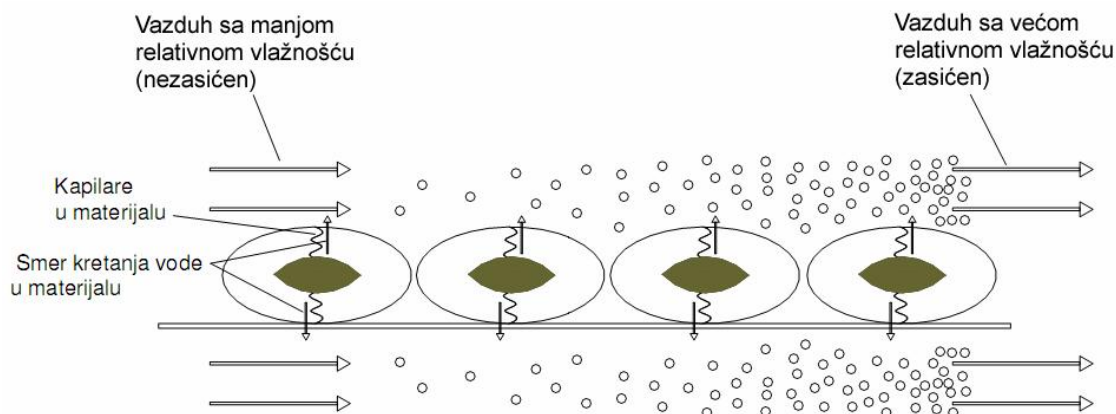
Konvektivno sušenje obavlja se toplim vazduhom, agensom za sušenje, kojim se zagreva sušeni materijal, vlaga isparava i agens je odnosi (Lj. Babić i M. Babić, 2012). Pri zagrevanju vazduha iz okoline snižava se njegova relativna vlažnost, te povećava potencijal za isparavanje vlage u materijalu. Agens za sušenje kroz sušeni materijal prostrujava, što je češći slučaj, ili ga opstrujava, što se primenjuje za tanke slojeve materijala. Konvektivno sušenje sprovodi se u kontinuiranim, semi-kontinuiranim i šaržnim sušarama. U zavisnosti od tipa sušare, faze sušenja se odvijaju istovremeno, u odvojenim delovima sušara, ili slede jedna drugu.

Sušenje je složeni proces uzajamnog dejstva vlažnog materijala i okoline, rezultat kojeg je prelaz vlage iz materijala u okolinu. Okolina (sredstvo za sušenje) može biti, čvrsta, tečna ili gasovita materija, koja će primiti gasovitu fazu isparene vode (ima higroskopna svojstva). U najvećem broju slučajeva kao agens sušenja upotrebljava se vlažan vazduha, koji se predhodno pripremi, na različit način zavisno od načina sušenja, a zatim upotrebljava za sušenje vlažnog materijala.

Tokom konvektivnog sušenja zagrejani vazduh struji iznad površine vlažnog materijala (prenos količine kretanja), pri čemu predaje toplotu vlažnom materijalu (prenos toplote). Prilikom zagrevanja dolazi do isparavanja vlage s površine materijala, a istovremeno kroz unutrašnjost materijala, vlaga se kreće prema površini isparavanja (prenos materije). Ako se suši higroskopni materijal može mu se menjati i unutrašnja struktura (veličina i raspodela pora). Dakle osim procesa prenosa (količine kretanja, toplote i mase), uz faznu promenu vlage, istovremeno se mogu odvijati i različiti hemijski ili fizički procesi unutar složene čvrste faze veoma kompleksne strukture. Sve ovo govori u prilog složenosti takvih procesa.

Proces sušenja odvija se na sledeći način: pripremljeno voće ređa se u ravnomernom sloju na lese. One se umeću u specijalnu ramsku konstrukciju - kolica koja su najčešće na točkićima. Kolica se uvoze u radni prostor sušare. Strujanje vazduha u sušari ostvaruje se

pomoću ventilatora smeštenog u energetskom delu sušare. Vazduh struji preko komore ložišta s razmenjivačem toplote (kod većih sušara) ili preko električnih grejača (kod manjih sušara) pa tako zagrejan ulazi u radni prostor gde se nalaze kolica sa lesama. Sušenje se obavlja tako što zagrejani vazduh obstrujava voće na lesama i preuzima na sebe vlagu koja izlazi iz voća i zasićen napušta komoru sušare. Odvedeni vazduh nadomešta se istom količinom svežeg vazduha, koji ulazi u sušaru iz prostorije gde je smeštena sušara (Karić i Čajetinac, 2008),.



Slika 4: Mehanizam transporta vlage (Velić, 2008)

Celokupan proces prenosa materije može se podeliti na dve faze (slika 4):

I faza - kretanje vlage u tečnom i parnom stanju u samom materijalu - unutrašnji transport. Vлага se prenosi iz unutrašnjosti materijala ka površini kontakta migracijom i difuzijom, pri čemu su za ovaj proces merodavne kapilarne pojave, brzina difuzije i neki drugi efekti u samom materijalu i

II faza - prelaz vlage sa površine vlažnog materijala u vlažan vazduh, pri čemu je merodavan koeficijent prelaza materije odnosno razlika koncentracije vlage u vazduhu na površini kontakta sa materijalom i daleko od te površine.

U cilju razumevanja tog procesa neophodno je znati svojstva vlažnog materijala i vlažnog vazduha.

U procesu sušenja se menjaju fizička svojstva i vlažnog materijala i vazduha – sredstva za sušenje.

2.1.3. VLAŽAN MATERIJAL

Sa aspekta sušenja svaki materijal se posmatra kao binarni sistem, sastoji se iz dve komponente: suve materije (čvrsta faza) i vode (tečna faza). Masa vlažnog materijala prehrambenih proizvoda (M_u) određena je zbirom njegovih osnovnih sastojaka: masom suve materije (M_{sm}) i mase vlage (W):

$$M_u = M_{sm} + W \quad (2)$$

U suvoj materiji sadržani su svi parametri (minerali, pektinske materije, ugljeni hidrati, kiseline, belančevine, taninske materije, masti i materije arome, boje i vitamini) koji čine prehrambenu vrednost neke namirnice.

Vlaga je materija koja ulazi u sastav svih organizama na Zemlji. Od njene količine zavisi karakter i intenzitet biohemijskih i fizičko-hemijskih procesa. Utiče na fizička, hemijska i tehnološka svojstva svih biomaterijala, a vrlo često determiniše početak i tok pojedinih tehnoloških operacija (Lj. Babić i M. Babić, 2012). Shodno, tome neophodno je definisati njeno kvantitativno i kvalitativno učešće u materijalu, kao i načine njenog merenja.

Biomaterijal se sastoji od tri komponente: čvrste („skeleta“), tečne (vode) i gasovite (vazduha). Pošto se masa gasovite faze može zanemariti može se smatrati da se vlažan materijal sastoji iz suve materije i vlage. Vlaga je vezana na različite načine i različitim energijama za suhu materiju. U oblasti tehnike sušenja, dva su uobičajena načina definisanja sadržaja vlage u nekom materijalu: relativna i apsolutna vlažnost.

Relativna vlažnost materijala (w) računa se u odnosu na vlažnu osnovu, predstavlja maseni udeo vlage u materijalu. Definiše se kao količnik mase prisutne vlage (W) i ukupne mase materijala ($M_u = W + M_{sm}$), tj. količina vlage u (kg) na $1kg$ vlažnog materijala:

$$w = \frac{W}{M_u} = \frac{W}{M_{sm} + W} \quad (kg / kg), \quad (0 \leq w < 1) \quad \text{i može se izraziti i u procentima:}$$

$$w = \frac{W}{M_u} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3)$$

Kako se tokom sušenja vlažnog materijala stalno menja njegova masa (M_u), a time i njegova vlažnost (w), pri analitičkom opisivanju osobina vlažnog materijala često se koristi veličina koja se naziva apsolutna vlažnost materijala (w^S).

Apsolutna vlažnost materijala (w^S) računa se u odnosu na suhu bazu, i definiše se kao maseni odnos vlage (W) i suve materije, tj. količina vlage (kg) na $1kg$ suve materije:

$$w^S = \frac{W}{M_{sm}} \quad (kg / kg), \quad \text{i može se izraziti u procentima:}$$

$$w^S = \frac{W}{M_{sm}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Lako je izvesti sledeću vezu između te dve vlažnosti:

$$w^S = \frac{w}{1 - w} \quad (5)$$

Tokom sušenja masa vlažnog materijala se smanjuje za iznos isparene vlage (Δm_v). Masa isparene vlage se određuje iz promene sadržaja vlage u materijalu pre (w_0^S) i posle sušenja (w_1^S) gde je $w_1^S < w_0^S$. Dakle, između mase vlažnog materijala (m_0), mase isparene vlage (Δm_v), mase osušenog materijala (m_1), relativne vlažnosti (w) i apsolutne vlažnosti (w^S) moguće je uspostaviti sledeće zavisnosti (Valent, 2001):

- masa isparene vlage

$$\Delta m_v = m_0 - m_1 = m_1 \frac{w_0^S - w_1^S}{1 + w_1^S} = m_0 \left(1 - \frac{1 - w_0}{1 - w_1} \right) \quad (6)$$

- masa vlažnog materijala na početku procesa

$$m_0 = \Delta m_v \frac{1 + w_1^S}{w_0^S - w_1^S} = m_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_0} \quad (7)$$

- masa osušenog materijala

$$m_1 = m_0 \frac{1 + w_1^S}{1 + w_0^S} = \Delta m_v \frac{1 - w_0}{w_0 - w_1} \quad (8)$$

2.1.3.1. Oblici veze vlage sa suvim materijalom

Osnovni hemijski konstituenti voća i povrća su voda i suva materija. Za shvatanje suštine pojava koje se odvijaju u biomaterijalu u procesu sušenja neophodno je imati predstavu o mehanizmu i oblicima veze vlage i suve materije. Kvantitativno najznačajniji konstituent je voda koja je na različite načine vezana za hemijsku kompoziciju voća i povrća. Karakter i brzina kretanja vlage zavise od oblika veze vlage sa suvim skeletom vlažnog materijala. Opšte usvojena podela ove veze prema Rebinderu (1958), a urađena je na osnovu količine energije koju treba uložiti da bi se odgovarajuća veza razgradila, je:

- fizičko-mehanički vezana vlaga,
- fizičko-hemijski vezana vlaga i
- hemijski vezana vlaga

Fizičko-mehanički vezana vlaga je najslabije vezana. To je površinska (gruba) vlaga (vlaga kvašenja) i kapilarna vlaga. Ako se biomaterijal nađe u kontaktu sa vlagom u tečnom stanju, ona će se prilepiti za površinu. Za tako vezanu vlagu kaže se da je gruba vlaga ili vlaga kvašenja. Kapilarno vezana vlaga ispunjava kapilare kao rezultat direktnog kontakta materijala s vodom (makrokapilare, $d > 10^{-5} \text{ cm}$) ili putem direktnog kontakta i sorpcije pare iz vlažnog vazduha (mikrokapilare, $d < 10^{-5} \text{ cm}$). Fizičko mehanički vezana vlaga, ima

svojstva obične vode i najlakše se odstranjuje iz materijala, saglasno energiji veze najpre se iz materijala odstranjuje površinska vlaga, a zatim kapilarna.

Fizičko-hemijski vezana vlaga je jače vezana vlaga od fizičko mehaničke i obuhvata adsorpciono i osmotski vezanu vlagu. Osmotski vezana vlaga difunduje kroz polupropustljive ćelijske membrane, zbog razlike u koncentracijama u ćelijama i međućelijskom prostoru (porama i kapilarama) i ulazi u njihov sastav. Voda kao univerzalni rastvarač rastvara deo organske materije pa se u porama i kapilarama poljoprivrednih materijala javlja rastvor vode koloidne strukture.

Adsorpciono vezana vlaga obrazuje čvrsti rastvor sa materijom materijala i gubi svojstva obične vode. Pojavljuje se kao vrlo tanki, jedno- ili više-molekularni sloj na unutrašnjoj ili spoljašnjoj površini proizvoda vezana jakim molekularnim silama, ili adsorbirana u fine pore kapilarnom kondenzacijom.

Hemijski vezana vlaga sa materijalom javlja se kao rezultat hemijskih reakcija. vezana je sa suvim materijalom jonskim ili molekularnim silama, ulazi u sastav materije u tačnim kvantitavnim odnosima (npr. u nekim solima $CaCl_2 \cdot 6H_2O$) Za razlaganje ove veze potrebno je dovesti značajnu količinu toplotne energije. Vlaga može da se nađe i u kristalima i može se odstraniti žarenjem pri čemu materijal menja hemijski sastav i strukturu.

Obično se smatra da se celokupna prisutna voda u hrani može podeliti na slobodnu (kapilarnu) i vezanu (hemijsku i adsorpcionu) vlagu. Ovo je uprošćena podela.

Slobodna voda se može odrediti u proizvodu primenom raličitih metoda (hemijske, električne metode, snižavanjem ledišta, i dr.), dok se vezana voda ne može odrediti nekom od navedenih metoda. U primeni je nekoliko metoda kojima se određuje stepen vezanosti vode u hrani a to su: održivanje nezamrzljive vode metodom nuklearne magnetne rezonance ili metodom diferencijalne termičke analize, određivanje dielektričnih svojstava ili sorpcionih svojstava hrane.

U zavisnost od oblika veze vlage sa suvom materijom svi materijali se dele u tri grupe: koloidne, kapilarno porozne i koloidno kapilarno porozne.

Većina poljoprivrednih proizvoda koji se suše spada u koloidno kapilarno porozne materijale i zato su higroskopni – upijaju ili odaju vlagu vlažnom vazduhu kojim su okruženi.

2.1.4. VLAŽAN VAZDUH

Sušenje biomaterijala najčešće se vrši toplim vazduhom koji tokom procesa vrši ulogu prenosa materije (vlage) i energije (toplote). Brzina sušenja pa prema tome i kapacitet sušionica, a u krajnjoj liniji i kvalitet osušenih proizvoda zavisi i od karakteristika vazduha.

Da bi mogao da primi vlagu, vazduh mora biti nezasićenog termodinamičkog stanja, male relativne vlažnosti i što više, ali dozvoljene temperature.

Nezasićen vlažan vazduh je mešavina suvog vazduha i vodene pare, pa je uobičajeno vlažni vazduh iskazati kao 1 kg suvog vazduha + x kg vlage, tj. (1+x) kg vlažnog vazduha, (Voronjec i Kozić, 2002):

$$\text{Vlažan vazduh (p, t)} \quad \boxed{\begin{array}{c} 1 \text{ kg suvog vazduha (} p_L, t \text{)} \\ + \\ x, \text{ kg vlage – pregrejana vodena para (} p_w, t \text{)} \end{array}} \quad (9)$$

Suv vazduh kao komponenta vlažnog vazduha, je mešavina gasova azota i kiseonika i u manjim količinama ugljen-dioksida, argona, neona i ostalih.

Stanje nezasićenog vlažnog vazduha (smeša suvog vazduha i pregrejane vodene pare) koji se kristi u procesu sušenja se karakteriše sa bilo koja tri termodinamička parametra (p, T i φ) koji zajedno sa brzinom strujanja definišu režim sušenja. U procesima sušenja koriste se sledeća fizička svojstva (veličine stanja) vlažnog vazduha:

1. intenzivna:

- relativna vlažnost,
- pritisak vazduha, Pa
- temperatura vazduha (temperatura suvog termometra), K
- temperatura tačke rose, K
- temperatura vlažnog termometra, K
- temperatura adijabatskog zasićenja, K

2. ekstenzivna;

- sadržaj vlage, kg
- zapremina, m^3
- toplotni kapacitet, J/K
- entalpija, J

Temperatura vazduha (temperatura suvog termometra), K je stvarna temperatura smeše vazduha i vlage.

Temperatura vlažnog termometra je temperatura koju bi imao vazduh u datim uslovima temperature i pritiska kada bi bio zasićen vodenom parom.

Pritisak vlažnog vazduha sastoji se od parcijalnog pritiska vodene pare $p_w, [Pa]$, i parcijalnog pritiska suvog vazduha $p_L, [Pa]$:

$$p = p_w + p_L \quad (10)$$

Apsolutna vlažnost vazduha x , (kg/kg), definiše se kao količina vodene pare u vlažnom vazduhu po jedinici količine suvog vazduha:

$$x = \frac{W}{L} \quad (11)$$

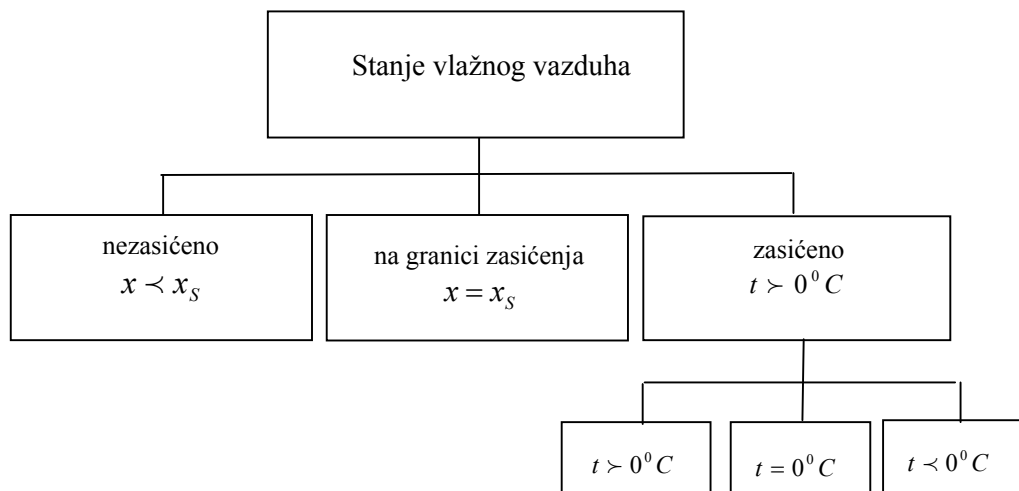
Ista veličina može se iskazati i preko parcijalnog pritiska vodene pare, p_w , Pa, u vlažnom vazduhu:

$$x = \frac{p_w}{p - p_w} \cdot \frac{M_w}{M_L} = 0,622 \cdot \frac{p_w}{p - p_w} \quad (12)$$

a kada je parcijalni pritisak vodene pare jednak pritisku zasićenja p_{ps} , Pa, za posmatranu temperaturu, sadržaj vlage je x_s , kg/kg,

$$x_s = 0,622 \cdot \frac{p_{ps}}{p - p_{ps}} \quad (13)$$

Zavisno od vrednosti sadržaja vlage u vazduhu x , treba razlikovati nezasićeno i zasićeno stanje vlažnog vazduha, kao što je prikazano na slici 5:



Slika 5: Stanja vlažnog vazduha

Relativna vlažnost vazduha, φ , definisana je kao odnos postojećeg parcijalnog pritiska vodene pare u vlažnom vazduhu i napona pare na toj temperaturi:

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{ws}} \cdot 100 \quad (14)$$

i obično se izražava u %.

Temperatura tačke rose vlažnog vazduha je ona temperatura do koje treba ohladiti nezasićenu smešu vazduha i vodene pare, pri konstantnom pritisku da bi ona postala zasićena.

To je ona temperatura na kojoj je napon pare jednak postojećem parcijalnom pritisku vodene pare.

Entalpija nezasićenog vlažnog vazduha je neophodna u energetske bilansima procesa sušenja. Računa se po kilogramu suvog vazduha kao zbir specifične entalpije suvog vazduha i entalpije prisutne vodene pare, na datoj temperaturi i pritisku:

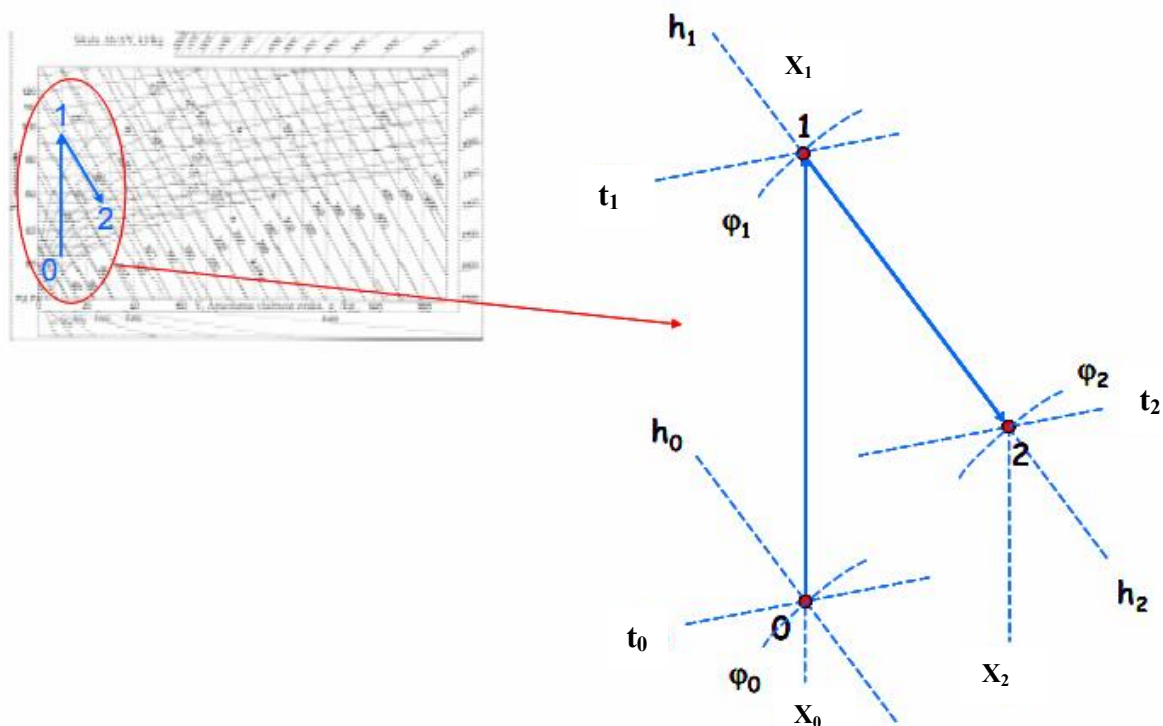
$$h = h_L + x \cdot h_w = 1,01 \cdot t + x(1,86t + 2500) \quad (15)$$

h_L - specifična entalpija suvog vazduha, kJ/kg

h_w - specifična entalpija vodene pare, kJ/kg

Stanje vlažnog vazduha se karakteriše sa tri bilo koja termodinamička parametra, koji zajedno sa brzinom strujanja definišu režim sušenja. Kako se menja stanje vlažnog vazduha pri promeni bilo kog parametra može se videti u h-x dijagramu vlažnog vazduha.

Tokom konvektivnog sušenja vlažnog materijala nezasićen vlažan vazduh je nosilac energije potrebne za zagrevanje i isparavanje vlage iz materijala. Taj isti vazduh je i primalac isparene vode. Usled toga početno stanje vlažnog vazduha će se menjati u zavisnosti od načina razmene toplote i mase vlage između učesnika procesa. Za poznati pritisak, sadržaj vlage i entalpiju vlažnog vazduha moguće je sačiniti grafički prikaz pomenutih veličina u dijagramu sa kosouglim koordinatnim osama, slika 6 (Valent, 2001).



Slika 6: Termodinamički dijagram stanja vlažnog vazduha (h-x dijagram) i grafički prikaz promena stanja vlažnog vazduha pri idealizovanom konvektivnom sušenju (Valent, 2001)

Zagrejan vazduh treba da sadrži minimalnu količinu vlage što je uslov da dođe do kvalitetnijeg sušenja proizvoda. Temperatura vazduha mora da obezbedi sušenje, ali da ne izazove pregorevanje proizvoda i nepoželjne promene na namirnici. Zagrevanjem se menja prvobitno stanje vlažnog vazduha. Promene stanja mogu se pratiti na dijagramu stanja vlažnog vazduha. Stanje okolnog vazduha je obeleženo sa 0 (t_0, x_0) što znači da je poznata temperatura i apsolutna vlažnost tog vazduha, pa se iz dijagrama može očitati i energija koju ima vazduh tog stanja, a to je h_0 . Ako se tom vazduhu dovodi neka količina toplotne energije promeniće mu se stanje, povećati temperatura i smanjiti relativna vlažnost vazduha. Temperatura vlažnog vazduha nakon zagrevanja meri se termometrom, pa se stanje 1 ($t_1, x_0 = x_1$) može naći u dijagramu tako što se iz stanja 0 povuče vertikalna do t_1 . Energija koju sada ima vlažan vazduh je viša i iznosi h_1 . Razlika energija koju je vazduh imao pre i posle zagrevanja je količina toplotne energije koja je izobarski predata vazduhu u zagrevaču:

$$q = h_1 - h_0, \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (16)$$

odnosno: $Q = H_1 - H_0 = L(h_1 - h_0), (kJ)$

Vlažan vazduh, pored ove promene, ima sposobnost da upija vlagu dok se ne zasiti. Ta osobina vlažnog vazduha koristi se prilikom svih procesa sušenja. Prolaskom kroz vlažan materijal, vazduh prima vlagu i tako povećava svoju apsolutnu vlažnost na x_2 , pa mu se menjaju veličine stanja (duž 1-2 na dijagramu, slika 6). To znači da je svaki kilogram vazduha povećao svoju sopstvenu vlažnost za $\Delta x = x_2 - x_1$. U procesu sušenja temperatura vazduha se promenila, a ako mu je količina energije ostala ista proces je idealizovan ili teorijski, tj. $h_1 = h_2 = \text{const}$ (Lj. Babić i M. Babić, 2012).

Stanje vlažnog vazduha se približno poklapa s linijom 0-1-2. Za idealnu sušnicu se pretpostavlja da se sva toplota dovedena vazduhu u predgrevaču koristi samo za isparavanje vlage iz materijala, tj. da je promena stanja vazduha u kontaktu sa materijalom adijabatska – ne menja se njegova entalpija. Tako je utrošena toplota za sušenje u idealnoj sušnici tačno jednaka razlici entalpija izlaznog i ulaznog vazduha.

Koristeći materijalni bilans vlage, očigledno je da je masa vlage koju materijal izgubi tokom konvektivnog sušenja povećala sadržaj vlage u vlažnom vazduhu pa se može napisati:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = M_U(w_1 - w_2) = L(x_2 - x_1) \quad (17)$$

gde su:

ΔW - masa izdvojene vlage, kg

W - masa prisutne vlage, kg

M_U - ukupna masa materijala, kg

w - vlažnost materijala, kg/kg

L - masa suvog vazduha, kg

x – apsolutna vlažnost vazduha, kg/kg

Jednačina materijalnog bilansa vlage pomaže nam da izračunamo potrebe suvog vazduha u sušari ako znamo koliko kg vlage želimo odstraniti iz materijala.

Utrošak toplote u realnoj sušari dobijamo kada na toplotu koja bi bila utrošena da je ona idealna dodamo toplotu utrošenu za zagrevanje materijala koji se suši, transportne opreme, zidova sušare, kao i gubitke toplote u okolinu (Valent, 2001, Pavlov i sar., 1979).

h - x dijagram takođe nam omogućuje izračunavanje utrošene toplote za sušenje materijala, množenjem potrebne količine (kg) suvog vazduha sa q i dodavanjem 10-30% od dobijene veličine na račun gubitaka toplote, imaćemo ukupne utroške toplote u sušari.

Termodinamička ravnoteža između vlažnog materijala i okolnog vazduha se uspostavlja ako je uspostavljena: termička ravnoteža (temperature materijala i vazduha su izjednačene) i difuziona ravnoteža (nema ni upijanja ni odavanja vlage).

2.1.5. PRENOS TOPLOTE I MATERIJE

Mehanizam konvektivnog načina sušenja hrane vlažnim vazduhom principijelno se može objasniti preko dve osnovne pojave (Lj. Babić i M. Babić, 2012):

- prenos toplote i mase vlage u unutrašnjosti materijala
- prenos toplote i mase vlage sa granične površine materijala i radnog medijuma (vazduha).

2.1.5.1. Prenos toplote i mase vlage u unutrašnjosti vlažnog materijala

Količina toplote koja sa toplog vazduha prelazi na graničnu površinu materijala i dalje se provođenjem prenosi ka unutrašnjosti materijala kao rezultat spontane težnje ka uspostavljanju termičke ravnoteže. Ovo provođenje toplote opisuje Furijeov zakon koji glasi (Cengel, 2002; Paunović i sar., 2010):

$$\frac{dQ}{d\tau} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (W) \quad (18)$$

$\frac{dQ}{d\tau}$ (W) - toplotni fluks predstavlja količinu toplote koja u jedinici vremena prođe

kroz neku površinu; $\lambda \left(\frac{W}{mK} \right)$ - toplotna provodljivost; $S(m^2)$ - veličina površine normalne

na pravac po kome se temperatura menja a $x(m)$ - rastojanje.

Specifični toplotni fluks ili gustina toplotnog fluksa se izražava:

$$\dot{q} = \frac{dQ}{d\tau} \cdot \frac{1}{S} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (19)$$

Ako se fluks \dot{q} definiše preko koncentracije veličine koja se prenosi onda sledi:

$$\dot{q} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dx} = -a \frac{d(\rho c_p T)}{dx} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (20)$$

gde je: $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ - gustina; $c_p \left(\frac{J}{kgK} \right)$ - specifična toplota; $a \left(\frac{m^2}{s} \right)$ - temperaturna provodljivost.

Negativan znak u predhodnim jednačinama ukazuje na smer provođenja toplote od toplije prema hladnijoj površini.

Ako sistem sadrži dve ili više različitih komponenti čije se koncentracije razlikuju od tačke do tačke u prostoru, postoji prirodna tendencija da se materija prenosi, čak i pri minimalnim koncentracijskim razlikama. Prenos jedne komponente iz područja više koncentracije prema mestu manje koncentracije naziva se prenos materije. Prenos materije može se odvijati molekularnim mehanizmom (difuzija) ili konvektivnim mehanizmom (vrtložnim). Difuzija (migracija) tečne komponente u čvrstoj sredini je jako rasprostranjena u inženjerskim procesima. Takav način prenosa je veoma spor i često predstavlja ograničavajući faktor kod mnogih separacijskih procesa (adsorpcija, apsorpcija, destilacija, ekstrakcija, sušenje, sve hemijske i biološke reakcije). Proces prenosa traje dok se u posmatranom sistemu koncentracije ne izjednače, odnosno dok se ne uspostavi ravnotežno stanje. Tipičan primer je sušenje čvrstih materijala koji u sebi imaju značajan procenat vlage (tečne komponente). Sušenje kao tehnološki postupak počiva na difuziji. Difuzija je kretanje čestica kroz materiju (Antonijević i Voronjec, 1992). Razlika koncentracija vodene pare u materijalu koji se suši i okolnom medijumu je pogonska sila sušenja. Ukoliko se prenos materije odvija uz konstantni koncentracioni gradijent govorimo o stacionarnom prenosu materije $\frac{(dc/dx)}{d\tau} = 0$, u protivnom je nestacionarni prenos materije $\frac{(dc/dx)}{d\tau} \neq 0$.

Migracija vode u kapilarno-porozno-koloidnom materijalu zavisi od potencijala prenosa vode na koji utiču forma vezivanja vode sa strukturnim elementima, gradijent temperature, gradijent vlažnosti, gradijent ukupnog pritiska, gradijent koncentracije rastvorenih komponenti u vodi, kao i biološka aktivnost. Dakle, radi se o veoma složenom fenomenu pa se čitav proces migracije vlage pojednostavljeno smatra molekulskom difuzijom

koju opisuje Fikov zakon, a koji je u analogiji sa Furijeovim zakonom provođenja toplote. Difuzioni fluks vode ili količina vode koja u jedinici vremena prođe kroz neku površinu proporcionalna je gradijentu njene koncentracije (Comaposada, 1999; Lj. Babić i M. Babić, 2012; Paunović i sar., 2010).

Fluks materije (gustina toka materije) za molekularni mehanizam prenosa (Glasnović, 2007) može se uopšteno pisati:

$$\phi = k \frac{\Delta}{x} = \text{transportni koeficijent} \cdot \frac{\text{pokretačka sila}}{\text{otpor}} \quad (21)$$

odnosno: $J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \left(\frac{kg}{sm^2} \right)$ što predstavlja Fikov zakon.

D – difuzivnost u $\frac{m^2}{s}$, zavisi od karakteristika materije u kojoj se difuzija odvija, temperature, pritiska a ponekad i od koncentracije.

c – masena zapreminska koncentracija vlage, (kg/m^3)

x - je rastojanje u smeru prenosa vlage, (m)

$\frac{dc}{dx}$ - koncentracioni gradijent vlage (promena koncentracije vlage upravno na x), $\frac{kg}{m^4}$

Negativan znak u Fikovom zakonu ukazuje na tok materije u smeru smanjenja koncentracije. Pri tome je smer gradijenta koncentracije vlage suprotan od smera gradijenta temperature.

Pokretačka sila premeštanja vlage je razlika koncentracija. Difuzija je vremenski zavisan proces. Intenzitet difuzije iskazuje se veličinom J – difuzijski fluks:

$$J = \frac{1}{S} \cdot \frac{dW}{d\tau} \quad (22)$$

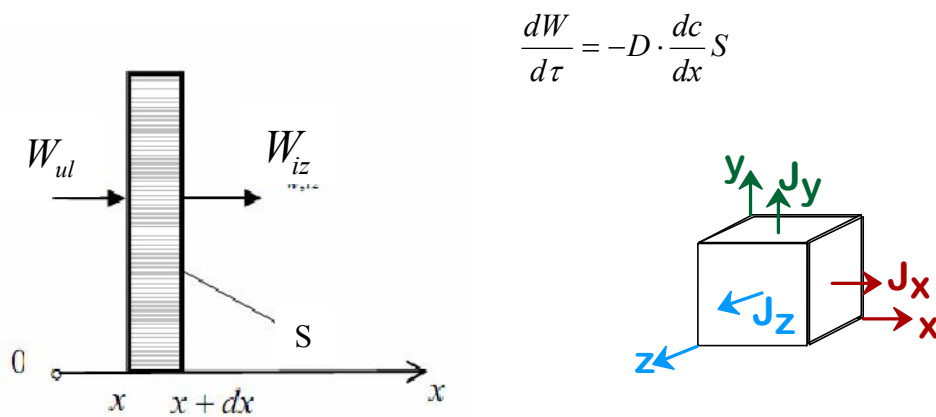
gde je: J – maseni fluks difundiranih čestica po jedinici površine i vremena u $\frac{kg}{m^2 s}$

W – masa difundiranih čestica vlage u kg

τ – posmatrano vreme difuzije u s

S - površina sloja koji je izložena sušenju u m^2 , normalna na pravac difuzije.

Usled razlike u koncentracijama doći će do prenosa materije. Ukupan maseni fluks vlage w, kroz površinu A, normalnu na pravac difuzije, u jednom pravcu dat je I Fikovim zakonom, primenjenim na porozni sloj, slika 7:



$$\frac{dW}{d\tau} = -D \cdot \frac{dc}{dx} S$$

Slika 7: Prenos materije usled razlike u koncentraciji

Većina difuzija se odvija nestacionarno, tj. tok i gradijent difuzije se menjaju s vremenom τ i udaljenošću x . Promena koncentracije u jednom smeru u funkciji vremena je opisana II Fikovim zakonom:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (23)$$

2.1.5.2. Prenos toplote i mase vlage sa granične površine materijala i radnog medijuma

Prenos toplote i mase pri strujanju fluida naziva se konvektivni prenos.

Količina toplote koju vlažan vazduh u jedinici vremena preda graničnoj površini materijala, po jedinici površine (Cengel, 2002, Paunović i sar., 2010):

$$\dot{q}_{x=0} = -\alpha(T_f - T_x) \quad (24)$$

$\alpha \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$ je koeficijent prelaza toplote

T_f i T_x (K) su temperatura vlažnog vazduha (fluida) u neporemećenoj struji daleko od mesta razmene i temperatura granične površine materijala.

Izraz (24) je pogodan za određivanje toplotnog fluksa samo kada na površini razmene ima dovoljno vlage, a to je stacionarni slučaj.

Konvektivni prenos materije uključuje prenos između fluida u kretanju i površine materijala. Ovaj način prenosa zavisi od transportnih svojstava i od hidrodinamičkih karakteristika kretanja fluida (Glasnović, 2007). Kinetička jednačina za konvektivni prenos materije analogna je Njutnovom zakonu za prenos toplote konvekcijom. Uopštena zakonitost se može napisati u obliku:

$$\phi = \beta \cdot \Delta \quad (25)$$

odnosno, fluks količine materije:

$$J = \beta \cdot \Delta c \quad (26)$$

gde je:

β - koeficijent prelaza materije, m/s , obuhvata fizička svojstva materije i uticaj uslova strujanja.

Masa vlage koja je migracijom kroz materijal došla do granične površine predaje se okolnom vlažnom vazduhu. Analogno prenosu toplote, definiše se fluks prelaza vlage sa granične površine materijala na fluid koji struji (vlažan vazduh) i obrnuto (Lj. Babić i M. Babić, 2012, Paunović i sar., 2010):

$$J = -\beta_w (c_{w,f} - c_{w,s}) \left(\frac{kg}{m^2 s} \right) \quad (27)$$

gde je: $c_{w,f}$ - masena koncentracija vlage u turbulentnoj masi fluida, $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

$c_{w,s}$ - masena koncentracija vlage na graničnoj površini materijala, $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

$\beta_w = \frac{D}{\delta}$ - koeficijent prelaza vlage, $\left(\frac{m}{s} \right)$

δ - debljina fiktivnog difuzionog graničnog sloja, (m)

Za prenos materije u gasovima umesto razlike koncentracije može se koristiti razlika parcijalnih pritisaka (pogonska sila) na granici faza pri čemu se koeficijent prelaza vlage mora preračunati:

$$p_w V = W R_w T \Rightarrow \frac{W}{V} = \frac{p_w}{R_w T} = c_w \quad (28)$$

$$\frac{dc_w}{dx} = \frac{1}{R_w T} \cdot \frac{dp_w}{dx} \quad (29)$$

Dobija se Fikov zakon za idealne gasove:

$$J = -\frac{D}{R_w T} \cdot \frac{dp_w}{dx} \quad (30)$$

odnosno:

$$J = \frac{D}{R_w T \delta} (p_{w,f} - p_{w,s}) \quad (31)$$

$$J = \beta_{w,p} (p_{w,f} - p_{w,s}) \quad (32)$$

$p_{w,f}$ - parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu, dovoljno daleko od granične površine, (Pa)

$p_{w,s}$ - parcijalni pritisak vodene pare na graničnoj površini, (Pa)

$$\beta_{w,p} = \frac{D}{R_w T \delta} - \text{koeficijent prelaza vlage, } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{Pa} \cdot \text{s}} \right) \text{ kada se kao pokretačka sila}$$

koristi razlika parcijalnih pritisaka.

Da bi se neka materija sušila mora se zagrejati do temperature pri kojoj je parcijalni pritisak vodene pare na površini sušenog materijala veći od parcijalnog pritiska vodene pare okoline. Ako je parcijalni pritisak na površini materijala jednak parcijalnom pritisku pare okoline, proces sušenja je završen.

Sušenje kao tehnološki postupak počiva na prenosu materije. Za odvijanje procesa sušenja (prenosa vlage) ne sme izostati, osim koncentracione razlike, i temperaturna razlika. Prenos materije uz prenos toplote temelj je toplotno separacijskih procesa.

2.1.6. STATIKA PROCESA SUŠENJA

Statika procesa sušenja izučava uzajamno dejstvo vlažnih materijala sa vazduhom zbog čega nastaje stanje ravnoteže, kada prestaje spoljni prenos vlage. Ako je materijal izložen dejstvu atmosferskog vazduha tokom vremena uspostaviće se dinamička ravnoteža između ta dva učesnika procesa. Ako se materija nalazi dovoljno dugo u dodiru sa vazduhom stalne temperature tokom vremena prilagodiće svoju vlagu vlazi vazduha (svojstvo higroskopnosti). Materijali koji otpuštaju ili apsorbuju vlažnost u zavisnosti od vlažnost okoline nazivaju se higroskopnim (Ginzburg, 1973).

Proces prenosa materije u definisanim uslovima pritiska, temperature, relativne vlage odvija se do postizanja ravnoteže.

Ravnotežni sadržaj vlage u materijalu zavisi od:

- njegove sposobnosti da upija vlagu – higroskopnosti
- temperature i sadržaja vlažnosti okoline

Sadržaj vlažnosti u materijalu pri različitim relativnim vlažnostima vazduha pri stalnoj temperaturi formira krivu ravnoteže sadržaja vlage ili izotermu (ad)sorpcije, ako se ona događa pri adsorpciji vlažnosti u materijal ili izotermu desorpcije pri gubljenju vlažnosti.

Sorpcijske karakteristike materijala opisuju zavisnost između sadržaja vlage nekog proizvoda i relativnog sadržaja vlage okolne sredine u momentu uspostavljanja međusobne ravnoteže pri konstantnoj temperaturi. Vrednosti ravnotežne vlažnosti materijala zavise od parcijalnog pritiska vodene pare u vazduhu, tj. od relativne vlažnosti vazduha φ . Ako se pođe od suvog uzorka i prati postepeni prijem vlage usled kontakta sa okolinom veće relativne vlažnosti (slučaj većeg parcijalnog pritiska pare sredine od parcijalnog pritiska pare na površini uzorka) vlaga će se adsorbirati, a dobijena izoterma je adsorpciona izoterma. Vlažni

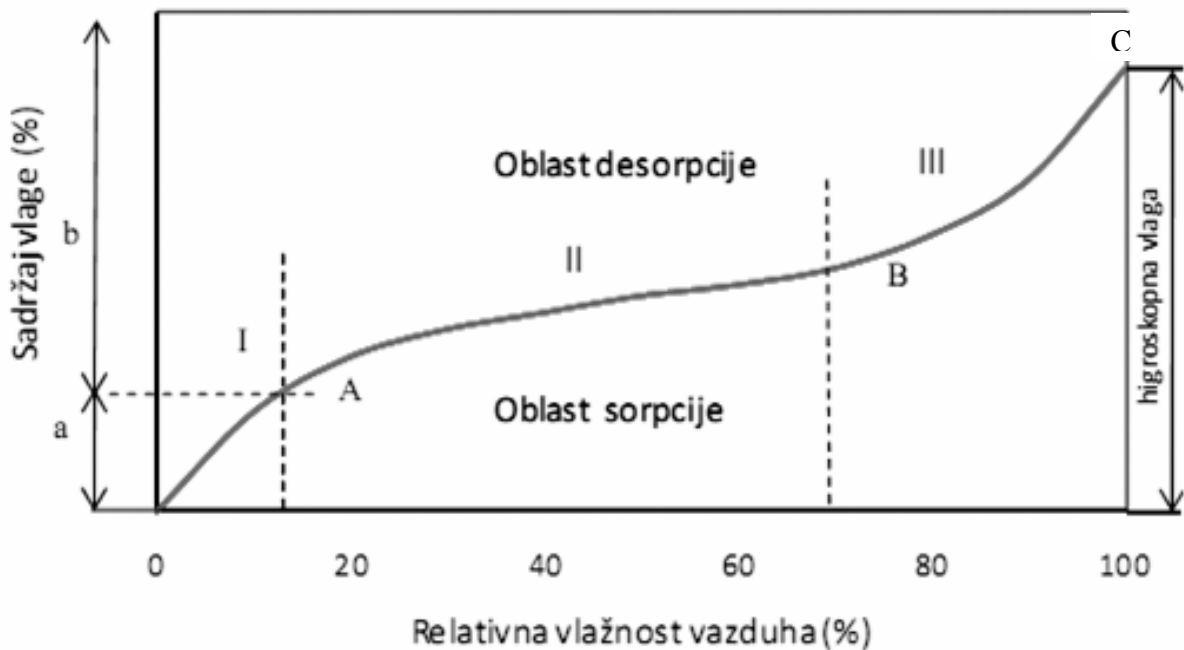
produkt će, u slučaju da se nalazi u dodiru sa sredinom male relativne vlažnosti, postepeno gubiti svoju vodu, tako da će se odigrati odgovarajuće sušenje (slučaj većeg parcijalnog pritiska pare na površini namirnice od parcijalnog pritiska pare u okolini). Kriva dobijena povezivanjem ovako određenih ravnotežnih tačaka naziva se desorpciona izoterma. Razlika između toka adsorpcionih i desorpcionih izoterma naziva se histerezis. U oba slučaja i kod prijema, i kod otpuštanja vode, prate se procesi do momenta uspostavljanja ravnotežnog stanja (izjednačavanje parcijalnih pritisaka pare na površini namirnice i u okolnom vazduhu).

Ako se na konstantnoj temperaturi menja napon vodene pare iznad namirnice menjaće se i sadržaj vlage u namirnici u skladu sa odvijanjem procesa sorpcije ili desorpcije. Vlaženje materijala nastupa kada je parcijalni pritisak vodene pare na površini materijala manji od parcijalnog pritiska vodene pare u okolnom vazduhu (sorpcija). Isparavanje vlage iz materijala (desorpcija) nastupa kada je parcijalni pritisak vodene pare na površini materijala veći od parcijalnog pritiska vodene pare u okolnom vazduhu. Sorpciona izoterma se dobija tako što se postepeno, počev od suvog vazduha ($\varphi = 0$) menja relativna vlažnost vazduha konstantnog pritiska i temperature. Za svaku relativnu vlažnost vazduha meri se masa uzorka i iz razlike masa vlažnog i suvog uzorka određuje ravnotežna vlažnost za tu relativnu vlažnost vazduha.

Za koloidno kapilarno porozne materijale izoterma sorpcije ima oblik slova S. Na krivoj se mogu locirati tri karakteristične tačke: A, B i C, koje izotermu dele na tri karakteristične oblasti u kojima se razlikuju mehanizmi sorpcije (slika 8). Kriva počinje nulom, što odgovara apsolutno suvom proizvodu, a završava se vrednošću relativne vlažnosti vazduha od 100% što odgovara maksimalno mogućem sadržaju vlage u namirnici.

Oblast I predstavlja monomolekularni sloj (monosloj = monolayer), praktično vezane vlage koja se uobičajenim sušenjem ne odstranjuje i koja ne učestvuje u bilo kakvim reakcijama (a). Voda koja uslovljava vlažnost u oblasti II je „labavo“ vezana, odnosno predstavlja polimolekulski sloj (multilayer) vode – usled polarnosti molekula vode – slabim silama vezana za monosloj. U oblasti III voda se nalazi u makrokapilarama i relativno lako može da učestvuje u raznim reakcijama (ima osobine vode u pravom smislu reči). Dakle, voda iz oblasti II i III (b) može da se odstrani sušenjem. Granica između oblasti II i III predstavljena je tačkom B i odnosi se na ravnotežnu vlažnost materijala koja uslovljava aktivnost vode između 0,6 i 0,75. To je uobičajena granica do koje se većina namirnica suši (Vereš, 1991).

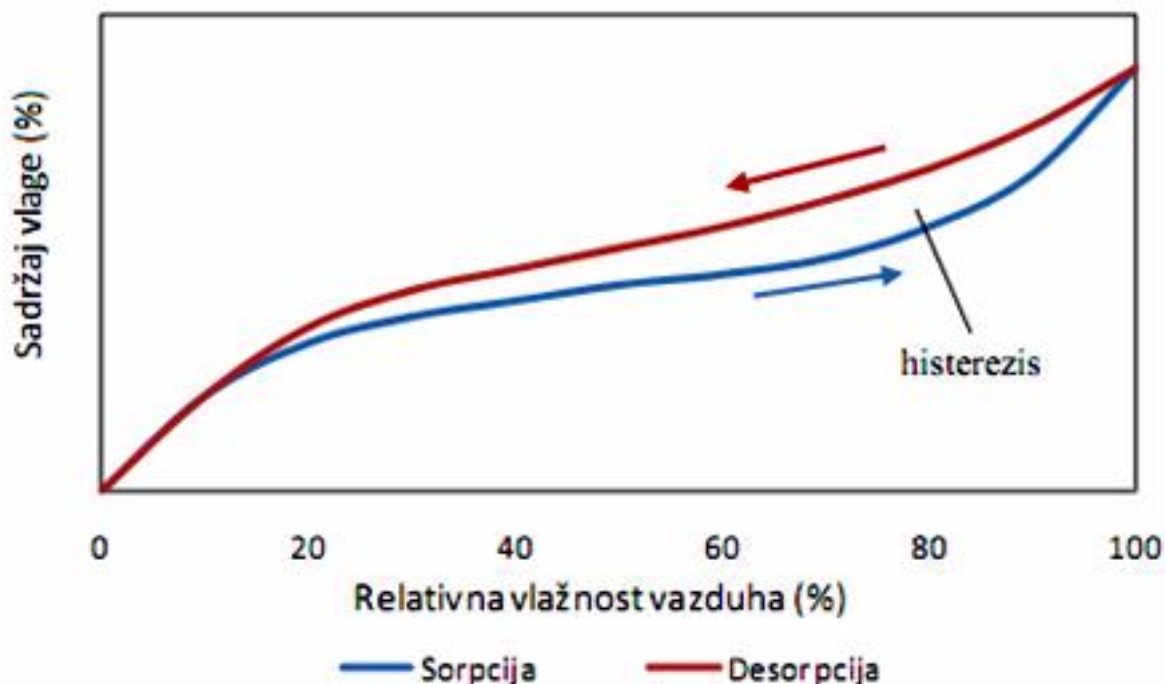
Može se videti da porastom temperature i smanjenjem relativne vlažnosti opada ravnotežni sadržaj vlage.



Slika 8: Izgled sorpcione izoterme neke namirnice (sadržaj vlažnosti u materijalu u zavisnosti od relativne vlažnosti vazduha): do tačke A jako vezana voda, do tačke B umereno vezana voda, do tačke C vodena otopina-slobodna voda

Sorpciona izoterma može da se formira tako što se prati proces sorpcije (adsorpcija), tj upijanje vlage ili da se meri suprotan proces desorpcije, odnosno isušivanje. Kao što se na slici 8. vidi, izuzimajući područja u kojima je relativna vlažnost vazduha približno 0 i približno 100, izoterma sorpcije se poklapa sa izotermom desorpcije. Za datu temperaturu vazduha, između krivih sorpcije i desorpcije nalazi se površina histerezisa (slika 9). Nepoklapanje izotermi sorpcije i desorpcije posledica je složenih, i različitih, procesa vezivanja molekula gasovite faze vode za strukturne elemente čvrstog vlažnog materijala, kao i njenog preobražavanja u tečnu fazu u porama materijala. Složenost ove pojave proizilazi iz obrazovanja monomolekularnog ili polimolekularnog sloja vlage po unutrašnjosti pora. U odnosu na izotermu sorpcije, izoterma desorpcije, odgovara manja relativna vlažnost vazduha za odabrani ravnotežni sadržaj vlage (Valent, 2001).

Zavisnost između sadržaja vlage nekog proizvoda i relativnog sadržaja vlage okolne sredine u momentu uspostavljanja međusobne ravnoteže pri konstantnoj temperaturi prikazuju sorpcione izoterme. Grafički prikaz sorpcione izoterme se dobija povezivanjem niza tačaka izmerenih sadržaja vlage namirnice kod uspostavljene ravnoteže sa okolinom poznate relativne vlažnosti.



Slika 9: Krive izotermi sorpcije i desorpcije

Eksperimentalna je činjenica da se sorpciona i desorpciona izoterma ne poklapaju pri čemu je desorpciona izoterma iznad sorpcione (slika 9), odnosno za jednu istu relativnu vlažnost vazduha, izuzimajući $\varphi = 0$ i $\varphi = 1$, daje veći ravnotežni sadržaj vlage nego adsorpciona izoterma. Dakle postoji histerezis i površina ograničena adsorpcionom i desorpcionom izotermom naziva se površina histerezisa (Valent, 2001; Vereš, 1991). Ova pojava se može objasniti promenom strukture materijala. Na primer, primanjem vlage skrob bubri, dok se otpuštanjem vlage bubrenje smanjuje.

Za svaku temperaturu materijala formira se posebna izoterma. Porastom temperature i smanjivanjem relativne vlažnosti vazduha opada ravnotežni sadržaj vlage. Povezivanjem izoterme jednog materijala na određenoj temperaturi može da se izračuna sadržaj vlage na nekoj drugoj temperaturi. Generalno posmatrajući, sa porastom temperature skladištenja pri istoj relativnoj vlazi vazduha smanjuje se sadržaj vlage u namirnici. S obzirom da sorpciona izoterma predstavlja zavisnost ravnotežne vlage namirnice i ralativne vlažnosti okolnog vazduha ona u praksi može višestruko da posluži za definisanje: granice sušenja namirnice, promene sadržaja vlage namirnice pod određenim uslovima temperature i vlažnosti vazduha, materijala za pakovanje i uslova skladištenja koji će sprečiti mikrobiološko kvarenje (Vereš, 1991).

Izoterme adsorpcije i desorpcije imaju veliko značenje u tehnologiji procesa sušenja. Korišćenjem elemenata sorpcionih izotermi formiraju se zaključci o ponašanju odgovarajućih namirnica, na osnovu kojih se mogu postaviti konkretni uslovi sušenja, pakovanja i čuvanja.

2.1.7. KINETIKA PROCESA SUŠENJA

Sušenje je tehnološka operacija čija je suština uklanjanje dela vode iz čvrste materije isparavanjem. Termički proces sušenja praćen je s dve istovremene pojave: prenosom toplote potrebne za isparavanje vlage i prenosom vlage iz materijala u okolnu sredinu. (Sušenje je simultana operacija razmene toplote i mase koji je praćen promenama faze). Predaja toplote materijalu pri sušenju ostvaruje se pri neposrednom dodiru sa zagrejanim vazduhom. Prenos materije (vlage) iz vlažnog materijala je najvažniji je proces tokom sušenja, a mehanizmi prenosa zavise od veličine, oblika i položaja čestica unutar čvrstog materijala i od lakoće kojom se tečnost i para mogu kretati kroz unutrašnjost materijala prema površini (Ginzburg, 1973).

Ciklus sušenja materijala koji se provodi prema određenom režimu sastoji se iz više faza. U sušari se proizvodi cirkulacija toplog vazduha, koji dolazi u dodir s vlažnim materijalom. Toplota se prenosi konvekcijom sa vazduha na materijal i prelazi u latentnu toplotu tokom isparavanja. Usled razlike parcijalnih pritisaka pare okolnog vazduha i površine materijala dolazi do prenosa vlage u okolnu sredinu (spoljašnja difuzija). Na taj način nastaje razlika koncentracije vlage u samom materijalu što uslovljava prenos vlage unutar materijala, od centra prema perifernim slojevima (unutrašnja difuzija). Mehanizam unutrašnje difuzije je veoma složen. To nije prosto kretanje vlage u sistemu para i kapilara proizvoda, već vrlo kompleksan proces prelaza molekula vode iz jednog hidracionog stanja u drugi sloj manje koncentracije. Složena unutrašnja difuzija vlage može se na zadovoljavajući način opisati pomoću Fikovog zakona.

Kinetika procesa razmatra karakter odvijanja procesa sušenja u vremenu. Prati se gravimetrijskom metodom, tj. merenjem promene mase vlažnog materijala tokom sušenja ili psihrometrijskom metodom, tj. praćenjem stanja vazduha merenjem dve veličine (temperatura i relativna vlažnost vazduha).

Toplota potrebna za isparavanje vlage, dovodi se kroz granični sloj i računa se prema izrazu:

$$\dot{Q} = \frac{dW}{d\tau} \cdot r_w = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad (33)$$

Masa isparene vode može se izraziti preko količine dovedene toplote koja se dalje može izjednačiti sa osnovnom kinetičkom jednačinom za proces prenosa materije.

Dalton je eksperimentima pronašao da je količina vode koja ispari s neke površine proporcionalna razlici pritisaka pare u blizini granične površine i daleko od nje, prema izrazu:

$$-\frac{dW}{d\tau} = \beta_{w,p} (p_{w,s} - p) \cdot S \quad (34)$$

Za primenu h-x dijagrama na ove pojave prikladnije je računati sa sadržajem vlage vazduha x nego sa pritiskom pare. U tu svrhu piše se prema Lewisy:

$$-\frac{dW}{d\tau} = \beta_{w,x} (x_s - x) \cdot S \quad (35)$$

Količina vlage koja prolazi kroz granični sloj između vazduha i vlažnog materijala proporcionalna je razlici parcijalnih pritisaka na granici faza, tj. približno je jednaka razlici vlažnosti na granici faza:

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot S \cdot \Delta T}{r_w} = \beta_{w,p} \cdot S \cdot \Delta p = \beta_{w,x} \cdot S \cdot \Delta x \quad (36)$$

$$\beta_{w,x} \cdot S \cdot (x_i - x) = \frac{\alpha \cdot S \cdot \Delta T}{r_w} \Rightarrow x_i - x = \frac{\alpha}{r_w \cdot \beta_{w,x}} \Delta T \Rightarrow x_i - x = \beta_s (T_f - T_x) \quad (37)$$

gde su:

\dot{Q} - toplota razmenjena u jedinici vremena, W

$\frac{dW}{d\tau}$ - isparena količina vode u jedinici vremena, kg/s

r_w - latentna toplota isparavanja vode na određenoj temperaturi, J/kg

α - koeficijent prelaza toplote, W/(m²K)

$\beta_{w,x}$ - koeficijent prelaza mase, kg/(m²s)

S - površina isparavanja, m²

ΔT - razlika temperatura vazduha i površine materijala (pokretačka sila prenosa toplote), K

x_s - ravnotežna vlažnost vazduha, kg/kg_{sv}

x - vlažnost vazduha, kg/kg_{sv}

Koeficijenti prelaza mase $\beta_{w,p}$ i $\beta_{w,x}$ imaju drugačije vrednosti i drugačije jedinice, zavisno od toga na koji način je izražena pokretačka sila procesa.

Prethodni izrazi važe za period konstantne brzine sušenja, ako je pokretačka sila prenosa mase Δp i prenosa toplote ΔT konstantna.

Brzina sušenja $\left(\frac{dw}{d\tau}\right)$ zavisi od veličine mokre površine S , od razlike parcijalnih pritiska na granici faza, $p_{w,s}$, i u glavnoj masi vazduha, $p_{w,f}$, i od koeficijenta prenosa vlage, $\beta_{w,p}$.

Faktori koji utiču na debljinu difuzijskog sloja utiču i na koeficijent prelaza mase $\beta_{w,x}$ i na koeficijent prelaza toplote α , pa je β_s nezavistan od brzine strujanja, tako da razlika temperatura zavisi samo od vlažnosti vazduha.

Pretpostavlja se da će koeficijent prenosa vlage biti proporcionalan 0,8-joj potenciji masene brzine $[v \cdot \rho (m \cdot s^{-1} kg \cdot m^{-3} = kgm^{-2}s^{-1})]$.

Sherwood je dokazao ovu pretpostavku i izraz za izračunavanje:

$$k = 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot (v \cdot \rho)^{0,8} \quad (38)$$

Za praktične potrebe može se pretpostaviti da je u celoj periodu padajuće brzine sušenja ta brzina u svakom momentu proporcionalna sadržaju slobodne vlažnosti u materijalu:

$$\frac{dw}{d\tau_p} = -k(w - w_R) \quad (39)$$

Integraljenjem predhodne jednačine:

$$\int_{w_k}^w \frac{dw}{w - w_R} = -\beta_{w,x} \cdot \int_0^{t_p} d\tau_p \quad \text{odnosno} \quad \ln \frac{w_k - w_R}{w - w_R} = \beta_{w,x} \cdot \tau_p \quad (40)$$

w_R - **ravnotežna vlažnost** je sadržaj vlage u materijalu u ravnoteži sa smešom vazduha i vodene pare datog pritiska i temperature

w_k - **kritična vlažnost** je vlažnost materijala kod koje brzina sušenja počinje opadati pri stalnim spoljnim uslovima

$w - w_R$ - **slobodna vlažnost** predstavlja sadržaj vlage u materijalu veći od ravnotežnog koji se može ukloniti sušenjem.

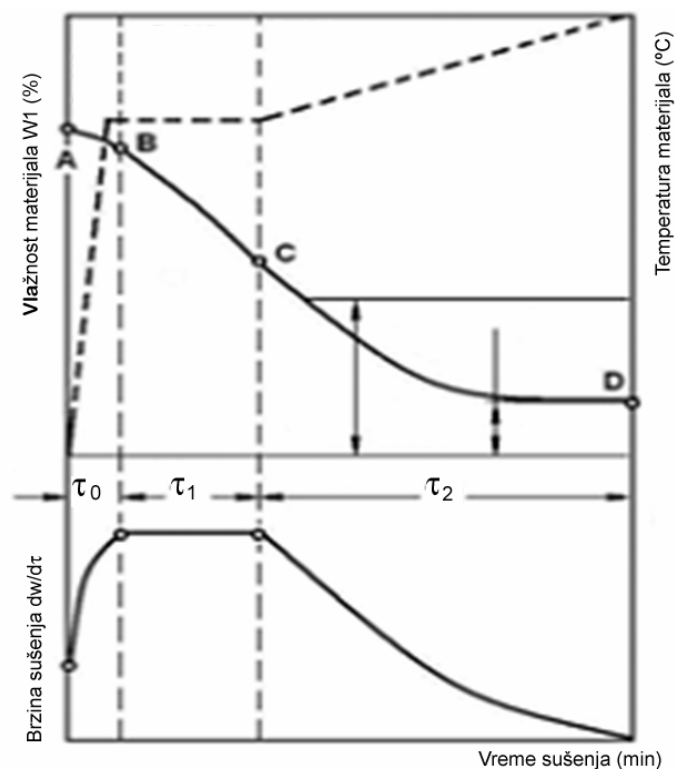
Brzina sušenja u fazi padajuće brzine zavisi od debljine sušenog proizvoda, jer brzina sušenja opada s putom što ga mora preći voda unutar materijala.

Operacija sušenja se eksperimentalno prikazuje kao grafik zavisnosti brzine sušenja, vlažnosti i temperature materijala (na ordinati) i vremena (na apcisi).

Proces sušenja se analizira razmatranjem:

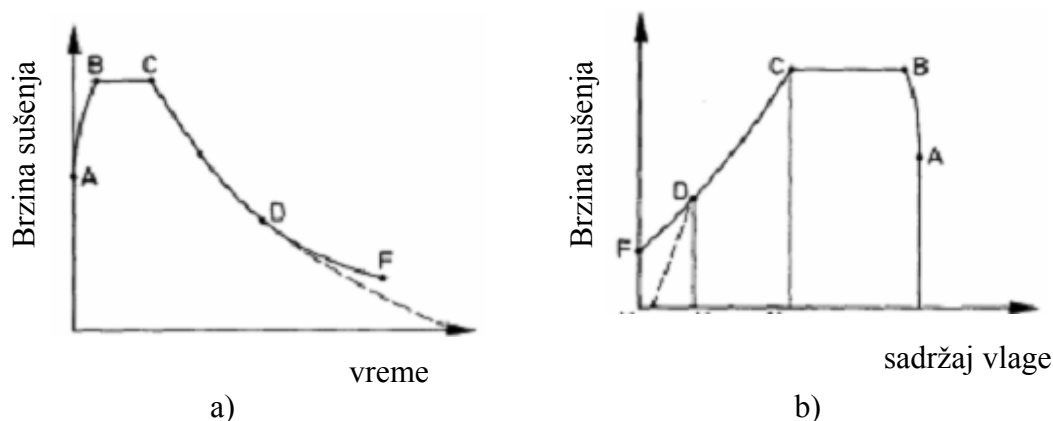
- krive sušenja - promena vlažnosti materijala tokom sušenja
- krive brzine sušenja – zavisnost između brzine sušenja i vlažnosti materijala
- temperaturske krive – zavisnost između temperature i vlažnosti materijala

Brzina sušenja posmatra se pod stalnim uslovima i definiše se količinom vode koja isparava s njegove površine u jedinici vremena, pri čemu se pod stalnim uslovima podrazumeva: temperatura, relativna vlaga i brzina strujanja vazduha. Promenljiva je i menja se vremenom. Najbolji intenzitet isparavanja vlage i snižavanje vlažnosti materijala ostvaruje se u prvoj polovini vremena sušenja, zatim se proces odstranjivanja vlage usporava, slika 10.



Slika 10: Krive promene brzine sušenja, vlažnosti i temperature materijala pri konstantnim uslovima sušenja (Petrović, 2009.)

Osim prikazanih krivih često se kinetika opisuje i promenom brzine sa sadržajem vlage materijala, slika 11b.

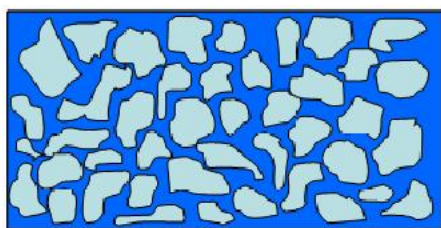


Slika 11: Grafički prikaz zavisnosti brzine sušenja od: a) vremena b) sadržaja vlage

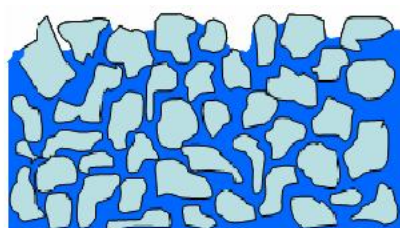
Prateći krive sušenja vazduhom pod kontrolisanim uslovima okoline, jasno se mogu uočiti tri osnovna perioda sušenja:

- **Period stabilizacije – zagrevanja**, koju karakteriše brzo povećanje temperature materijala i brzine sušenja do maksimuma pri neznatnoj promeni njegove vlažnosti (deo AB). Dužina intervala je mala i zavisi od krupnoće materijala i temperature tela koje odaje toplotu.
- **Period konstantne brzine sušenja** – koja nastaje pri dostizanju maksimalne brzine sušenja. Brzina sušenja ostaje stalna, jednaka je isparavanju vlage sa slobodnih površina i zavisi samo od uslova sušenja – temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vazduha. Vлага se u materijalu linearno smanjuje (deo BC), sve dok brzina dovodenja vlage iz unutrašnjosti materijala osigurava potpuno mokru spoljnu površinu. Površina materijala je pokrivena tankim slojem vode, sto sprečava naglo isušivanje. Temperatura materijala ostaje stalna i približno jednaka temperaturi mokrog termometra. Tačka C odgovara kritičnom sadržaju vlage, nakon kojeg započinje faza padajuće brzine sušenja. Kritični sadržaj vlage je utoliko veći što je veća brzina sušenja, manja debljina materijala i veći prečnik pora.
- **Period opadajuće brzine sušenja** – period usporenog sušenja koja traje do postizanja ravnotežnog sadržaja vlage s okolinom pri definisanim procesnim uslovima (interval CD na dijagramu). Zbog usporenog dovoda vode iz unutrašnjosti brzina sušenja opada pri stalnoj temperaturi suvog termometra (temperatura u sušari). Temperatura površine materijala je veća od temperature vlažnog termometra i tokom sušenja brzo raste približavajući se temperaturi vazduha u sušari. Formira se čvrsta površina i smanjuje se stepen difuzije vode iz unutrašnjosti.

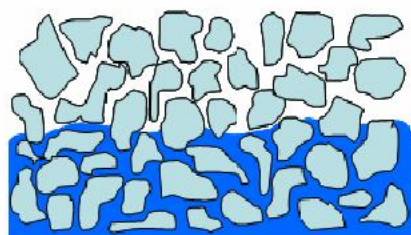
Stanje materijala tokom pojedinih perioda sušenja prikazano je na slici 12 .



period konstantne brzine sušenja



prvi period opadajuće brzine sušenja



drugi period opadajuće brzine sušenja

Slika 12: Stanje materijala tokom pojedinih perioda sušenja (Sander 2011)

Trajanje sušenja zavisi od uslova temperature i vlažnosti predmeta sušenja i okoline i od prenosa vlage kroz materijal (zavisno od gradijenta pritiska, koncentracije, temperaturnom gradijentu, difuziji i kapilarnom toku).

Na brzinu i dužinu sušenja materijala utiče priroda materijala, količina vlažnosti koju odstranjujemo, krupnoća materijala, debljina sloja, intenzitet sušenja, temperatura, vlažnost i brzina kretanja vazduha i konstrukcija aparata za sušenje.

Termodinamička ravnoteža između vlažnog materijala i okolnog vazduha se uspostavlja ako je obezbeđena:

- termička ravnoteža (temperature materijala i vazduha su izjednačene) i
- difuziona ravnoteža (nema ni upijanja ni odavanja vlage)

Obzirom da dehidratacija u velikoj meri utiče na teksturu, boju kao i gubitak lako isparljivih komponenata, koje najčešće i određuju kvalitet i prehrambenu vrednost proizvoda (voća i povrća) veoma je važan pravilan izbor opreme i pravilno određivanje procesa sušenja.

2.1.8. VRSTE UREĐAJA ZA KONVEKTIVNO SUŠENJE

Operacija sušenja izvodi se u sušarama, obzirom da uslovi sušenja moraju biti kontrolisani. Sušenje u zatvorenom kontrolisanom prostoru (veštačko sušenje) primenjuje se u industrijskoj preradi, gde se za sušenje koristi električna energija, para ili gas kao energent. Prinudnim strujanjem toplog vazduha pod uticajem ventilatora oduzima se vlaga iz sušenog materijala. Da bi sušenje bilo korektno izvedeno, potrebno je da vazduh bude (Ginzburg, 1973):

- zagrejan do određene temperature
- da konstantno struji.

Izbor sušare podrazumeva prethodno jasno koncipirane zahteve u pogledu postizanja kvaliteta sušenja, kao i potrošnje energije. Da bi se materija sušila potrebno je u uređajima određenim postupcima delovati na materiju (zagrevati, hladiti), zato je u proces potrebno dovoditi različite oblike energije (toplotnu, mehaničku ili električnu) ili ih izvoditi iz procesa.

Zajedničke karakteristike sušara:

- da imaju odgovarajući prostor za smeštaj materije koja se suši
- da raspolažu aparatima za zagrevanje
- da obezbeđuju kontinualno dovođenje toplote i odvođenje vlage koja se oslobađa u toku sušenja.

S obzirom na veliki broj namirnica, njihovih različitih svojstava i sastava, teško je napraviti podelu i svrstati postupke sušenja u određene tipove. Veliki broj različitih tipova

sušenja napravljeni su tako da su specifični za određenu namirnicu ili grupu namirnica (Mujić i Alibabić, 2005).

Ako se uz različite vrste materijala koji se suše uzmu u obzir i ostale karakteristike procesa sušenja (veličina proizvoda (od mm do desetak cm); poroznost materijala (0-99.9%); vreme sušenja (od 0.25 s do 5 meseci); kapacitet proizvodnje (od 0.1 kg/h do 100 t/h), brzina strujanja (od 0 – 2000 m/s); temperatura (od ispod trojne tačke do iznad kritične tačke tečnosti); pritisak (od mbara do 25 bar); način dovođenja toplote, očito je da danas postoji veliki broj sušara različitih tehničkih rešenja (Sander, 2011.)

Sušare mogu biti različitih veličina i oblika, pri čemu se razlikuju:

1) prema načinu rada :

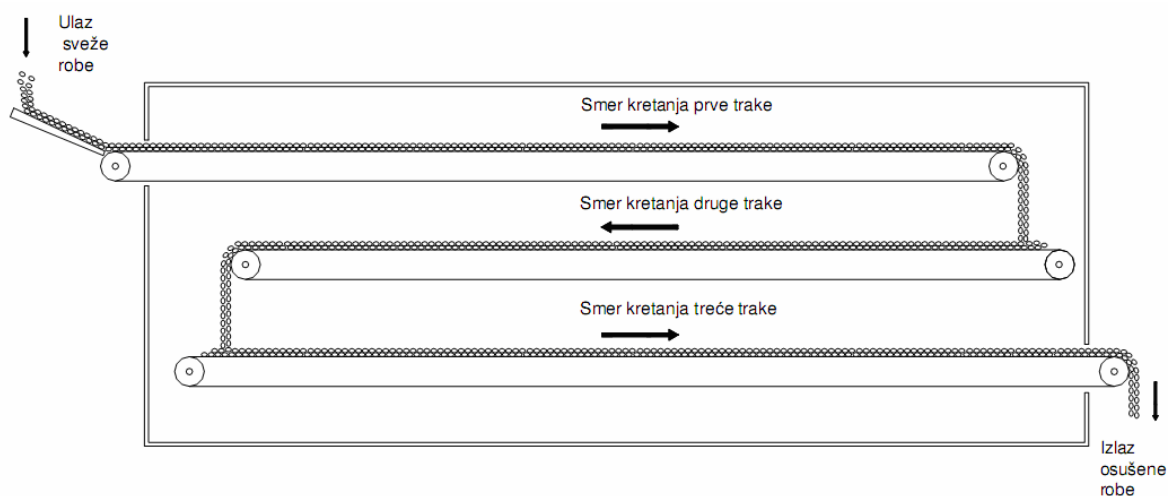
- kontinuirane – materijal i agens sušenja nalaze se u stalnom pokretu
- šaržne – kroz nepokretni sloj materijala potiskuje se agens sušenja

2) prema načinu prenosa toplote:

- konvektivne
- konduktivne
- specijalne sušare

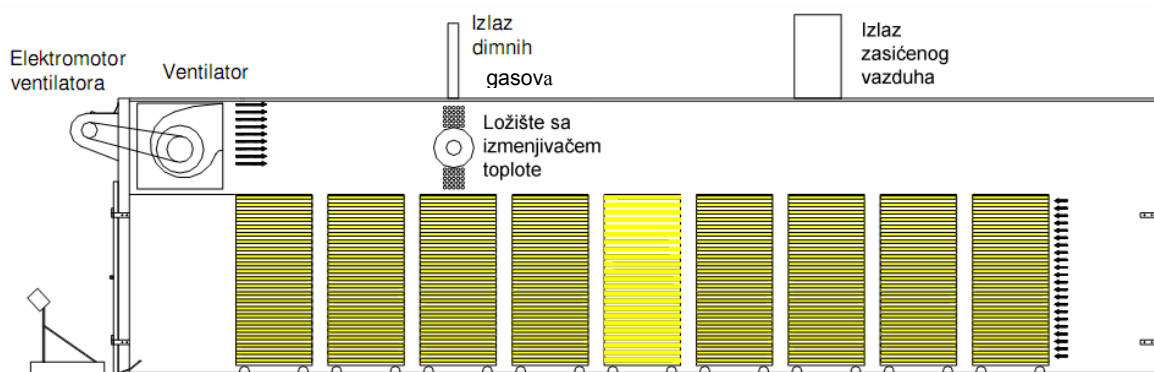
prema obliku, vrsti agensa sušenja i drugim tehnološkim i konstrukcijskim karakteristikama.

U industrijskoj praksi najčešće su u upotrebi konvektivne i konduktivne sušare, takve konstrukcije da se materijal nalazi u sloju, pri čemu sloj može da se kreće (trakaste) ili da je nepokretan (komorne). Sušenje voća i povrća u industrijskim sušarama - većeg kapaciteta se danas najčešće provodi u kontinualnim sušarama sa trakama. Materijal se nalazi na perforiranim trakama koje se pomiču za vreme sušenja i pada sa viših na niže trake, slika 13 (Velić, 2008).



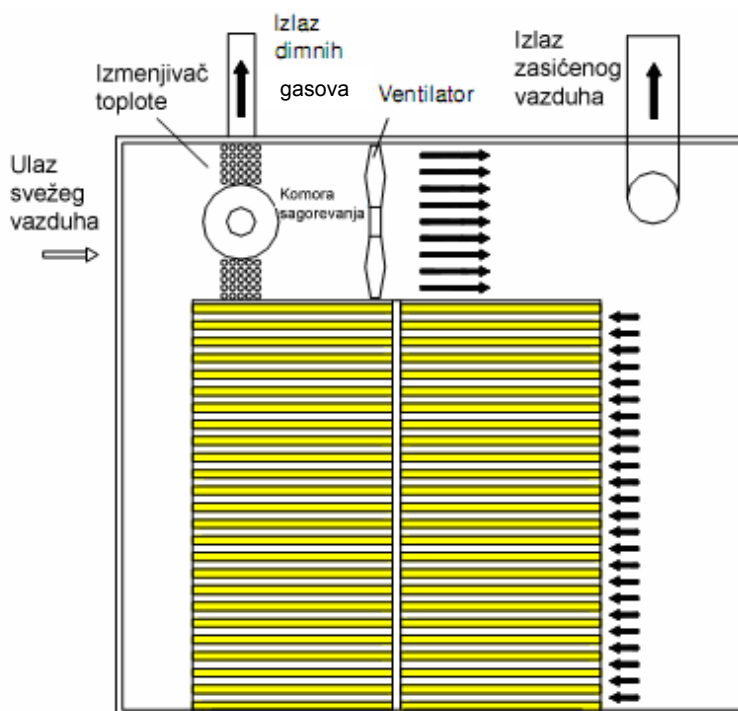
Slika 13: Šema rada trakaste sušare (Velić, 2008)

Upotrebljavaju se i tunelske sušare za srednje kapacitete. Materijal se nalazi na lesama umetnutim u kolica koja se periodično pomiču za vreme sušenja, slika 14 (Velić, 2008).



Slika 14: Šema rada tunelske sušare (Velić, 2008)

Za manje kapacitete koriste se komorne sušare sa lesama. Materijal se nalazi na lesama umetnutim u sušaru i ne pomiče se za vreme sušenja, slika 15 (Velić, 2008).



Slika 15: Šema rada komorne sušare (Velić, 2008)

U ovim uređajima za konvektivno sušenje se upotrebljava zagrejani vazduh, a relativna vlažnost zagrejanog vazduha je najkritičniji parametar koji utiče na uspešan proces sušenja. Zbog ekonomičnosti postupka i kvaliteta finalnog proizvoda važan je i pravilan izbor temperaturskog režima i rekuperacija toplote (recirkulacija vazduha, ugradnja izmenjivača, toplotne pumpe ...). Sledeći važan parametar je opterećenje sušare, odnosno masa materijala po jedinici površine trake ili lese (visina sloja). U zavisnosti od vrste materijala koji se suši

najčešće se stavlja 5-15 kg na kvadratni metar trake ili lese. Veštačko sušenje odvija se u savremenim uređajima, gde se oponašaju i poboljšavaju prirodni uslovi sušenja pri čemu je bitno delovanje toplote i strujanje vazduha.

Postoje različita tehnička rešenja sistema za sušenje, od najjednostavnijih u kojima se obavlja proces direktnog sušenja do visoko automatizovanih sistema u kojima se unapred definišu svi parametri procesa sušenja (Živković, 2006)

Izdvajanje vode iz bioloških materijala je kompleksan proces koji troši veliku količinu energije. Sa polazišta udela energije u ukupnom energetskom bilansu sušenje je na samom vrhu, što je praćeno visokim troškovima. Utrošak energije za sušenje je velik, pa se svakoj uštedi energije pridaje važnost, jer se samo tako može dobiti proizvod niže cene odnosno veće konkurentnosti.

Izbor uređaja za sušenje i njegovo projektovanje moraju biti takvi da se postigne što povoljniji odnos kvaliteta i cene proizvoda. S ekonomskog gledišta sušenje je energetski vrlo skup i ekološki nepovoljan proces. Od ukupne svetske energetske potrošnje u industriji na proces sušenja otpada 10 do 20%. Energija predstavlja važnu stavku u ceni proizvoda. Postojeće stanje na tržištu energenata, sa sve skupljim fosilnim gorivima, kao i tendencije zaštite životne sredine, nameću potrebu promene tehnologije sušenja. Radi ekonomske opravdanosti, sušenje kao energetski zahtevnu operaciju, treba provesti u što kraćem vremenu, uz što manji utrošak energije i uz ispunjenje primarnog cilja – dobijanje kvalitetnog suvog proizvoda s produženim vekom trajanja. Iz navedenih razloga važno je poznavati toplotna svojstva materijala i mehanizme prenosa toplote, kao i velika potreba za smanjenjem troškova energije što doprinosi i očuvanju okoline. Sistem racionalizacije sastoji se u rekuperaciji otpadne toplote iz sušare što dovodi do povećanja termičkog stepena iskorišćenja sušare.

Za zagrevanje vazduha troše se velike količine toplote, a vlažni i topao vazduh ispušta se u atmosferu. Gubici u toploti se mogu znatno smanjiti ako se upotrebljeni vazduh (vlažan i topao) ne ispušta u spoljnu atmosferu već se iskoristi toplota koju vazduh na izlazu iz sušare sadrži. Metode uštede energije, kod konvencionalnih sušara, koje su ujedno i ekološki povoljne su (Lj. Babić i M. Babić, 2012):

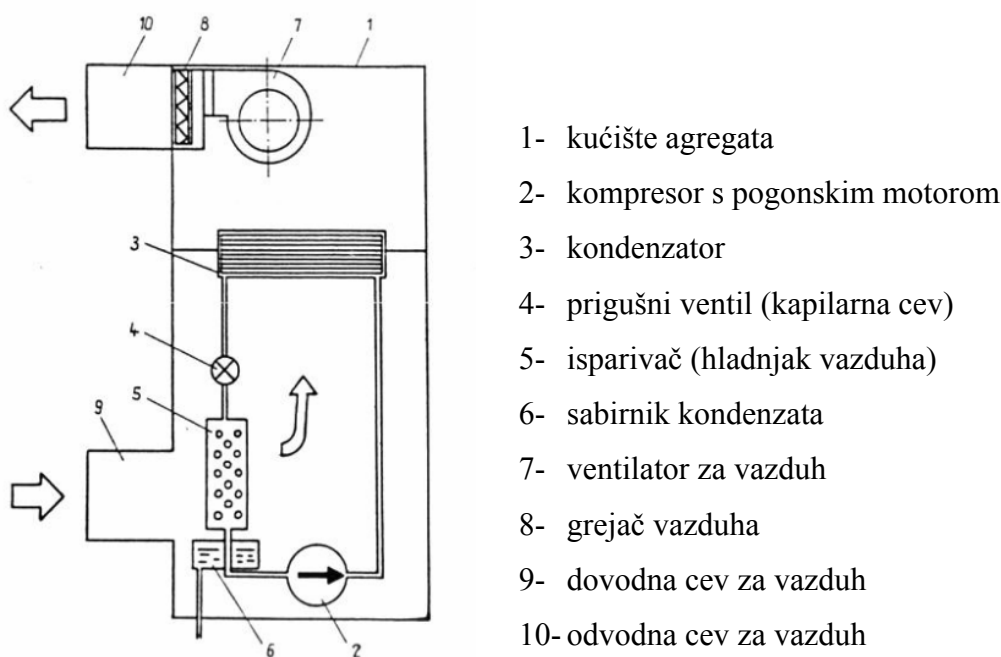
Postavljanje toplotne izolacije - ostvaruje se značajno smanjenje toplotnih gubitaka u odnosu na neizolovani sušionik.

Mogućnost rekuperacije toplote – optimizacija procesa provedena je rekuperacijom toplote ukupnog izlaznog vazduha koji u predgrejaču predaje toplotu svežem ulaznom vazduhu, što je donelo značajnu uštedu utroška energije za isti proizvodni kapacitet. Upotrebljeni vazduh propušta se kroz predgrejače i iskoristi se njegova fizička toplota tako da

se manje energije troši u grejaču. U okolinu se ispušta ohlađeni vazduh manje apsolutne vlažnosti. Na ovaj način moguće je ostvariti uštedu energije od 15%.

Mogućnost recirkuliranja vazduha – recirkulacijskim cevovodom deo toplog i vlažnog vazduha vraća se u proces sušenja mešajući se sa svežim vazduhom pri čemu se hladi i odvlažuje. Nastala smeša ima višu temperaturu u odnosu na sveži vazduh, tako da se u grejaču troši manje energije za zagrevanje. Ušteda energije (oko 10%) je nešto manja obzirom da vazduh ima nešto veću apsolutnu vlažnost pa je manja pokretačka sila (razlika parcijalnih pritisaka) za proces prenosa materije.

Upotreba toplotnih pumpi – primenom sušare podržane radom toplotne pumpe velika količina energije može biti uštedena (čak do 65%). Toplotna pumpa kondenzacijom-hlađenjem toplog vazduha i vlage u njemu vazduh ohladi i osuši. Hlađenjem vlažnog vazduha oslobađa se senzibilna i latentna toplota koja se zadržava unutar komore za sušenje i koristi se za zagrevanje ohlađenog vazduha koji se oslobodio dela vlage tako da je ponovo sposoban za sušenje, slika 16 (Novak, 2008). Upotreba toplotnih pumpi obećava ekonomski i ekološki benefit i veliki broj istraživanja se bavi njihovom primenom u sistemima sušenja, međutim do njihove masovnije upotrebe na farmama i u industriji još uvek nije došlo uprkos uložnim naporima i promovisanju.

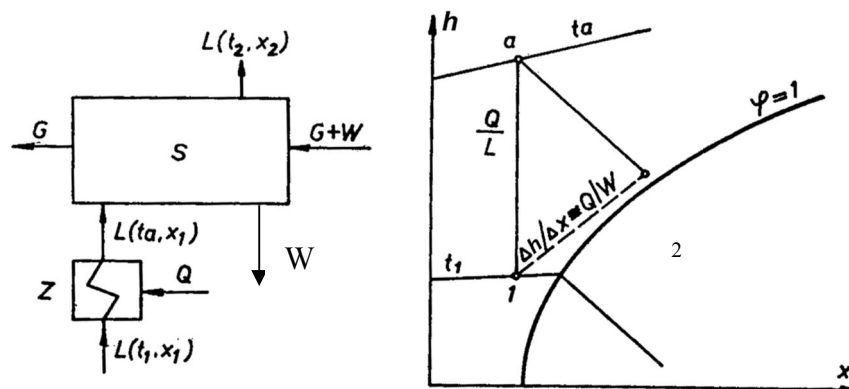


Slika 16: Kondenzacijski agregat (Novak, 2008)

Energetski efikasne tehnologije sušenja su svakodnevno aktuelna tema što potvrđuje i obimna literatura koja je usko povezana sa sušenjem, projektovanjem i izgradnjom sušara i energetskim aspektima sušenja.

2.1.9. TERMIČKI PRORAČUN UREĐAJA ZA KONVEKTIVNO SUŠENJE – BILANS MASE I ENERGIJE

Rad sušare se može predstaviti u h-x dijagramu. Iako je proces u sušari najbliži ishlapljivanju vlage, može se približno tretirati kao mešanje vode i vazduha uz dovođenje toplote. Ovako se problem znatno pojednostavljuje a dobijeni rezultati biće dovoljno tačni za tehničke proračune. Pojednostavljenje se sastoji u zaobilaženju pojedinih faza samog procesa, pri čemu se bilansnim jednačinama obuhvataju samo ulazne i izlazne veličine stanja koje imaju odgovarajući uticaj na izgled postrojenja. Kako se menja stanje vlažnog vazduha pri promeni bilo kog parametra može se videti u h-x dijagramu vlažnog vazduha (slika 17). U procesu sušenja parametri i svojstva vlažnog vazduha se stalno menjaju (Nedeljkov i Stakić, 1994).

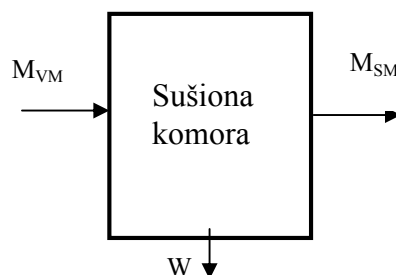


Slika 17: Šema idealizovane adijabatske sušare i skica procesa u h-x dijagramu za vlažan vazduh

Materijalni bilans sušare:

Osnovni princip materijalnog bilansa u procesu sušenja jeste jednakost mase na ulazu s masom na izlazu iz procesa. Opšti materijalni bilans komore:

$$M_{VM} = M_{SM} + W \quad (41)$$

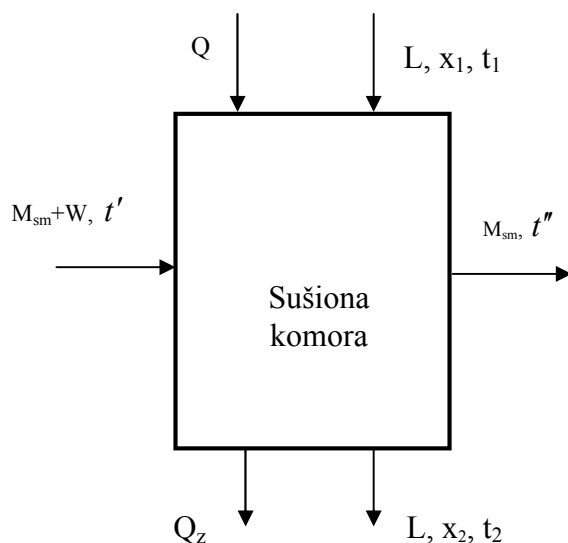


Toplotni bilans sušare:

Da bi se obavio proces sušenja, isparavanje vode i drugi termički procesi potrebno je materijalu dovesti izvesnu količinu toplote. Način dovođenja toplote zavisi od procesa sušenja. Neka se u sušaru unosi $(M_{SM}+W)$, kg/h, vlažnog materijala u kome ima W , kg/h, nehigroskopne vlage i M_{SM} , kg/h, suve materije. Temperatura na ulazu je t' , a specifična

toplota suvog materijala c_{sm} , kJ/kgK. Nakon potpunog razdvajanja vlage iz sušare izlazi M_{sm} , kg/h, suve materije temperature t'' . U sušaru se dovodi Q , kJ/kg, toplote, dok se Q_z , kJ/h, gubi usled neizolovanosti sistema. Kroz vlažan material prolazi, L , kg/h, suvog vazduha, stanja 1 (x_1, t_1) da bi na kraju izašao sa stanjem 2 (x_2, t_2). U prolazu kroz sušaru vazduh oduzima vlagu iz materijala, a istovremeno se zagreva. Pri promeni stanja vazduha interesantni su odnosi količine toplote i količine vlage u zavisnosti od stanja 1 i 2. Ti odnosi proizilaze iz toplotnog bilansa sušare. Za stacionaran proces jednačina toplotnog bilansa predstavlja jednakost između količine toplote na ulazu i količine toplote na izlazu iz sušare.

Prikaz komore za sušenje u obliku blok dijagrama, slika 18:



Slika 18: Šematski prikaz toplotnog bilansa sušare

Toplotni bilans sušare:

$$M_{sm} \cdot c_{sm} \cdot t' + W \cdot c_w \cdot t' + Q + L \cdot h_1 = Q_z + L \cdot h_2 + M_{sm} \cdot c_{sm} \cdot t'' \quad (42)$$

Ako se sušara toplotno izoluje onda se količina toplote koja se gubi zračenjem sa zidova sušare Q_z može zanemariti, pa utrošena toplota za sušenje iznosi:

$$Q = L(h_2 - h_1) + M_{sm} c_{sm} (t'' - t') - W c_w t' \quad (43)$$

Zadnja dva člana u jednačini se mogu zanemariti jer je njihova numerička vrednost mnogo manja od prvog člana pa se može pisati:

$$Q = L(h_2 - h_1) \quad (44)$$

Ako se vazduh zagreva van sušare iz jednačine se vidi da je $h_1 = h_2$ (jer je $Q = 0$).

Promena stanja vlažnog vazduha će teći vrlo blizu izentalpe ($h = \text{const}$).

Vlaga je mogla dospeti samo u vazduh, pa je:

$$W = L(x_2 - x_1) \quad (45)$$

2.1.10. PROMENE IZAZVANE SUŠENJEM

Jedan od najznačajnijih aspekata u proizvodnji i distribuciji hrane svakako je njen kvalitet i zdravstvena ispravnost. Svakim postupkom konzervisanja dolazi do određenih promena na konzervisanoj namirnici.

Da bi se sezonska biljka očuvala, i učinila dostupnom potrošačima tokom cele godine, često se podvrgava različitim tehnološkim tretmanima, npr. sušenju (Park i sar., 2002). Sušenje kao termički tretman biljnog materijala, može imati negativan uticaj na očuvanje kvaliteta a pozitivan na zdravstvenu bezbednost. Zdravstvena bezbednost pored uticaja gajenja (sadržaj teških metala i pesticida), na šta se ne utiče sušenjem, odnosi se na sadržaj mikroorganizama, bakterija, kvasaca i plesni.

Termičke metode mogu smanjiti kvalitet proizvoda. Konvencionalne metode zasnovane na sušenju toplim vazduhom primenjuju se u najvećoj meri, ali njihova upotreba može dovesti do negativnog kvaliteta finalnog proizvoda. Promene koje nastaju pri sušenju su fizičke (promena oblika i zapremine, smežuranje i savijanje), smanjuje se količina vode sa 80-90% na svega 8-12% a promeni se i boja. Hemijske promene odnose se na povećanje udela mineralnih i organskih materija, ispari deo aromatičnih materija i uništi se deo vitamina i enzima.

Bez obzira kako je sušenje izvedeno, i ono ostavlja određeni trag na kvalitet. Idealno osušena namirnica bi trebalo da bude u mogućnosti da primi svu količinu izdvojene vode i da potpuno povрати prvobitna svojstva. Fizičke, hemijske i biološke promene tokom sušenja menjaju nutritivne vrednosti i organoleptička svojstva namirnica.

Smanjenje nutritivne vrednosti događa se zbog:

- povišene temperature – razgradnja termolabilnih sastojaka
- prisutnosti kiseonika iz vazduha – dolazi do oksidacije (npr. fenolnih spojeva)

Promena organoleptičkih svojstava:

- neenzimsko posmeđivanje
- gubitak arome (lako isparljivih komponenata)

Sušenje je proces isparavanja vode sadržane u materijalu koji se suši i uklanjanje obrazovane vodene pare u okolnu sredinu. Po svojoj fizičkoj suštini sušenje je složen termo-difuzioni proces u kome uklanjanje vode dovodi do promene strukture i drugih fizičko-hemijskih osobina materijala. Ove promene zavise od načina i oblika veze vlage sa suvom masom materijala i od strukture, tj. fizičko-hemijskih karakteristika materijala. Proces sušenja vlažnih materijala može se podeliti u tri osnovna perioda: zagrevanje materijala, isparavanje vlage i dostizanje ravnotežnog stanja (Kandić, 1984).

Proces sušenja povezan je s većim ili manjim ireverzibilnim promenama izvornih svojstava namirnica. Promene su posledica uklanjanja vode, ali i uticaj temperaturnog faktora. Promene u hrani nastaju uglavnom u periodu opadajuće brzine sušenja i što proces duže traje degradativne promene su veće, ali se javljaju i u periodu konstantne brzine sušenja. Vrste i obim promena zavise od namirnice, njenog sastava, fizičkim i strukturnim svojstvima i td. U toku sušenja sa vodom iz namirnice izlaze i menjaju položaj i različiti sastojci hrane rastvoreni u vodi. U živom tkivu samo voda i male molekule u rastvoru difundiraju kroz ćelijske opne koje imaju svojstva visoko selektivnih semipermeabilnih membrana. U toku sušenja zagrevanjem ili na neki drugi način oštećeni zid menja svojstva i postaje propustan iza veće molekule koje su rastvorene u vodi. Sve ovo vodi do postepenog koncentrisanja rastvornih materija u perifernim delovima hrane, a kao posledica toga intenziviraju se degradativne reakcije i na tim mestima javlja se otvrdnjavanje i kvrčenje površinskog sloja. Tokom procesa sušenja gube se i čvrstoća i jedrina tkiva koje su kod biljnih i životinjskih tkiva prisutne u svežem stanju. Posledica toga su različite plastične deformacije. Na sve ove pojave, kao što su otvrdnjavanje, kvrčenje, promena nasipne zapreminske gustine, rehidrationska svojstva, otvorenost strukture i drugo, uticaj imaju kako režim dehidracije (temperatura, vlažnost i brzina strujanja vazduha) tako i svojstva hrane i specifičnosti primenjene metode.

Kad se govori o kvalitetu osušenih namirnica, najčešće se misli na rehidraciju, tj. na mogućnost primanja izdvojene vode. Treba imati u vidu da uslovi sušenja (temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja) u najvećoj meri utiču na moć rehidracije.

Cilj svakog sušenja je da sve moguće negativne promene budu svedene na najmanju moguću meru:

- da se u najvećoj meri sačuva sadržaj i sastav korisnih materija
- da se dobije proizvod porozne (otvorene) strukture, dobre moći rehidracije
- da se očuvaju organoleptičke osobine
- da su nakon sušenja količine mikroorganizama u okviru propisanih granica
- da se sprovede tako da je materijal pripremljen za skladištenje, preradu ili plasman – sadržaj vlage svesti na ravnotežni
- da troškovi sušenja, potrošnja goriva i ostali investicioni i operativni troškovi, budu što niži.

Osim toga, sušenje treba sprovesti bez negativnog uticaja na životnu sredinu, ili da on bude sveden na mogući minimum.

2.1.11. SUŠENO VOĆE

Promet sušenog voća u svetu je sve veći. Bez obzira na porast potrošnje sušenog voća u tržišnoj utakmici pobeđiće oni koji proizvode kvalitetno i jeftino (Taweekul i Sringam, 2004.)

Sušeni proizvodi voća na tržište dospevaju sušenjem tehnološki zrelog voća do stanja koje omogućuje dalje čuvanje. Prilikom sušenja u voću raste koncentracija sastojaka. Sušeno voće ima nekoliko puta veću energiju od svežeg voća kao i sastav hranljivih materija posebno šećera, gvožđa i količine biljnih vlakana. Iz tog razloga treba ga konzumirati u manjim količinama.

Prema opštim karakteristikama suvi proizvodi moraju imati:

- boju, miris i ukus svojstven sirovinama od kojih su dobijeni
- potapanjem u vodu moraju dobro bubriti i rehidrirati se približno do oblika i konzistencije pre sušenja
- moraju biti bez mrlja nastalih fiziološkim oštećenjem plodova, zagorelosti i sl.
- ne smeju imati miris ili ukus presušenih sirovina ili bilo kakav strani miris i ukus
- ne smeju biti plesnivi ni zagađeni mehaničkim onečišćenjima.

Modernim metodama sušenja u industriji nastoje se što više sačuvati prirodna svojstva namirnica nakon rehidratiranja uz istovremeno povećanje trajnosti i tržišne vrednosti.

Rezultati sušenja zavise od kvaliteta osušenih proizvoda sa jedne strane i od troškova sušenja, koji se najvećim delom sastoje od utrošene energije, zatim od investicija u objekte i opremu za sušenje (Živković, 2006.)

U budućnosti se predviđa da će potražnja za sušenim namirnicama progresivno da raste zbog niza prednosti ovog načina konzervisanja:

1. korišćenje energije za obavljanje procesa je jednokratno (za razliku od zamrzavanja gde se energija koristi konstantno kako bi se održale niske temperature)
2. skladištenje i način čuvanja osušenih namirnica veoma je jednostavno
3. potapanjem u vodu sušene namirnice mogu se koristiti kao sveže, pri čemu se kvalitet ne narušava značajno

Sušenje je stari proces i već samim tim neposredno povezan sa inovacijama. Da se nije stalno unapređivao verovatno bi nestao. Danas se u svetu suši veliki broj različitih materijala primenom postojećih tehnologija koje na izgled dobro funkcionišu, pa nije teško zaključiti da postoji potreba za poboljšanjem. Na istraživačko razvojnom polju se međutim dosta radi. Tako se u US Patent Office (Kudra i Mujumder, 2002) svake godine prizna 250 patenata koji u svom naslovu imaju reč „sušenje“ ili „sušara“.

Da bi se dobio željeni suvi proizvod, potrebno je iz vlažnog materijala ukloniti određenu količinu vlage iz višekomponentnog sistema koji se sastoji od čvrste faze veoma kompleksne unutrašnje strukture i vlage. Kako tokom sušenja dolazi do istovremenog prenosa mase, toplote i količine kretanja, uz faznu promenu vlage, unutar složene strukture, očiti su problemi na koje nailaze istraživači koji proučavaju sušenje. Zbog svega toga istraživanja se u velikoj meri zasnivaju na eksperimentalnim rezultatima, a dobijeni parametri odgovarajućih matematičkih modela odnose se na tačno određeni materijal (Sander, 2011.)

Iz cele analize se zaključuje da je proces konvektivnog termičkog sušenja biomaterijala veoma složen zbog istovremene interaktivnosti prenosa toplote i vlage, kako u unutrašnjosti materijala, tako i na njegovoj površini, uz faznu promenu vlage (isparavanje vode), apsorpcije i desorpcije vlage, promene strukture materijala u toku sušenja, rešenja univerzalnog analitičkog oblika (diferencijalnih jednačina) koji opisuje ove pojave kod voća nema. Zbog toga se ono traži drugim putem, a to je u rezultatima eksperimenta.

Eksperimentalni pristup daje rezultate najbliže realnima, ali je relativno složen i dosta skup. U nekim slučajevima je neizbežan, naročito kada se radi o složenim problemima u koje spada proces sušenja gde imamo višekomponentni višefazni sistem.

2.2. PREGLED REZULTATA ISTRAŽIVANJA VOĆA

Brojna istraživanja i radovi, u oblasti sušenja biomaterijala, su rađena u prethodnom periodu od strane mnogih istraživača, a dominantno su vezana za neprekidno poboljšanje kvaliteta finalnih proizvoda uslovljenih, kako kvalitetom proizvedene opreme i procesa, tako i kvalitetom sirovina.

Da bi se modelirao proces sušenja i optimizirali uslovi sušenja koriste se eksperimentalne sušare. To su sušare kod kojih se kontrolišu i regulišu svi parametri merodavni za kinetiku i kvalitet sušenog proizvoda, a gubitak mase meri se u određenim vremenskim intervalima. Mnogi autori su proučavali uticaj: različitih postupaka sušenja, različitih predtretmana i različitih procesnih parametara na kinetiku sušenja poljoprivrednih proizvoda (voća i povrća). Koristeći eksperimentalne sušare vršena su ispitivanja kinetike sušenja različitih namirnica kao npr. jabuka, banana, grožđa, malina, višnje, bundeva, šljiva, aromatičnog i lekovitog bilja i dr.

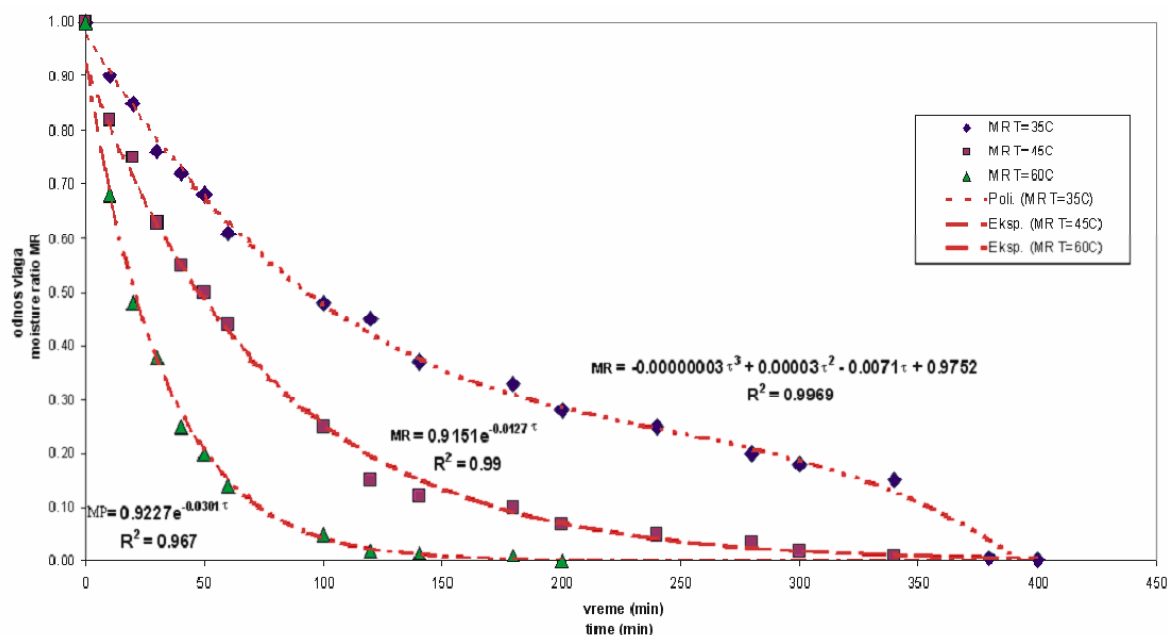
Lovrić (2003) ističe da potrošači danas sve više traže hranu visokog kvaliteta koja je po svojim organoleptičkim svojstvima što sličnija sirovoj neprerađenoj hrani, posebno kada se radi o voću i povrću. Takva hrana poznata je pod imenom "minimalno procesirana hrana" u kojoj su u najvećoj meri sačuvane originalne organoleptička i nutritivna svojstva

sirovine, isključivo zbog znatno blažih uslova primenjenih pri njenom procesiranju ili zbog primene novih blažih postupaka proizvodnje ili konzerviranja. To znači da se u termičkim procesima primenjuju znatno blaži uslovi procesiranja (niže temperature, kraće vreme) da se umesto standardnih termičkih postupaka primenjuju drugi postupci kao što su: termička obrada u vakuumu, dielektrično zagrevanje, pulsirajuće električno polje, pulsirajuće svetlo i dr.

Lj. Babić i S. Šerbula, (1991) u svom radu prezentuju rezultate istraživanja, do kojih se došlo prilikom sušenja ploda oljuštene i neoljuštene kajsije sorte „kečkemetska ruža“, sečene na polovine i četvrtine, na poluindustrijskom uređaju. Istraživanja su obavljena u okviru četiri režima pri kojima je varirana temperatura vazduha za sušenje, od 55 do 80⁰C, i brzina strujanja, od minimalne 0,95 m/s do maksimalne 2,6 m/s. Cilj je bio da se na osnovu rezultata merenja dođe do kinetičkih krivih sušenja i krivih brzine sušenja, na osnovu čega će konstatovati optimalni režim sušenja sa energetskog aspekta i sa aspekta očuvanja organoleptičkih svojstava. Rezultati istraživanja pokazuju da:

- pri istom režimu sušenja oljuštene polovine i četvrtine ispitivane sorte dostižu krajnju vlažnost za 50 do 63% brže nego isti neoljušteni uzorci,
- pri povišenju temperature vazduha sa 55⁰C na 65⁰C pri istoj brzini kretanja vreme sušenja se smanjuje kod oljuštenih i neoljuštenih polovina za 29,4 do 37,5%, a sa povećanjem temperature na 80⁰C to smanjenje trajanja procesa se kreće od 47 do 50%,
- pri povišenju brzine strujanja sa min. na max. pri istoj temperaturi vazduha vreme skraćanja procesa iznosi kod polovina 16,6 do 22,7% a kod četvrtina 15,5 do 25,5%,
- najbolja organoleptička svojstva zadržale su neoljuštene polovine pri blažem režimu.

Plešić i sar (2006) su u svom radu istraživali sušenje lista paprene metvice, prosečne početne vlažnosti 84,42% na izlaznu prosečnu 10,69% pri temperaturama vazduha od 35 do 60⁰C. Cilj istraživanja bio je razmotriti uticaj različitih temperatura radnog medija (vazduha) na brzinu sušenja odnosno na gubitak vode iz lista metvice. Krive sušenja (slika 19) modelirane su nelinearnim regresionim modelima: pri temperaturi vazduha od 35⁰ kriva sušenja modelirana je polinomom trećeg stepena, a pri višim temperaturama (45⁰C i 60⁰C) eksponencijalnim regresionim modelom, uz visoke koeficijente determinacije. Na osnovu rezultata istraživanja došli su do zaključka da povećanje temperature radnog medija značajno utiče na brzinu sušenja odnosno skraćuje vreme sušenja paprene metvice.



Slika 19: Dijagram sušenja paprene metvice pri različitim temperaturama radnog medija-vazduha

Karić i Đurović, (2011) u svom radu ističu da je sušenje kao tehnološka operacija veliki „potrošač energije“. Jedan od glavnih ciljeva unapređenja tehnologije sušenja je, pored povišenja kvaliteta osušenog materijala, povećanje energetske efikasnosti. Proračunom toplotnog bilansa kondenzacione i konvencionalne sušare dobili su da odnos termičkih snaga iznosi: Kondenzaciona sušara : konvencionalna sušara = 1 : 3. Na osnovu čega su zaključili da se upotrebom kondenzacione sušare, podržane radom toplotne pumpe, velika količina energije može uštedeti, a osim toga dobija se kvalitetniji finalni proizvod. Energetsku efikasnost kondenzacione sušare povećava zatvorenost sistema i visok koeficijent grejanja toplotne pumpe. Ova metoda uštede energije, ujedno je povoljna i s ekološkog aspekta.

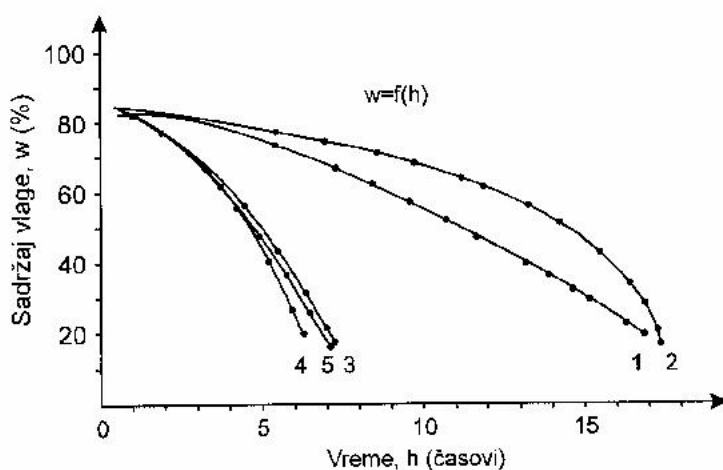
Sito i sar. (1998) ispitivali su sušenje visiko vlažnih semenki buče u šaržnoj laboratorijskoj sušari sa temperaturama agensa 40, 60, 80 i 100⁰C i pratili uticaj temperature na trajanje procesa sušenja. Visoko vlažne semenke buče (nakon pranja) sušene su sa početne vlage 52,3% na konačnu oko 7,5%. Rezultati istraživanja potvrđuju da se povećanjem temperature vazduha za sušenje značajno smanjuje vreme procesa sušenja semenki. Eksperimentalni podaci u različitim uslovima izvođenja eksperimenta aproksimirani su pomoću kvadratnih regresionih jednačina (tj. polinomom drugog stepena) sa vrlo visokim koeficijentom detriminacije. Kvalitet semena ocenjivan je organoleptički, a zaključeno je da je optimalna temperatura 60⁰C, jer je pri sušenju na temperaturi 80⁰C dolazilo do „pečenja“ semenki. Istu vrednost temperature za sušenje, 60⁰C, ali kao maksimalnu, navodi Wagner (1998).

Paunović i sar. (2010) u svom radu istražuju kinetiku sušenja jabuke sorte „granny smith“ u laboratorijskom dehidratoru sa idejom da se uoči pri kojim sadržajima vlage dolazi do postizanja maksimalne brzine isparavanja i pri kojoj vlažnosti kolutovi jabuke počinju da menjaju boju i geometrijski oblik. Primenjuju dva temperaturna režima sušenja: šaržni (konstantna temperatura vazduha od 70⁰C u trajanju od 8h) i simulirani kontinualni (temperatura vazduha od 70⁰C u trajanju od 3 h i temperatura vazduha od 50⁰C u trajanju od 5 h). Rezultati istraživanja pokazuju da konvektivno sušenje obezbeđuje zadovoljavajući kvalitet i da je simulirani kontinualni način sušenja prihvatljiviji sa stanovišta izgleda gotovog proizvoda. Na ovaj način postiže se manja maksimalna brzina, sušenje je ravnomernije, i da se tehnološki postupak obavlja sa manjim temperaturskim stresom za biljno tkivo što rezultira mnogo boljim kvalitetom gotovog proizvoda.

Lj. Babić i sar. (1996) u svom radu su prezentovali rezultate komparativne analize kinetičkih krivih sušenja, sorti jabuke koje su najzastupljenije u voćarskoj proizvodnji: „greni smit“, „ajdared“, „zlatni delišes“ i „jonagold“ na osnovu merenja u laboratorijskim uslovima. Plan eksperimenta je postavljen tako da su varirani faktori: temperatura vazduha na tri nivoa (60⁰C, 70⁰C i 80⁰C) i oblik komada (kolutovi i kocke) a brzina kretanja vazduha za sušenje i visina sloja uzorka su držani na konstantnom nivou. Izvedeno je 24 tretmana. Priprema za sušenje sastojala se u potapanju sečenih komada u 1% rastvor limunske kiseline u maksimalnom trajanju od 10 minuta radi zaštite od promene boje. Cilj rada bio je da se uz pomoć komparativne analize krivih kinetike sušenja dođe do sopstvenih informacija o ponašanju istraživanih sorti tokom procesa konvektivnog sušenja u laboratorijskim uslovima i dobijeni rezultati i iskustva ekstrapoliraju na projektovanje sušara manjeg kapaciteta. Rezultati ispitivanja potvrđuju da sorte ispitivanih jabuka nemaju bitno različito ponašanje u procesu sušenja, tj. da je način vezivanja vlage za skelet, kao i struktura materijala, kod ispitivanih sorti, slična. Izrazito je kraće vreme sušenja ako se jabuka seče na kocke i suši pri višim temperaturama. Kocke imaju veću poroznost koja omogućava lakše prolaženje vazduha za sušenje, a time i ujednačenije strujno polje u materijalu. Pravilno propisana tehnologija, koja podrazumeva različite načine pripreme, pored konstrukcije sušare, biće glavni faktor kvaliteta.

Brkić i sar. (1998) obavili su laboratorijsko ispitivanje kinetike sušenja višnje sa i bez koštica u polu-industrijskoj šaržnoj (komornoj) sušnici sa lesama "Seting" iz Delnica, koja je instalirana na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu. Dimenzije sušnice su: dužina 2050, širina 620 i visina 1020 mm. Sorta višnje sa košticama bila je "majurka" sa područja Novog Sada, a bez koštica "oblačinska" sa područja Aleksinca. Za ispitivanje višnje su dobijene u

zamrznutom stanju, direktno iz fabrike za preradu voća i povrća iz Aleksinca. U fabrici je višnja bila pripremljena za sušenje. Izvršeno je kalibrisanje, pranje i izbijanje koštica iz ploda. Početni sadržaj vlage u višnji bio je 83,9 %, a krajnji je varirao od 15 do 19 %. Ispitivanje je obavljeno u pet različitih režima sušenja (tri temperaturna režima: 70°C, 80°C i 90°C u kombinaciji sa i bez koštica i brzini vazdušne struje: 2,0; 1,85 i 1,5 m/s). Metod ispitivanja zasnivao se na merenjima kinetike sušenja zrnastih materijala prema Laseranu (Francuska). Najbolji rezultati ispitivanja postignuti su na višnji bez koštica pri srednjoj temperaturi vazduha $t_s=80^\circ\text{C}$ i $t_v=60^\circ\text{C}$ i najnižoj brzini vazduha od 1,48 m/s. Vreme sušenja iznosilo je 6,72 časa. Pri višim i nižim temperaturama ne može da se postigne kvalitetno osušen gotov proizvod. Rezultati istraživanja kinetike sušenja višnje, za sve režime sušenja, prikazani su na slici 20. Sa slike se vide značajne razlike u dužini vremena sušenja, zavisno od režima sušenja.



Slika 20: Krive sušenja za pojedine režime ispitivanja
 (1-režim $t_s=70^\circ\text{C}$, $t_v=50^\circ\text{C}$, sa košticama; 2-režim $t_s=70^\circ\text{C}$, $t_v=50^\circ\text{C}$, bez koštica; 3-režim $t_s=80^\circ\text{C}$, $t_v=60^\circ\text{C}$, bez koštica; 4-režim $t_s=90^\circ\text{C}$, $t_v=60^\circ\text{C}$, bez koštica i 5-režim $t_s=80^\circ\text{C}$, $t_v=60^\circ\text{C}$, bez koštica)

Brkić i Janić (2006) iznose da je utrošak tečnog goriva (ulja za loženje) kod tunelskih sušara od nekoliko desetina kilograma pa do 2,78 kg po kilogramu osušenog povrća. Za sušenje povrća može da se koristi zemni gas ili biomasa, kao jeftinije gorivo. Utrošak električne energije može da bude od nekoliko desetina, pa do 4,2 kWh po kilogramu osušenog proizvoda.

Janković i sar. (2004, 2006 i 2010) ispituju kvalitet maline nakon konvektivnog sušenja i liofilizacije u laboratorijskim uslovima. Na osnovu rezultata ustanovljeno je da kod liofiliziranih plodova sa sadržajem vlage manjim od 10% dolazi do „krunjenja“ usled međusobnog trenja upakovanih plodova. Kod konvektivnog sušenja gubitak arome iznosi 49,86%, a kod liofilizacije 16,85%. Aktivnost bilo koje vrste mikroorganizama inhibira se

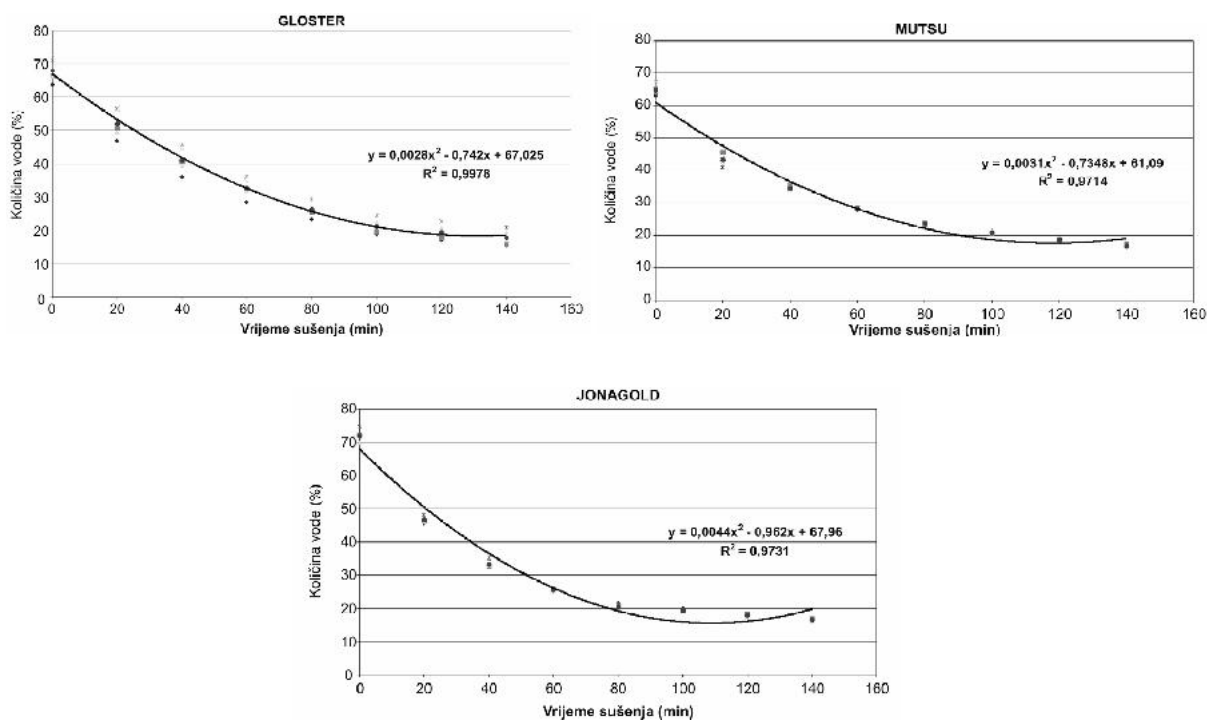
kada se vrednost za aktivnost vode snizi ispod 0,6. Iz dobijenih podataka se vidi da je aktivnost vode kod liofiliziranih malina 0,3 i manja, čime je ona postala nepovoljna sredina za razvoj osmofilnih kvasaca. Dobijeni rezultati pokazuju da je kod liofiliziranog „vilameta“ gubitak vitamina C oko 17%, a kod „mikera“ oko 25%, što je značajno manje u odnosu na druge postupke sušenja. Organoleptičkom ocenom svežih i osušenih plodova obuhvaćeni su sledeći parametri: ukus, konzistencija, boja i aroma. Konvektivno osušeni plodovi su dobili znatno lošiju organoleptičku ocenu u odnosu na svežu malinu, dok su se liofilizirani plodovi po svojim senzornim karakteristikama malo razlikovali od svežih. Zbog velike poroznosti liofilizirani plodovi imaju relativno veliki stepen rehidracije.

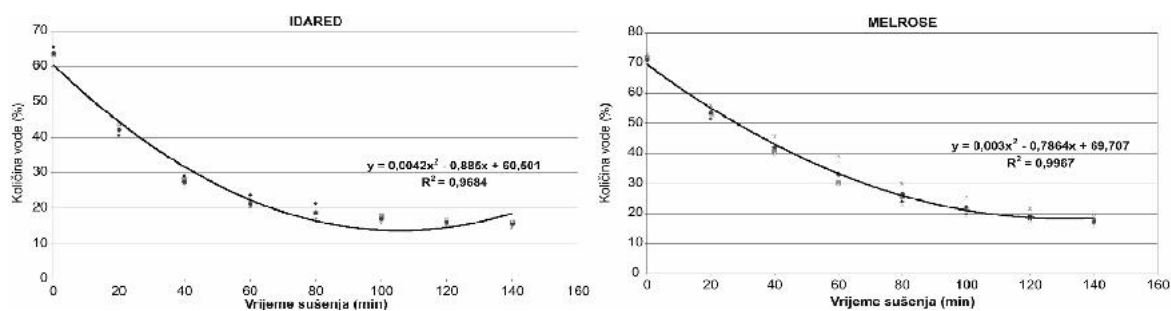
Živković i Kosi (2005) u svom radu istraživali su tehničko tehnološke parametre procesa niskotemperaturskog sušenja plodova koštičavog voća (šljiva i kajsija) u laboratorijskim uslovima. Eksperimentalnim istraživanjima obuhvaćena su strujnotehnička merenja, parametri kinetike procesa i tehnološki parametri sušenja. Posebno su analizirani temperatura i relativna vlažnost vazduha, vlažnost i temperatura materijala za sušenje kao i brzina sušenja. Krive kinetike sušenja kajsija imaju drugačiji oblik u odnosu na krive sušenja šljiva. Na osnovu analize dobijenih rezultata došlo se do zaključka da na potrošnju energije presudnu ulogu pored režima sušenja, vrste i načina pripreme materijala, imaju i tehnički parametri sistema, što se pre svega odnosi na energetski deo sistema.

S. Mašović i sar. (2000) u svom radu ispitivali su promene u kvalitetu različitih sorti jabuka, pri različitim postupcima sušenja. Ispitivanje je vršeno sa jabukama sorte: „ajdared“, „mel rose“, „zlatni delišes“ i „grenni smit“. Jabuke su sušene konvektivno, postupkom sušenje - smrzavanje i liofilizacijom. Ispitivan je uticaj načina i stepena sušenja na promene u hemijskom sastavu i senzornim svojstvima jabuka sečenih na kocke, jednake veličine 10x10x10 mm i potapane u 0,1% rastvor limunske kiseline. U cilju ispitivanja promena u kvalitetu jabuka analitičkim metodama je određivan sadržaj: suve materije-sušenjem na 105⁰C; ukupnih kiselina-metodom neutralizacije; ukupnih šećera-metodom po Luff Schoorl-u; L-askorbinske kiseline-jodometrijski; aktivnost vode-na aparatu „Termokonstater“ CTD-33 na temperaturi 25⁰C. Kod svih ispitivanih sorti jabuka, najbolji rezultati su dobijeni kod uzoraka koji su sušeni liofilizacijom. Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da u procesu sušenja dolazi do značajnog gubitka L-askorbinske kiseline, kod svih ispitivanih uzoraka, koji zavisi od stepena sušenja i vremena delovanja povišene temperature, kao i od sadržaja ukupnih kiselina u svežoj jabuci. Najbolje očuvanje L-askorbinske kiseline i najbolji stepen rehidracije, kao i najmanje promene u hemijskom sastavu prisutno je kod liofiliziranih uzoraka, kod svih ispitivanih sorti. Klasično sušeni uzorci su dobili najlošiju

ukupnu ocenu. U senzornoj oceni nisu zapažene značajne razlike između ispitivanih sorti jabuka, iako su neznatno bolje ocenjene sorte sa većim sadržajem ukupnih kiselina.

Dobričević i sar. (2008) primenjuje osmozu u kombinaciji sa tradicionalnom metodom sušenja jabuka sorti: „gloster“, „jonagold“, „idared“, „melrose“ i „mutsu“. Vreme sušenja jabuke uslovljeno je temperaturom vazduha za sušenje i količinom vode u sirovini. Za smanjenje količine vode u sirovini kristi se šećerni sirup gustine 64⁰Bx, u koji se potapa očišćeno i izrezano meso jabuke na kockice veličine 1x1x1cm u trajanju od 24h. Količina vode u svežim kockicama je 85,11-86,89%, u kockicama nakon potapanja u šećerni sirup 63,96-72,03% i u suvim kockicama 15,65-17,92%. Sušenje je rađeno u pet ponavljanja uz temperaturu vazduha od 50 do 60⁰C uz brzinu vazduha 2 do 3,5 m/s. Na osnovu rezultata istraživanja zaključeno je da istraživane sorte jabuke, rezane na kockice, daju zadovoljavajući kvalitet suvih proizvoda. Postupak pripreme potapanjem u šećerni sirup povoljno utiče na primenu niskih temperatura vazduha za sušenje što je dalo proizvod boljih senzorskih svojstava (zadovoljavajuće vrednosti boje, ukusa, mirisa i konzistencije). Indeks rehidracije suvih kockica istraživanih sorti je 2,29 do 2,68. Prosečne krive sušenja (slika 21) modelirane su polinomnom regresijom.





Slika 21: Krive sušenja ispitivanih sorti jabuke rezanih na kolutove

Jambrak (2010) navodi da se primena ultrazvuka visoke snage pokazala kao moguća metoda koja se može primeniti kao samostalan proces ili u kombinaciji s tradicionalnom metodom sušenja voća i povrća toplim vazduhom. Primena ultrazvuka kao predhodne obrade znatno skraćuje vreme trajanja sušenja toplim vazduhom. Predtretman sušenja ultrazvukom frekvencije 40 kHz u trajanju od 20 min. povećava difuziju vode za 14,4%. Sa aspekta utroška energije tretman ultrazvukom visoke snage je zahvalniji od osmotske dehidracije. Preliminarna istraživanja napravljena su u laboratorijskim uslovima i kod malih uzoraka za čega se pokazala korisna primena ultrazvuka. Međutim, potrebno je sprovesti *scale-up* celog procesa za industrijske uslove kako bi se dobio uvid o uticaju ultrazvuka i izvodljivosti takvog procesa u velikim razmerama. Brzina strujanja agensa za sušenje različito je predstavljena u literaturi. Krička i sar. (2005), navode vrednost 0,8 m/s, a Sito i sar. (1998) sproveli su eksperiment sa brzinom od 0,8 do 1,6 m/s. Rossrucker (1992) je obrađivao praktičnu primenu sušenja, te je došao do preporučenog područja brzina 0,05 do 0,13 m/s. Müller (1992) je detaljno istraživao uticaj promene brzine agensa za sušenje na brzinu sušenja lekovitog bilja, uzimajući u obzir i input električne energije. Zaključeno je da povećanje brzine iznad 0,2 m/s nema opravdanja, jer se brzina sušenja neznatno povećava, a utrošak električne energije značajno raste. Takođe, za veće brzine strujanja, potrebna je veća termička snaga da bi se ostvarilo željeno povećanje temperature agensa za sušenje.

Istraživanjem različitih postupaka sušenja biljnog materijala u svojim radovima bavili su se i mnogi drugi istraživači: Blagojević i sar. (2010): *Ispitivanjem konvektivnog sušenja skroba*; Brkić i Somer (1996): *Analizom strujnog i temperaturnog polja u šaržnoj sušari za testenine*, Ivančević i Mitrović, (2012): *Specifičnostima sušenja proizvoda liofilizacijom*, Kandić i sar., (2007): *Ispitivanjem kinetike procesa sušenja šljiva*; Kosi i sar., (1996): *Eksperimentalnim određivanjem parametara sušenja biljnih materijala*; S. Prvulović, (2004): *Modelovanjem mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanjem numeričkih pokazatelja*; Živković, (1998): *Određivanje optimalnih parametara tehničko-tehnoloških sistema za sušenje koštice voća...*

Različitim tehničkim rešenjima sistema za sušenje i energetsom efikasnošću procesa sušenja u svojim radovima bavili su se mnogi autori kao što su: Brkić i Somer (2007): *Energetskom efikasnošću dvo-prolaznih sušara*; Brkić i sar., (2006): *Energetskom efikasnošću sušenja zrna kukuruza na različitim konstrukcijama sušara*; M. Karić, (2007): *Optimizacijom procesa sušenja recirkulacijom izlaznog vazduha*; M. Karić i sar., (2009): *Sušenjem šljive u konvektivnim sušarama tunelskog tipa*; Kosi i sar., (1995): *Istraživanjem razvoja tehničko-tehnoloških sistema sušenja biljnih materijala*; Topić, (1989): *Projektovanjem, proračunom i konstruisanjem sušara*; R. Topić i G. Topić, (2002): *Korišćenjem toplotnih pumpi u procesu sušenja*; Zlatković i sar., (2010): *Kondenzacionim sušarama sa potpunom recirkulacijom vazduha*; Živković i sar., (2005): *Oblicima i strukturom angažovane energije pri sušenju biljnih materijala...*

Na osnovu do sada iznetog, mogu se uočiti napori velikog broja autora da se istraživanja usmere prema potpunijem izučavanju i analizi rezultata kompletne unutrašnje strukture sistema i procesa, kao ključnom prilazu u daljem napretku u ovoj oblasti.

Analizirajući rezultate uvaženih istraživača (domaćih i stranih) može se primetiti:

- da tokom procesa sušenja svi prehrambeni proizvodi gube u kvalitetu, u nekom stepenu, zavisno od primenjenog postupka, predtretmana i režima sušenja,
- da kvalitet konvektivno sušenih plodova u odnosu na liofilizirne je lošiji. Prednost liofilizacije ogleda se u boljem očuvanju L - askorbinske kiseline, manjem gubitku ukupne arome, manjoj redukciji zapremine, većoj poroznosti i boljoj organoleptičkoj oceni. Navedene prednosti liofilizacija ostvaruje zbog sušenja sublimacijom iz smrznutog stanja pri relativno niskoj temperaturi u procesu desorpcije vlage,
- da temperature vazduha za sušenje, pri konvektivnom sušenju, utiče veoma značajno na kinetiku sušenja, sa povećanjem temperature vazduha raste brzina sušenja, tj. smanjuje se vreme sušenja,
- da brzina strujanja agensa sušenja utiče na kinetiku odnosno na kapacitet sušenja samo do određene granice, tj. bilo bi poželjno da brzina strujanja agensa za sušenje (vazduha) bude u okviru 0,12-0,2 m/s,
- nedostaju istraživanja vezana za uticaj relativne vlažnosti agensa sušenja na kinetiku sušenja,
- da ne postoje jasni naučni i stručni iskazi o adekvatnim parametrima sušenja, kojima bi se postigli bolji efekti,
- nedostatak eksperimentalnih istraživanja (rezultata) o uticaju parametara agensa za sušenje, odnosno sušenog materijala na pokazatelje kvaliteta osušenog

proizvoda i broj mikroorganizama u cilju procene uticaja glavnih faktora i njihovih međudejstava na kvalitet proizvoda i simulacije odziva na različita ulazna dejstva (optimiranja procesnih parametara),

- nedostatak analitičkih izraza (matematičkih modela) kojima će se moći predvideti kvalitet sušenog proizvoda u različitim kombinacijama procesnih parametara.

Ovo se posebno odnosi na sušenje u šaržnim (komornim) sušarama, koje se u praksi najčešće koriste na malim i srednjim posedima, jer predstavljaju povoljno rešenje uzimajući u obzir visinu investicija. Ovo je bio razlog da se njima posveti navedeno istraživanje.

Literaturni podaci o mehanizmima prenosa toplote i mase i toplotnim svojstvima biomaterijala tokom sušenja još su daleko od istraženih i ukazuju na potrebu za daljim i specifičnim istraživanjima.

2.3. STATISTIČKA ANALIZA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA - MODELIRANJE

2.3.1. POJAM I ZNAČAJ MODELIRANJA

Modeliranje predstavlja jedan od osnovnih procesa ljudskog uma. Ono je usko vezano za način ljudskog razmišljanja i rešavanja problema. Kao rezultat procesa koji nazivamo inteligentno ljudsko ponašanje, modeliranje predstavlja svakodnevnu aktivnost i veliki deo onoga što nas čini ljudskim (inteligentnim) bićima. Modeliranje izražava našu sposobnost da mislimo i zamišljamo, da koristimo simbole i jezike, da komuniciramo, da vršimo generalizacije na osnovu iskustva, da se suočavamo sa neočekivanim. Ono nam omogućava da uočavamo obrasce, da procenjujemo i predviđamo, da upravljamo procesima i objektima, da izložimo značenje i svrhu. Upravo zato, modeliranje se najčešće posmatra kao najznačajnije konceptualno sredstvo koje čoveku stoji na raspolaganju (Rothenberg, 1989).

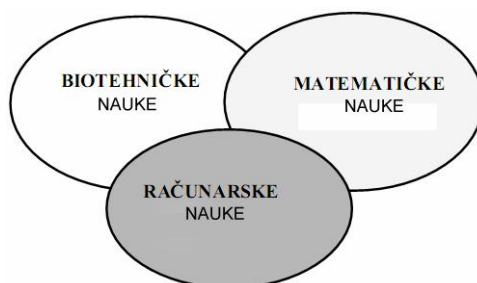
Model je pojednostavljeni prikaz realnog sistema, napravljen da bi poslužio boljem razumevanju i/ili daljem proučavanju tog sistema i eksperimentisanju s njim (J. Božikov, 2003). Realni sistem je više ili manje izdvojeni deo stvarnog sveta koji čini funkcionalnu celinu. Realnim sistemom smatramo i nešto što u stvarnosti ne postoji, nego je zamišljeno da se napravi u budućnosti.

Modeliranje je postupak kojim se stvarni događaji prikazuju na apstraktan način radi proučavanja odvijanja stvarnih procesa u promenljivim stvarnim okolnostima. Osnovna svrha modeliranja je da omogući ekonomski efikasno eksperimentisanje s modelom u cilju istraživanja stvarnih procesa, jer se svi parametri mogu menjati u vrlo širokim granicama. Da bi služio ovoj svrsi model mora reprodukovati ponašanje stvarnog procesa u području njegove primene.

Jednostavno rečeno: Matematički model predstavlja opis sistema pomoću matematičkih relacija kojima se opisuje ponašanje sistema. Model je uprošćena predstava fizičkih sistema ili procesa koji služi za razumevanje sistema njegovog unapređenja i prognozu rada sistema. Zato što su aproksimacija stvarnosti, modeli nisu manje vredni, upravo to ih i čini korisnim jer iz stvarnosti uzimaju samo najvažnije delove tako da je stvarnost lakše razumeti. Dakle pojednostavljenje stvarnosti modelom ne samo što je prihvatljivo već je i poželjno. Modeli trebaju biti što jednostavniji, ali ispravni i korisni za svrhu za koju su napravljeni.

Modeliranje je postupak dobijanja matematičkog opisa neke pojave koja se odvija u realnom svetu kao što su fizički, hemijski, elektronički procesi. S jedne strane ovaj opis mora biti relativno jednostavan a s druge dovoljno tačan da bi odgovarao svojoj nameni koja je definisana od strane kreatora modela (P.P.J. Van den Bosch i A.C. Van der Klauw, 1994).

Matematički model sistema (biotehnološkog procesa) je matematički izraz (matematičke jednačine, statističke relacije, računarski programi) u kojima se određuje interakcija okoline (ulazne veličine) i stanja sistema (veličine stanja) i svrha upravljanja (izlazne veličine) (Kurtanjek, 1998). Formiranje matematičkog modela uvek je multidisciplinarnan proces (slika 23), podrazumeva sučeljavanje različitih naučnih disciplina relevantnih za određeno područje.



Slika 22: Multidisciplinarnost matematičkog modeliranja procesa

Matematički modeli u prehrambeno tehnološkim procesima imaju vrlo istaknuti značaj. Na osnovu matematičkih modela analiziraju se:

- odzivi mernih sistema u biotehnološkim procesima,
- procenjuju se parametri i direktno nemerljiva stanja procesa,
- prenos rezultata iz modela za laboratorijske u poluindustrijske i industrijske razmere
- projektovanje novih procesa
- nadzor („monitoring”) procesa
- očuvanje kvaliteta proizvoda

- upravljanje (automatizacija) procesa
- optimiranje procesa

Kada neki proces ili predmet predstavljamo nekim drugim procesom ili predmetom tada taj drugi proces ili predmet zovemo modelom. Model je uprošćeno predstavljanje realne pojave, njime su reprodukovani samo neki najbitniji aspekti realne pojave. To znači da model opisuje sistem samo s određenim nivoom tačnosti. Stanje sistema u modelu je predstavljeno vrednostima varijabli stanja. Dobar model bi trebalo da objašnjava pojavu što je moguće vernije, ali ne bi trebalo da bude previše komplikovan.

Svaki model kao približna predstava procesa, bazira se na nekom pretpostavkama. Dobre pretpostavke su rezultat iskustva, teorijskog znanja i inženjerskog osećanja i zahvaljujući njima model se uprošćava uz očuvanje neophodnog stepena realističnosti. Treba ih navesti kao sastavni deo modela. Matematički model predstavlja manje ili više uprošćenu predstavu stvarnih veza između veličina koje karakterišu neki proces i odražava najvažnije karakteristike procesa. Model reprezentira sistem sa željenim nivoom aproksimacije. Dobrim matematičkim modelom smatra se onaj koji odstupa od realne slike u granicama tolerancije, a pri tome nije tako kompleksan da bi određivanje brojnih vrednosti parametara koji figurišu u modelu bilo vrlo otežano ili nemoguće.

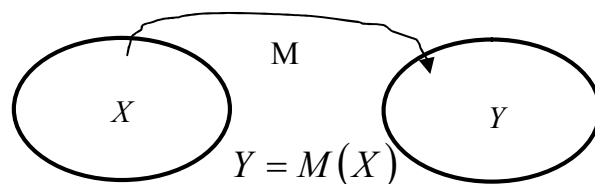
Modeli, prema građi, mogu biti:

- fizički i
- apstraktni (simbolički)

Fizički modeli predstavljaju umanjene modele realnog sistema, koji se ponašaju na isti način kao i njihovi originali tj. umanjene kopije onoga što izučavamo. Oni su lako razumljivi. To je uređen i međuzavistan skup komponenti koje formiraju celinu i zajednički deluju da bi ostvarili funkciju. Fizički modeli predstavljaju trodimenzionalni prikaz sistema. Primeri takvih modela su različita laboratorijska postrojenja napravljena na bazi teorije sličnosti, makete proizvodnih postrojenja itd. Fizički model predstavlja izvor podataka o ponašanju sistema potrebnih za formiranje matematičkih modela.

Apstraktni model (teorijski ili matematički) je takav model u kome realni procesi nisu predstavljeni fizičkim sredstvima već simbolima. Iako modeli ne moraju savršeno predstavljati proces, izgradnja modela teži što savršenijoj prezentaciji. Nivo apstrakcije u procesu modeliranja utiče na validnost modela, odnosno na uspešnost predstavljanja realnog sistema modelom. Problem validacije modela javlja se u svakom procesu modeliranja, a proističe iz činjenice da je model uvek pojednostavljeni pogled na realni sistem koji je predmet posmatranja. Modeliranje je način predstave realnog sistema u obliku kojim se može manipulirati. Matematički model nekog

sistema je skup matematičkih odnosa između ulaznih i izlaznih veličina koje definišu taj sistem, sastoji se od diferencijalnih, algebarskih ili logičkih jednačina, slika 22.



Slika 23: Šematski prikaz matematičkog modela M kojim se ulaznim veličinama X pridružuje skup izlaznih veličina

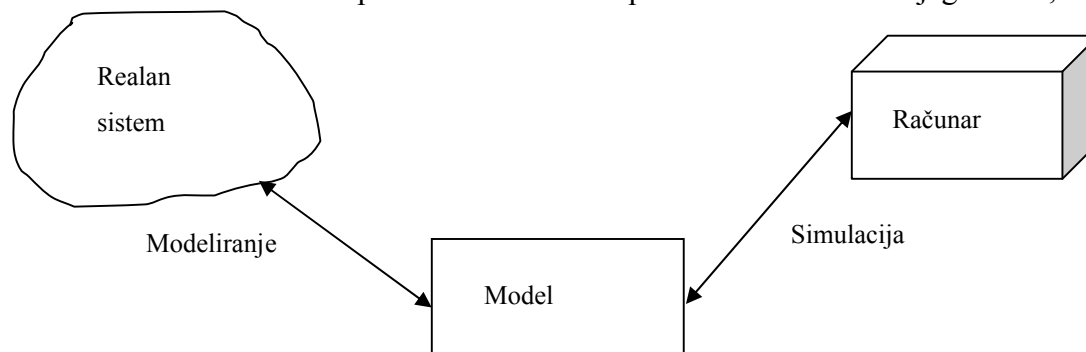
U užem smislu reči matematički model je prikaz realnog sistema sistemom jednačina, statički model biće prikazan algebarskim jednačinama dok je matematička prezentacija dinamičkog modela sistem diferencijalnih jednačina koje prikazuju promene varijabli tog modela u vremenu (J. Božikov, 2003).

Matematičko modeliranje je aproksimiranje stvarnih pojava nekim matematičkim opisom, koji više ili manje odgovara stvarnoj pojavi. Neki problemi se mogu vrlo tačno modelirati dok su druge pojave u prirodi vrlo složene i teško ih je matematički opisati.

Pod simulacijom podrazumeva se proces izgradnje apstraktnih modela za neke sisteme ili podsisteme realnog sveta i obavljanje većeg broja eksperimenata nad njima. Posebno je interesantan slučaj kada se ti eksperimenti odvijaju na računaru. Tada se govori o računarskom modeliranju i simulaciji. Modeliranje pomoću računara postaje disciplina kojom se mogu adekvatno prikazivati složeni sistemi i ispitivati njihovo ponašanje. Modeliranje i simulacija podrazumeva složenu aktivnost koja uključuje tri elementa:

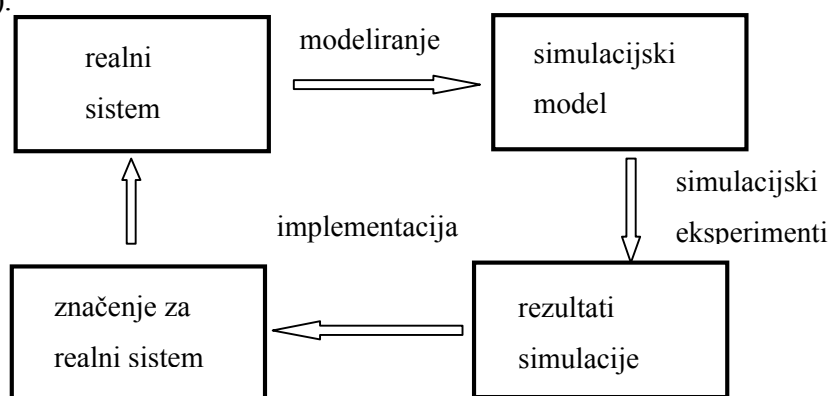
- realni sistem
- model
- računar

Ova se aktivnost na uprošćeni način može predstaviti sledećim dijagramom, slika 24.



Slika 24: Relacije modeliranja i simulacije

Proces uspostavljanja veze između realnog sistema i modela je modeliranje. Proces uspostavljanja veze između modela i računara je simulacija. Simulacija je eksperimentalna metoda koja se provodi na modelu sistema. Izvođenjem simulacije može se pratiti ponašanje modela iz čega se može doneti zaključak o ponašanju stvarnog sistema. Na modelu se mogu provoditi eksperimenti neograničen broj puta s istim ili promenjenim parametrima. Kod provođenja simulacionih eksperimenata može se odabrati najpovoljnije rešenje između onih koje smo simulacijom ispitali. Simulacija je naročito korisna kada je posmatrani sistem vrlo složen, tj. kada se sastoji od velikog broja podsistema i veza gde neke veličine imaju slučajan karakter ili čak nisu ni poznate, slika 25 (J. Božikov, 2003).

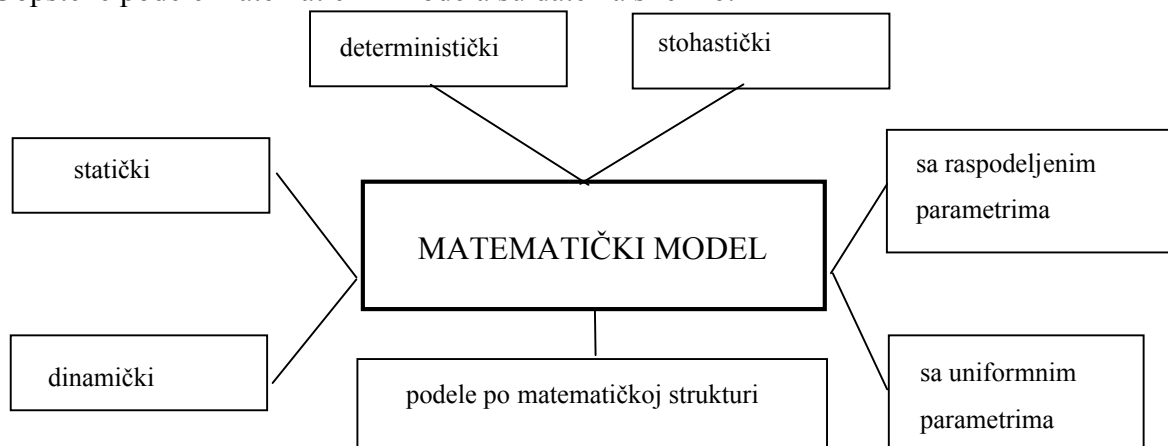


Slika 25: Simulacijski proces (J. Božikov, 2003)

Na simulacijskom modelu moguće je vrlo brzo, jeftino i efikasno izvođenje simulacijskih eksperimenata čije rezultate treba implementirati na sam realni sistem koji je predmet istraživanja radi njegovog boljeg upoznavanja ili radi poboljšavanja. Razvoj računarskih uređaja je bitno povećao mogućnost modeliranja različitih pojava. To je jedan od razloga što se modeliranju kao metodi prikaza realne stvarnosti posvećuje ogromna pažnja.

2.3.1.1. Klasifikacija matematičkih modela

Matematički modeli se mogu podeliti prema više različitih aspekata (Kurtanjek, 1998). Uopštene podele matematičkih modela su date na slici 26.



Slika 26: Klasifikacija matematičkih modela

Podela matematičkih modela prema ponašanju u vremenu:

- statički – elementi, veze i sve svojstvene veličine tokom vremena su konstantne
- dinamički – elementi, veze i sve svojstvene veličine tokom vremena su promenljive

Prema izvesnosti/neizvesnosti rezultata modeli su:

- deterministički (funkcionalni) - za svaku vrednost nezavisne varijable X jednoznačno je određena vrednost zavisne varijable Y
- stohastički (statistički) - vrednost zavisne varijable Y nije jednoznačno određena za zadanu vrednost nezavisne varijable X

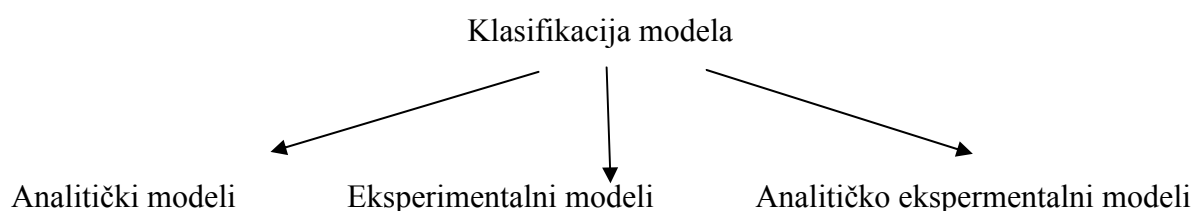
Prema načinu na koji se menja stanje modela razlikuju se:

- modeli diskretnih događaja – stanje sistema je određeno samo u nekim trenucima i oni mogu biti međusobno jednako ili različito udaljeni - promena iz stanja u stanje odvija se skokovito
- modeli kontinuiranog stanja – stanje sistema je određeno u svakom trenutku

Vrste modela s obzirom na njihovu matematičku strukturu:

- jednačina regresijskog pravca
- multivarijanti linearni regresijski modeli
- autoregulacijski linearni modeli
- regresijski polinomi
- obične diferencijalne jednačine
- parcijalne diferencijalne jednačine
- neuronske mreže i td.

U tehničkim naukama, uopšte uzevši, postoje više prilaza u dobijanju modela objekta.



Model dinamičkog sistema zasnovan se na teorijskoj analizi (analitički modeli) temelji se na poznavanju fizikalnih i hemijskih zakonitosti procesa koji se odvijaju u objektu i postavljanju fundamentalnih prirodnih zakona održanja ekstenzivnih veličina mase, energije i količine kretanja (bilansne jednačine). Opšti izraz zakona održanja tj. bilansa glasi:

$$\text{ULAZ} + \text{GENERISANJE U SISTEMU} = \text{IZLAZ} + \text{AKUMULACIJA U SISTEMU}$$

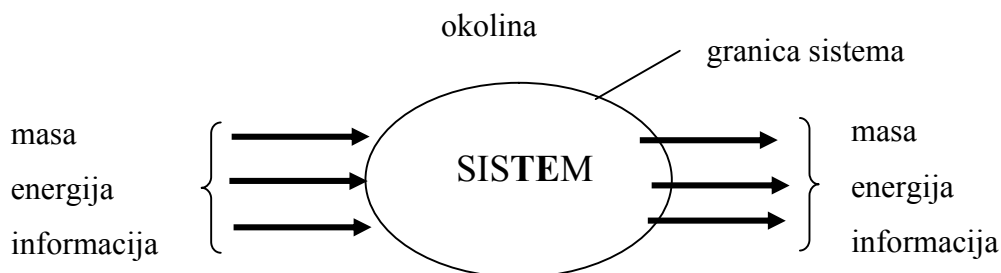
i odnosi se na neki period vremena $\Delta \tau$.

Termin generisanje obuhvata i stvaranje i trošenje (komponente, energije, količine kretanja). Tako član generisanje ima pozitivnu vrednost, ako je u pitanju stvaranje, a negativan je ako je u pitanju trošenje (negativno generisanje).

Takvi modeli predpostavljaju poznavanje brojnih varijabli a zbog svoje složenosti zahtevaju poznavanje različitih područja nauke i tehnike i provođenje određenih eksperimenata. Teorijski pristup je najprihvatljiviji ali je ograničen na relativne jednostavne fizičke probleme i geometrijske konfiguracije. Izraženi su sistemom diferencijalnih jednačina kojima se determinira tok odvijanja procesa za zadate početne uslove i tok promene ulaznih veličina. Tako dobijeni modeli zahtevaju eksperimentalnu proveru. Zbog toga i zbog česte upotrebe brzih rešenja koje nameće praksa razvijeni su poslednjih godina empirijski modeli.

Empirijski modeli ne zahtevaju uvid u fizikalnost pojave koja se modelira nego samo skup ulazno-izlaznih merljivih podataka (veličina) i obradi tih veličina na osnovu kojih se dobija prikladna struktura modela sistema i parametri modela. Promenljive koje opisuju sistem najpre se podele na ulazne i izlazne promenljive. Merenjem vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih dobijaju se podaci na osnovu kojih treba identifikovati sistem, tj. razviti odgovarajući matematički model koji opisuje sistem i odrediti njegove parametre. Eksperimentalni pristup daje rezultate najbliže realnim, ali je relativno složen i dosta skup, u nekim slučajevima je neizbežan naročito kada se radi o složenim problemima.

Osim eksperimentalnih i analitičkih metoda, očigledno je da široke mogućnosti daju kombinovane analitičko – eksperimentalne metode. Obično primena čistih analitičkih ili pasivnih eksperimentalnih metoda dovodi do modela koji u principu pravilno odražavaju procese u objektu, ali bez kvantitativne tačnosti. Tada se aktivnim metodama pristupa utanjavanju brojnih vrednosti koeficijenata modela dobijenog analitičkim ili pasivnim eksperimentalnim putem. Do najtačnijih modela dolazi se kombinovanjem analitičko - eksperimentalnih metoda.



Slika 27: Prikaz odnosa sistema i okoline

Pre nego što se definiše model mora se jasno definisati sistem koji se modeluje ili posmatra. Pod sistemom podrazumevamo izdvojen deo procesa, tj. postrojenja ograničen granicom sistema, slika 27.

Preporuke za izradu simulacijskih modela (Gordon, 1969):

1. Granica sistema s okolinom mora biti odabrana tako da sistem odnosno njegov model obuhvata samo fenomene od interesa.
2. Ne previše složeni i detaljni modeli, inače ih je teško razumeti i vrednovati
3. Ne previše pojednostavljen model da se ne izgube bitni elementi za objašnjenje uzroka ponašanja
4. Razvoj modela u jednostavnim modulima s dobro definisanom funkcijom što olakšava gradnju i proveru modela
5. Korišćenje metoda za razvoj algoritma i programa koje trebaju omogućiti bolje razumevanje modela i pojedinih modula u svim fazama razvoja modela
6. Obavezna provera logičke i kvantitativne ispravnosti modela

Cilj modelovanja procesa (sistema) svodi se na:

- Upotrebu modela umesto realnog sistema radi određenog saznanja;
- Izbegavanje opasnosti eksperimenta nad realnim sistemima;
- Dobijanje rezultata čija analiza treba da obezbedi efikasnije operativno upravljanje realnim sistemom;
- Ušteda usled optimizacije modela a ne realnog sistema.

Do matematičkog modela nekog dinamičkog sistema može se doći na dva različita načina:

1. Matematičkim formuliranjem uzročno-posledičnih veza iz kojih proizilazi zavisnost izlaza sistema od ulaznih veličina tj. postupcima matematičkog modeliranja. Primena matematičkog modeliranja nije uslovljena realnim postrojenjem i funkcionisanjem sistema ali je za primenu tog postupka potrebno dobro poznavati relevantne uzročno-posledične veze unutar sistema da ih se može matematički formulisati s tačnošću koja je primerena svrsi modela
2. Primena eksperimentalne identifikacije nije uslovljena poznavanjem prirode uzročno-posledičnih veza unutar sistema, ali:
 - sistem mora realno postojati i biti u stanju funkcionisanja
 - promene ulaza i izlaza tokom vremena moraju biti dostupne merenju
 - funkcije po kojima se menjaju ulazi sistema moraju imati određena svojstva zavisna o dinamičkim svojstvima i o željenom području valjanosti modela.

Na osnovu prethodno rečenog može se zaključiti da su pojave u procesu sušenja veoma složene da bi se mogle egzaktno matematički opisati, pa je neophodno identificirati model i parametre procesa.

2.3.1.2 Uvod u eksperimentalnu identifikaciju sistema

Pored matematičkog modeliranja sistema, koji se bazira na uspostavljanju zavisnosti između opserviranih varijabli sistema putem matematičkih izraza u vidu diferencijalnih ili diferencnih jednačina, postoje i drugi načini kod kojih se izvode eksperimenti, pri kojima se mere i zapisuju signali ulaza i izlaza, na osnovu kojih se formira model sistema ili objekta upravljanja.

Identifikacija je oblast u teoriji sistema u kojoj se razmatraju problemi izgradnje pogodnih matematičkih modela dinamičkih sistema (objekta) pri čemu se pretpostavlja da je funkcionisanje objekta ili u potpunosti nepoznato ili da su poznati fizički procesi koji se odvijaju u objektu tj. da je ponašanje poznato samo kvalitativno, ali ne i kvantitativno.

„Identifikacija je određivanje, na osnovu ulaznih i izlaznih signala procesa, modela iz određene klase modela, koji je ekvivalentan procesu na kome su izvršena određena merenja“ (Lotfi A. Zadeh, 1973).

Identifikacija procesa je iterativan proces i obavlja se uopšteno u sledećim koracima:

1. Postavljanje zahteva na matematički model procesa koji se identifikira, i to s obzirom na svrhu primene (struktura, tačnost)
2. Planiranje merenja
 - prikupljanje a-priori znanja;
 - prilagođenje na merne i izvršne elemente
 - procena amplituda i frekvencijskog spektra poremećajnih veličina
 - izbor postupka identifikacije
 - izbor ispitnog signala
 - izbor vremena uzorkovanja
 - .
 - .
 - .
3. Prvođenje eksperimenta
4. Obrada izmerenih signala (identifikacija, tj. određivanje parametara, određivanje reda modela).
5. Provera identificiranog modela (verifikacija)
6. Eventualno ponavljanje od 3. ili 4. (iterativni postupak).

U eksperimentalnoj analizi procesa razlikuju se dve celine problema:

- merenje relevantnih procesnih veličina,
- obrada merenih rezultata s ciljem dobijanja matematičkog modela.

Pod identifikacijom procesa podrazumeva se određivanje matematičkog modela i parametara dinamičkog procesa na osnovu analize podataka o ulaznim i izlaznoj veličini. Za identifikaciju procesa potrebno je planirati eksperiment i prikupiti podatke o ulaznim i izlaznim veličinama. Identifikacija sistema bavi se problemima gradnje matematičkih modela dinamičkih sistema na bazi opserviranih podataka sa sistema. U opštem slučaju sistem označava objekat kod kojeg varijable različitih karakteristika međusobno interagiraju i proizvode opservabilne signale. Opservabilni signali od interesa za nas se obično nazivaju izlazima. Na sistem utiču i spoljna dejstva sa kojima istraživač može da manipuliše koja se nazivaju ulazi. Preostala spoljna dejstva nazivaju se smetnje i mogu se podeliti na merljiva i ona koja to nisu i mogu se posmatrati samo preko njihovog uticaja na izlaze.

Eksperimentalna identifikacija procesa se može primeniti samo na određivanje dinamike procesa koji su već fizički realizovani. Koristi se kada je proces i suviše složen da bi se postavio njegov deterministički model ili kada fizičko-hemijski zakoni nisu dovoljno poznati što je čest slučaj kada se radi o postrojenjima procesne industrije. Postrojenja procesne industrije sadrže uređaje u kojima dolazi do prenosa količine kretanja, toplote i mase i različitih hemijskih i/ili biohemijskih reakcija, između kojih se najčešće javlja značajna interakcija.

Prednosti eksperimentalne analize:

- nisu potrebna detaljna specijalistička znanja istraživnog procesa
- dobijaju se jednostavniji matematički modeli koji zadovoljavajuće dobro opisuju proces

Nedostaci eksperimentalne analize:

- mora postojati istraživani proces
- dobijeni rezultati ograničeno su primenljivi na slične procese

Matematički model dobijen eksperimentalnom analizom može se koristiti u sledeće svrhe:

- proučavanje procesa
- proveru teorijskog modela
- projektovanje sistema upravljanja
- optimiranje ponašanja procesa u stacionarnim i dinamičkim režimima rada
- dijagnostika procesa
- estimacija nemerljivih varijabli procesa

2.3.1.3. Eksperiment kao objekat naučnog istraživanja

Eksperimentisanje podrazumeva plansku promenu kontrolisanih faktora ili nezavisnih promenljivih kako bi se procenio efekat ovih promena na odziv procesa, odnosno zavisnu promenljivu (Ranjit, 2001).

Eksperimentisanje, u inženjerstvu, ima veliku ulogu pri razvoju novih proizvoda, kao i razvoju i poboljšanju procesa. Eksperiment je kreacija uslova u kojima istraživač prati efekat neke promenljive na drugu, pri čemu:

- planski manipuliše najmanje jednom nezavisnom promenljivom
- nadzire značajne uslove
- opaža, meri i beleži promene zavisne promenljive – odgovore objekta eksperimentisanja.

Izvođenje eksperimenata odvija se u fazama:

1. **Priprema eksperimenta** (definisanje problema, utvrđivanje cilja, postavljanje hipoteza, razrada modela, izbor i definisanje faktora – nezavisne i zavisne varijable)
2. **Izvođenje eksperimenta** (izbor vrste eksperimenta, izrada projekta eksperimenta - uzorci, eksperimentalni uređaj, kontrolna i merna oprema, postavljanje eksperimentalnog sistema, baždarenje merne i testiranje kontrolne opreme, priprema uzorka, izvođenje eksperimenta – probni (podešavanje) i glavni eksperiment)
3. **Obrada rezultata eksperimenta** (obrada rezultata svakog tretmana) – sređivanje i statistička obrada (testiranje hipoteza), diskusija rezultata statističke obrade (tumačenje rezultata, poređenje s rezultatima publiciranih eksperimenata), izvođenje zaključaka (problem, urađeno, treba uraditi), izrada izveštaja.

U eksperimentima se namerno izazivaju pojave u cilju njihovog istraživanja. U industrijskoj praksi se susreću:

- pasivni eksperimenti – klasični pristup i
- statistički planirani eksperimenti – savremeni pristup

Pasivni eksperimenti su jednostavni, provedeni bez predhodnog plana eksperimenta s rezultatima nepoznate pouzdanosti.

Savremeni pristup – statistički planirani eksperimenti

Korak koji analogijom prethodi procesu izvođenja eksperimenta jeste izbor eksperimentalnog modela po kome će se eksperiment izvesti i rezultati matematički obraditi. Šematski se pristup eksperimentisanju može predstaviti metodom „crne kutije“ (slika 28). Sistem „crne kutije“ predstavlja jednostavan model realnog složenog difuznog sistema, čija su unutrašnja struktura, mehanizam interakcije i zakonitost tog procesa nepoznati ili delimično

poznati. Crnu kutiju predstavlja svaki neistraženi objekat ili pojava čije ponašanje se istražuje delovanjem na taj objekat i proučavanjem reakcije na ta delovanja, pri čemu se polazi od izvesnih hipoteza o ponašanju tog objekta ili pojave. „Crna kutija“ ima na ulazu početno stanje a na izlazu konačno stanje. Transformacija stanja odvija se unutar „crne kutije“. Zadatak modela se formira kao razlika između početnog i konačnog stanja.

Model crne kutije (slika 28) se obično koristi za procese gde su osnovni fizički odnosi komplikovani i/ili nejasni a u takve se mogu svrstati procesi prehrambene industrije (sušenje).



Slika 28: Pojednostavljeni prikaz modela crne kutije

Cilj je aproksimacija stvarnih ulazno-izlaznih podataka pomoću predviđajućeg modela koji smanjuje grešku između posmatrane (opservirane) i predviđene izlazne vrednosti:

$$\hat{Y} = f(X, b) \quad (46)$$

\hat{Y} - budući izlazi sistema

$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - ulazi (faktori)

$b = b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ - nepoznati parametri (koeficijenti) modela

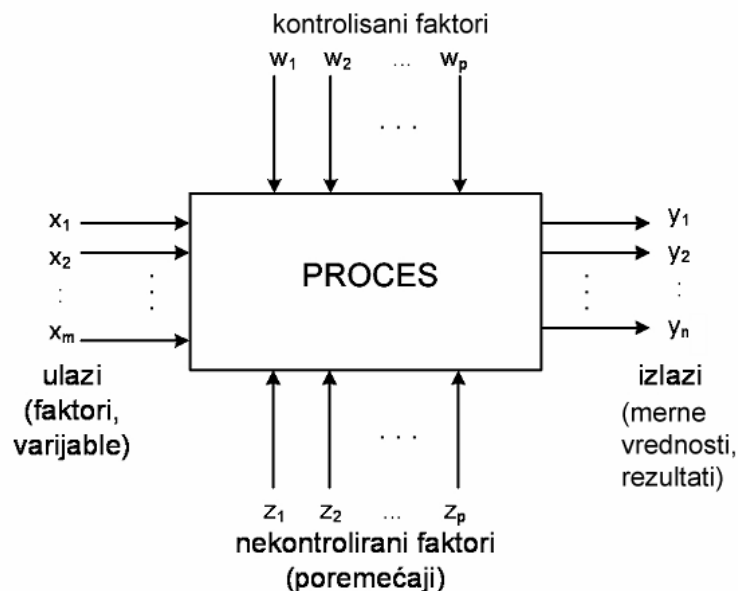
Nepoznati parametri modela predviđaju odnos ulazno-izlaznih podataka korišćenjem rezultata dobijenih eksperimentalnim merenjem.

Uopšteno kod gradnje modela treba rešiti dva zadatka:

- procena nepoznatih parametara
- izbor nelinearne funkcije f

Primena metode crne kutije omogućava otkrivanje zakonitosti ponašanja ali ne pruža saznanja o elementima i o strukturi pojave. Zaključke o funkcionisanju sistema donosimo na osnovu posmatranja ulaznih i izlaznih veličina.

Za određivanje matematičkog modela procesa polazi se od eksperimentalno snimljenih funkcionalnih zavisnosti realnog objekta u nestacionarnom režimu. U ovom slučaju nije neophodno poznavati strukturu sistema (vezu između elemenata, njihov broj i vrstu) već samo za polazne veličine meriti veličine na izlazu i tako formirati bazu podataka za razvoj modela sistema (slika 29).



$$Y_i = f(X) + \varepsilon$$

Slika 29: Opšti model procesa - metoda crne kutije

Elementi eksperimenta:

x – nezavisna promenljiva (njom se u eksperimentu planski manipuliše tako da ona uzima određene vrednosti – nivoe)

w – varijable koje nisu od primarnog interesa u istraživanju (njima se u eksperimentu ne manipuliše iako one mogu pojedinačno, u međusobnoj interakciji ili u interakciji sa eksperimentalnom promenljivom da utiču na zavisnu varijablu)

z – eksperimentalna greška (posledica delovanja slučajnih promenljivih)

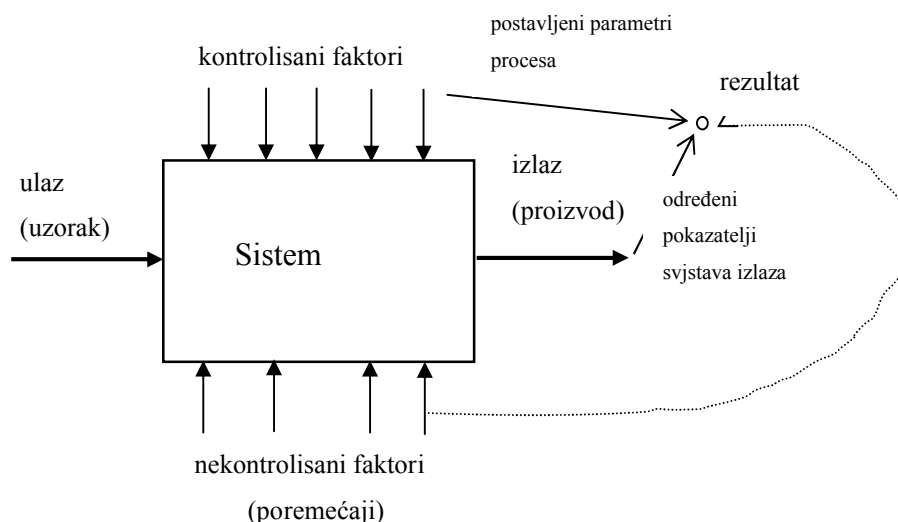
y – rezultat merenja (reakcija objekta istraživanja na x i z)

Varijable od primarnog interesa u istraživanju su:

Zavisna varijabla – varijabla koju želimo da objasnimo ili predvidimo

Nezavisna varijabla – varijabla koju koristimo da objasnimo zavisnu varijablu

U osnovi savremeni metod eksperimentalnog istraživanja, temelji se na kibernetičkom principu „crne kutije“, kojim se na jednostavan način modelira složeni realni višefaktorni proces (J. Stanić, 1981). Blok–dijagram eksperimenta tehnološkog procesa prikazan je na slici 30.

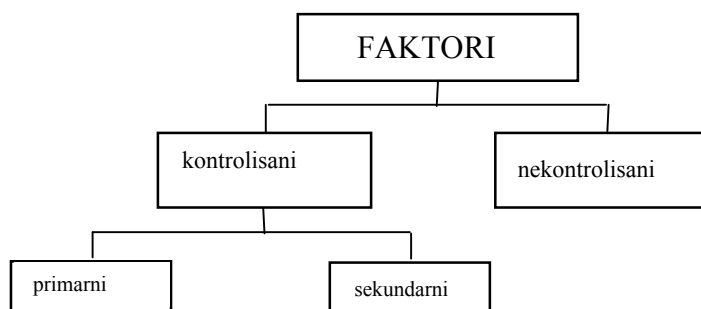


Slika 30: Blok - dijagram eksperimenta tehnološkog procesa (Ranjit, 2001)

Uzorak – proba s kojom se obavlja eksperiment i na kome se prate promene svojstava pri promeni faktora.

Faktor – varijabla koja ima jednu ili više vrednosti koje utiču na izlaz.

Prema mogućnostima kontrole razlikuju se:



Kontrolisani faktori su oni čije se vrednosti mogu kontrolisati.

- primarni faktori (X) – faktori za koje se želi istraživanjem odrediti kako utiču na izlaz
- sekundarni faktori (Z) – faktori koji utiču na izlaz ali su van okvira istraživanja

Nekontrolisani faktor su oni čije se vrednosti ne mogu kontrolisati.

Rezultat – skup vrednosti usvojenih nivoa faktora i odgovarajućih eksperimentalno određenih pokazatelja svojstava uzorka i proizvoda.

Tretman – deo eksperimenta s jednom kombinacijom vrednosti faktora.

Kibernetiski pristup pri izradi modela primenjuje se ako nisu poznati svi elementarni procesi u pojavi, već se samo pouzdano znaju samo glavni faktori (ulazni) od kojih zavisi proces i koji značajno utiču na rezultate procesa. Pored glavnih postoje i nekontrolisani faktori koji remete proces.

Za istraživanje složenih procesa potrebno je napraviti veliki broj eksperimentalnih istraživanja, uložiti puno vremena i novca. Zato se postavlja pitanje kako pravilno isplanirati ta eksperimentalna ispitivanja, kako bi iz što manje prikupljenih podataka dobili maksimalnu informaciju o procesu.

2.3.1.2. Statističko planiranje eksperimenta

Metodom statističkog planiranja eksperimenta obuhvaćena su dva usko povezana problema eksperimentisanja (D.C. Montgomery, 2012; M.D. Morris, 2000; R.H. Myers, 1999; R.H. Myers i sar., 2004 i 2009; I. Pantelić, 1984a i 1984b; Pfaff i Salopek, 2004; J. Stanić, 1990; J. Stankov, 1982; Ю.П. Адлер, i sar., 1976; В.В. Налимов, 1969 i 1971):

- plan eksperimenta (merenje relevantnih procesnih veličina)
- statistička (numerička) obrada merenih rezultata s ciljem dobijanja matematičkog modela.

Početni zadatak kvalitetnog eksperimentisanja je osmisliti plan eksperimenta. U slučaju kada eksperiment zahteva ispitivanje velikog broja faktora potrebno je napraviti dobar plan izvođenja eksperimenta kako bi se uz što manji broj eksperimenata dobilo što više informacija o uticaju nezavisnih varijabli na zavisne varijable. Na osnovu takvog plana i njegove statističke analize moguće je pouzdano zaključivati o delovanju sistema u celini. Dizajniranje eksperimenta nije ni malo jednostavan zadatak. Eksperiment se od samog početka mora pažljivo (koncipirati počev od izbora veličina) koje će najbolje opisati funkcionisanje sistema (odziv) i veličina koje imaju uticaj na njegov rad pa sve do završne interpretacije i obrade rezultata.

Gotovi programi za statističku obradu podataka sadrže i deo koji pruža mogućnost generiranja određenog broja poznatih planova eksperimenta i odgovarajuću obradu rezultata dobijenih izvedenim eksperimentima.

2.3.1.4. Izbor uticajnih faktora i odziva

Pri istraživanju nekog procesa, prvi korak je izabrati veličinu ili više njih koje najbolje opisuju taj proces. Te veličine su rezultat rada celog postrojenja a neposredno ili posredno zavise od stanja sistema i značajne su s obzirom na svrhu modeliranja nazivaju se zavisne varijable ili izlazne veličine modeliranog sistema. Takođe je potrebno odrediti veličine koje mogu uticati na proces, odnosno veličine koje će se pratiti i koje svojim delovanjem na sistem uzrokuju promene njegovog stanja a time i promene izlaza nazivaju se nezavisne varijable ili faktori (ulazne veličine sistema). Tek tada se pristupa planiranju i izvođenju eksperimenta, menjajući vrednosti ulaznih veličina i prateći kakav je njihov uticaj na posmatrani proces. Analizom rezultata treba doći do zaključka koji faktori i njihova međudelovanja imaju značajan uticaj na zavisnu varijablu i koliki

je taj uticaj. Primenom neke od metoda eksperimentalnog određivanja optimuma procesa moguće je odrediti uticaj pojedine ulazne veličine na sam proces, odnosno odrediti da li je uticaj značajan ili se može zanemariti. Takođe je moguće, na osnovu prethodnih merenja, a primenom neke od metoda, odrediti korak za koji će se menjati svaka varijabla koja utiče na proces, tokom samog sprovođenja optimiranja.

Složenost matematičkog modela povećava se sa povećanjem broja izabranih uticajnih faktora, što uzrokuje veći broj eksperimenata, složeniju eksperimentalnu proceduru, složeniju i dugotrajniju obradu i analizu eksperimentalnih rezultata i poskupljenje preduzetog istraživanja. S druge strane, neopravdana redukcija broja uticajnih faktora (zbog nedovoljnog znanja ili smanjenja troškova istraživanja) može isključiti pojedine faktore (i njihove interakcije) značajne za funkcionisanje datog sistema, što može smanjiti tačnost matematičkog modela i dovesti do izvođenja pogrešnih zaključaka pri analizi eksperimentalnih rezultata (Marinković, 2007). Očigledno, selekcija uticajnih faktora predstavlja veoma važan segment u proceduri eksperimentalnih istraživanja. Tačnost i pouzdanost statističkog modeliranja zavisi od primenjenog plana eksperimenta. Izbor dobrog plana eksperimenta, između velikog broja postojećih planova, od velike je važnosti.

2.3.1.5. Plan eksperimenta

Polaznu osnovu metode eksperimentalnih istraživanja predstavlja metod planiranja eksperimenta (design of experiments – DoE), odnosno izbor tipa i njegove strukture. U okviru metode eksperimentalnih istraživanja postoje dva međusobno različita koncepta planiranja eksperimenta: klasična i savremena planiranja i izvođenja eksperimenta i analize eksperimentalnih rezultata. Klasična teorija eksperimentalnih ispitivanja temelji se na eksperimentalnim planovima jednofaktorne analize. Uobičajena metoda postavljanja eksperimenta sastojala se u menjanju jednog parametra, dok svi ostali parametri koji utiču na posmatrani proces ostaju konstantni. Ovakvo postavljanje eksperimenta poznato je pod nazivom metoda jednofaktornog eksperimenta. Ova eksperimentalna procedura se ponavlja na svim obuhvaćenim faktorima. Mana ovakvog načina izvođenja eksperimenata je veliki broj skupih i dugotrajnih eksperimenata i nemogućnost da se utvrdi stepen interakcije datih faktora. Ako se eksperimenti ne ponavljaju, za k obuhvaćenih faktora i p nivoa variranja svakog faktora, ukupan broj eksperimenata će biti:

$$N = k(p-1)+1 \quad (47)$$

Ova metoda umnogome je izgubila na značaju pojavom radova Fischer-a (R.A. Fischer, 1915 i 1935) koji je razvio metod višefaktorne statističke (regresione i disperzione) analize. Najveći doprinos razvoju teorije planiranja eksperimenta dali su Box i Wilson (G.E.P. Box i

K.B. Wilson, 1951). Suštinska razlika u odnosu na koncepciju jednofaktornog eksperimenta ogleda se u tome što teorija planiranja eksperimenta omogućuje istovremeno variranje svih uticajnih parametara na različitim nivoima simultano, i njihov efekat se ispituje istovremeno. Ova metoda omogućava da se odjednom odredi međusobni uticaj parametara i smanji ukupan broj eksperimenata. U tom smislu teorija planiranja eksperimenta predstavlja kvantitativno nov pristup u teorijsko-eksperimentalnoj analizi i optimizaciji složenih procesa.

Glavni cilj planiranja eksperimenta svodi se na dobijanje maksimalne tačnosti uz minimalne troškove, odnosno smanjivanje broja provedenih merenja. Skup svih rezultata dobijenih merenjem čini jednu površinu koja se naziva odzivna površina, pri čemu svaka tačka na toj površini predstavlja vrednost izlazne veličine, odnosno odziva. Za poznavanje nekog procesa potrebno je poznavati njegovu odzivnu površinu kao i ulazne veličine čiji je uticaj na izlazne veličine značajan. Da se merenjem ne određuje cela površina, područje u kojem se dobiva maksimalan odziv procesa može se odrediti primenom metoda planiranog eksperimenta.

Planiranjem eksperimenta postiže se veća efikasnost procesa eksperimentisanja i povećava kvalitet informacija. Planiranje eksperimenta – određivanje potrebnog broja merenja (N) za dobijanje dovoljno pouzdanih rezultata.

2.3.1.5. Faktorski plan

Eksperimentalni dizajn je poseban način planiranja eksperimenta, njegovog broja i rasporeda tako da se na što efikasniji način dobiju validni statistički rezultati. Fišer je prvi preporučio primenu eksperimentalnog dizajna pri čemu se svi faktori istovremeno menjaju i njihov efekat se ispituje istovremeno – **faktorski eksperimentalni plan** (full factorial design – FFD). Faktorski planovi primenjuju se za eksperimente koji uključuju više nezavisnih varijabli, tj. faktora, a potrebno je ispitati ukupni uticaj faktora na zavisnu varijablu. Cilj je procena glavnih uticaja i interakcija među njima. Racionalno planiranje eksperimenta podrazumeva maksimum informacija iz minimuma izvedenih eksperimenata. Planovi za izvođenje eksperimenata sastavljeni su tako da uravnotežuju odnos između preciznosti statističkog zaključivanja i troškova eksperimentisanja.

Višefaktorni eksperimentalni planovi – u istom eksperimentu ispituje se delovanje dva ili više faktora odjednom i njihove interakcije. Odabrane faktore moguće je ispitivati na dva ili više nivoa. Prema broju ispitivanih faktora ti se eksperimenti nazivaju dvo, tro faktorni, odnosno višefaktorni eksperimenti.

Na broj eksperimenata direktno utiču:

- vrsta matematičkog modela
- broj izabranih uticajnih faktora

- nivo variranja uticajnih faktora
- tip plana eksperimenta

Izbor matematičkog modela se vrši u početnoj fazi planiranja eksperimenta i predstavlja njen najvažniji segment, bez obzira na krajnji cilj predloženih istraživanja.

Najpotpunije informacije o proučavanom procesu, procena glavnih uticaja i stepen interakcije među njima dobijaju se primenom faktorskog planiranja eksperimenta. Faktorski plan je metoda koja služi pri planiranju eksperimenta. Svakom faktoru se može pridružiti nekoliko vrednosti (najčešće na osnovu iskustva). Broj vrednosti koje dodeljujemo svakom faktoru definiše broj eksperimenata i oblik modela (linearni, nelinearni).

Metodologija faktorskog plana eksperimenta koristi se za dobijanje baze podataka za izgradnju modela procesa. Neophodno je pažljivo izvršiti selekciju uticajnih parametara procesa a zatim meriti odziv sistema uz kontrolu opsega mernih veličina.

Ovde će se prikazati neki posebni slučajevi faktorskih planova, izložiti osnove metoda za njihovu analizu i dati primer u kojem je odgovarajući postupak proveden i analiziran.

Potpuni 2^k faktorski plan

Najpotpunije informacije o proučavanom procesu, uticaj faktora i stepen interakcije dobijaju se primenom faktorskog planiranja eksperimenta. Svakom faktoru se može dodeliti nekoliko vrednosti (najčešće na osnovu iskustva). Broj vrednosti koje dodeljujemo faktoru određuje broj eksperimenata:

$$N = p^k \quad (48)$$

gde je: N – broj eksperimenata,

p – broj nivoa faktora

k – broj faktora

Značajne prednosti faktorskih planova su u tome što omogućavaju:

- utvrđivanje zakonitosti fenomena u celom eksperimentalnom prostoru, ispitivanjem faktora na više nivoa ($p=1,2,\dots,m$)
- simultalno ispitivanje neograničenog broja faktora,
- određivanje veličine međusobnog delovanja tj. interakcije faktora.

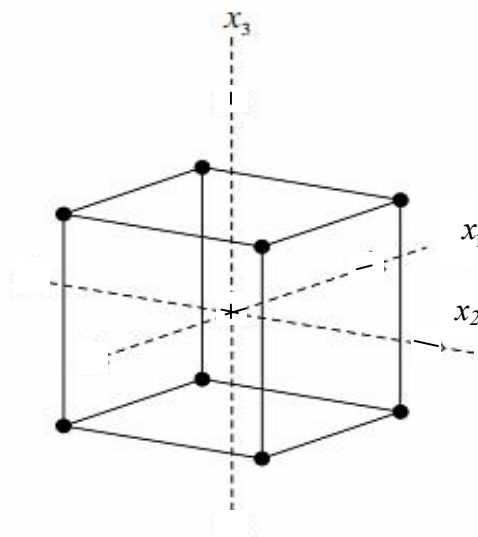
Najjednostavnija i najčešće primenjivana vrsta faktorskih planova je 2^k , odnosno klasa sa k faktora na dva nivoa. Zavisna varijabla ispituje se u svakoj od kombinacija vrednosti faktora. To osigurava mali broj tretmana. Matrica eksperimentalnih uslova faktorskog plana, pri čemu se istovremeno varira tri faktora na dva nivoa prikazana je u tabeli 1. Vrednosti nivoa su prikazane u transformisanom obliku s maksimalnom (+1) i minimalnom (-1) vrednošću.

Tabela 1: Matrica faktorskog plana s tri faktora na dva nivoa (2^3)

Tretman	Faktori		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Matrica sadrži osam redova (2^3), pri čemu svaki red odgovara uslovima eksperimenta pojedinog tretmana i tri kolone (tri faktora). U prvoj koloni minimalne (-1) i maksimalne (+1) vrednosti se smenjuju u svakom redu, u drugoj koloni u svakom drugom redu a u trećoj u svakom četvrtom redu. Na ovaj način je osigurana ortogonalnost plan (suma svih vrednosti nivoa za pojedini faktor je jednaka nuli), što omogućuje nezavisnu procenu uticaja pojedinih faktora i njihovih međudelovanja.

Matrica faktorskog plana s tri faktora može se geomertijski prikazati kao kocka, gde temena kocke čine pojedine eksperimentalne tačke (eksperimentalne uslove), slika 31.



Slika 31: Grafički prikaz 2^3 potpunog faktorskog plana

Za potrebe disperzione analize (ocena signifikantnosti koeficijenata regresione jednačine, ocena adekvatnosti matematičkog modela) neophodno je ponavljanje eksperimenta u pojedinim tačkama eksperimentalnog hiper-prostora.

Sistemi ponavljanja eksperimenta mogu biti sledeći:

1. Ponavljanje eksperimenta n_0 puta samo u centralnoj tački plana

$$\text{Označavanje: } N_E = 2^k + n_0 \quad (49)$$

gde su: N_E - ukupan broj eksperimenata

k - broj uticajnih faktora

n_0 – broj eksperimenata u nultoj (centralnoj) tački

2. Ravnomerno ponavljanje eksperimenta n puta u svakoj tački eksperimentalnog prostora („paralelni“ eksperimenti)

$$\text{Označavanje: } N_E = 2^k \cdot n \quad (50)$$

gde je: 2 - broj nivoa

k - broj uticajnih faktora

n – broj izvođenja eksperimenata za svaku kombinaciju nivoa faktora

3. Neravnomerno ponavljanje eksperimenta n_u (1, 2,3,...,N) puta u pojedinim temenima hiper-kuba (eventualno, samo u jednoj tački).

Svrha plana eksperimenta je generisanje matematičkog modela, tj. regresione jednačine koja opisuje proces. Regresijski model je matematički izraz koji pokazuje kako na vrednost zavisne varijable utiču nezavisne varijable. Ako su proučavani faktori u eksperimentu zaista oni koji utiču na proces a podaci dobijeni eksperimentom prihvatljive tačnosti i preciznosti tada je moguće razviti model koji verodostojno opisuje proces.

U slučaju potpunog trofaktornog eksperimenta pri čemu svaki faktor prima samo dve različite vrednosti (2^3), kojim se zavisna varijabla ispituje u svakoj od kombinacija vrednosti svih faktora, broj tretmana (eksperimenata):

$$N_E = 2^k + n_0 = 2^3 + n_0 \quad (51)$$

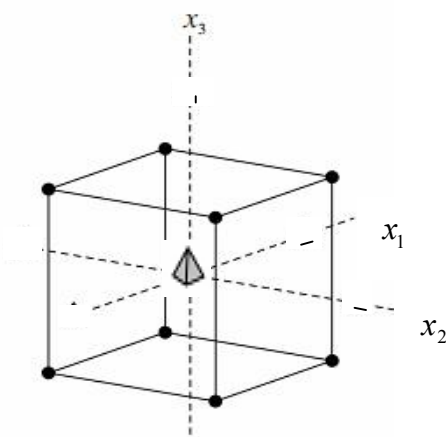
gde su:

N_E - ukupan broj eksperimenata

$k = 3$ - broj uticajnih faktora

n_0 – broj eksperimenata u nultoj (centralnoj) tački

U ovom slučaju eksperimentalni uslovi, odnosno kodirani nivoi podeljeni su u dva bloka pod pravim uglom u trodimenzionalnom prostoru. Parametri (x_1, x_2, x_3) posmatrani su u dva nivoa, viši i niži u odnosu na centralnu tačku. Plan eksperimenta u slučaju faktorskog plana s tri varijable i centralnom tačkom može se predstaviti kockom, a nivoi su u troparametarskom sistemu ravni. Tretmani se postavljaju u centar i vrhove kocke, slika 32.



Slika 32: Grafički prikaz potpunog faktorskog plana eksperimenta 2^3 s ponavljanjem u centralnoj tački plana

Eksperimenti provedeni prema ovakvom planu eksperimenta kao rezultat daće osam statističkih odgovora:

1. učinak parametra X_1
2. učinak parametra X_2
3. učinak parametra X_3
4. međudelovanje parametara X_1X_2
5. međudelovanje parametara X_1X_3
6. međudelovanje parametara X_2X_3
7. međudelovanje parametara $X_1X_2X_3$
8. promene u sredini plana eksperimenta

U 2^k faktornom planu nezavisne varijable primaju samo dve različite vrednosti pa analiza rezultata podrazumeva linearnu zavisnost zavisne varijable o pojedinoj nezavisnoj varijabli:

– polinom prvog reda za k faktora:

$$\hat{Y} = b_o + \sum_{i=1}^k b_i x_i - \text{linearni model} \quad (52)$$

- polinom drugog reda za k faktora:

$$\hat{Y} = b_o + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j - \text{linearni interakcioni model} \quad (53)$$

Takvu je pretpostavku često teško unapred prihvatiti već je potrebno proširiti ispitivanja na više različitih vrednosti svakog faktora da bi se tek nakon ispitivanja i analize rezultata zaključilo o obliku veze nezavisne varijable od faktora. Ovi eksperimentalni planovi imaju jako pojednostavljenu analizu i često služe kao osnova za druge planove eksperimenta.

Centralno složen plan

Centralno kompozitni eksperiment je model eksperimenta 1. reda proširen dodatnim tačkama (stanjima eksperimenta) u centru i tačkama u osama kako bi se omogućila procena parametara modela drugog reda (M. Ukrainczyk, 2010). Centralno kompozitni model eksperimenta sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osama i stanja u centru eksperimenta (k -broj razmatranih uticajnih faktora). Centralno kompozitni eksperiment je alternativa 3^k modelu u izgradnji modela eksperimenta drugog reda. Pri tome je broj izvođenja (faktorskih stanja) smanjen u poređenju s potpunim faktorskim modelom eksperimenta. Ukupan broj tretmana u takvom kompozitnom planu iznosi:

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (54)$$

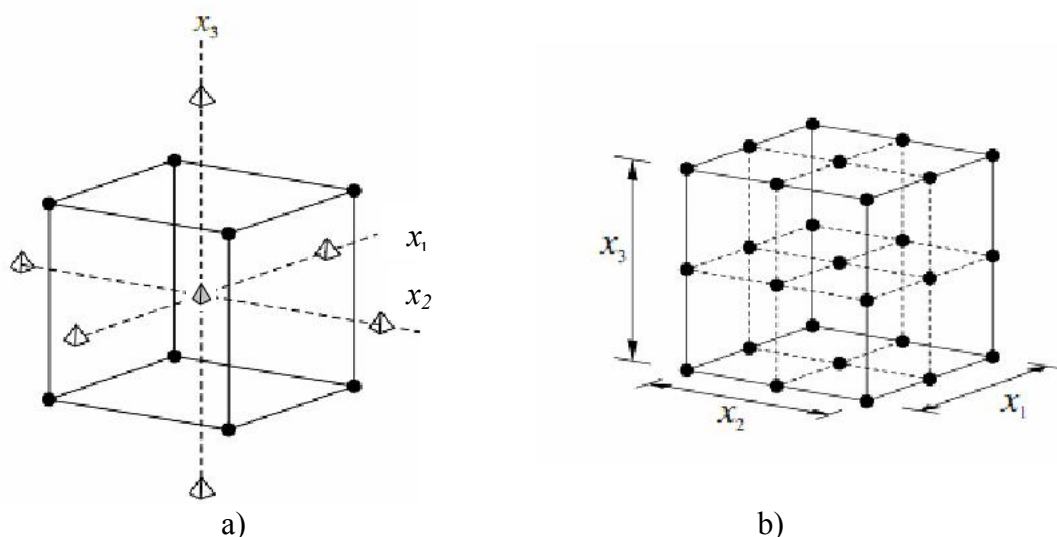
$2k$ - broj osnih tačka smeštene na udaljenosti od centralne tačke za a

n_0 - broj ponavljanja u centralnoj tački plana

Za $k=3$ (faktori su x_1, x_2, x_3) na slici 33a prikazan je model centralno kompozitnog eksperimenta za koji je potrebno 15 stanja eksperimenta ($2^3+2*3+1$). U slučaju potpunog faktorskog eksperimenta (slika 33b) bilo bi potrebno 27 (3^3) stanja eksperimenta.

Stanja eksperimenta

- Stanja u vrhovima (faktorska stanja)
- ⬠ stanja u osama sa osnom udaljenošću a od centra plana
- ⬠ stanja u centru plana



Slika 33: Grafički prikaz plana s tri faktora za opis nelinearnog odziva:

- Box-Wilsonov centralno kompozitni plan
- potpuni faktorski na tri nivoa

U slučaju da postoji nelinearnost (mehanizam procesa nepoznat) i da linearna funkcija nije odgovarajuća aproksimacija odziva potrebno je koristiti polinom višeg reda.

Model odziva, regresiona jednačina, dobijena na osnovu eksperimentalnih podataka pri centralno kompozitnom planu eksperimenta se predstavlja u ocenjenom obliku - polinoma drugog reda za k faktora:

$$\hat{Y} = b_o + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (55)$$

što predstavlja kvadratni model sa interakcijama, gde su:

b_i - koeficijenti regresije čistog dejstva (linearni članovi modela) – direkna veza između ispitivanih faktora i odziva sistema

b_{ii} - kvadratni članovi modela – odgovorni za zakrivljenost odzivne površine i pojavu minimuma i maksimuma

b_{ij} - koeficijent regresije uzajamnog dejstva (interakcija)

Interakcija znači da intenzitet uticaja jednog faktora na odziv sistema zavisi od intenziteta drugog faktora. Ne sme se zanemariti faktor za koji se pokaže da nema uticaj na odziv sistema ukoliko je njegova interakcija sa drugim faktorom značajna (može da pomeri optimum).

Predznak koeficijenta modela može biti pozitivan ili negativan što znači da porast varijable uzrokuje porast ili opadanje odziva sistema. Apsolutna vrednost koeficijenata modela predstavlja intenzitet uticaja faktora koji se testira na značajnost određenim statističkim testom.

Velika prednost precizno definisanog cilja i plana eksperimenta je znatno pojednostavljenje i skraćenje celokupnog postupka istraživanja.

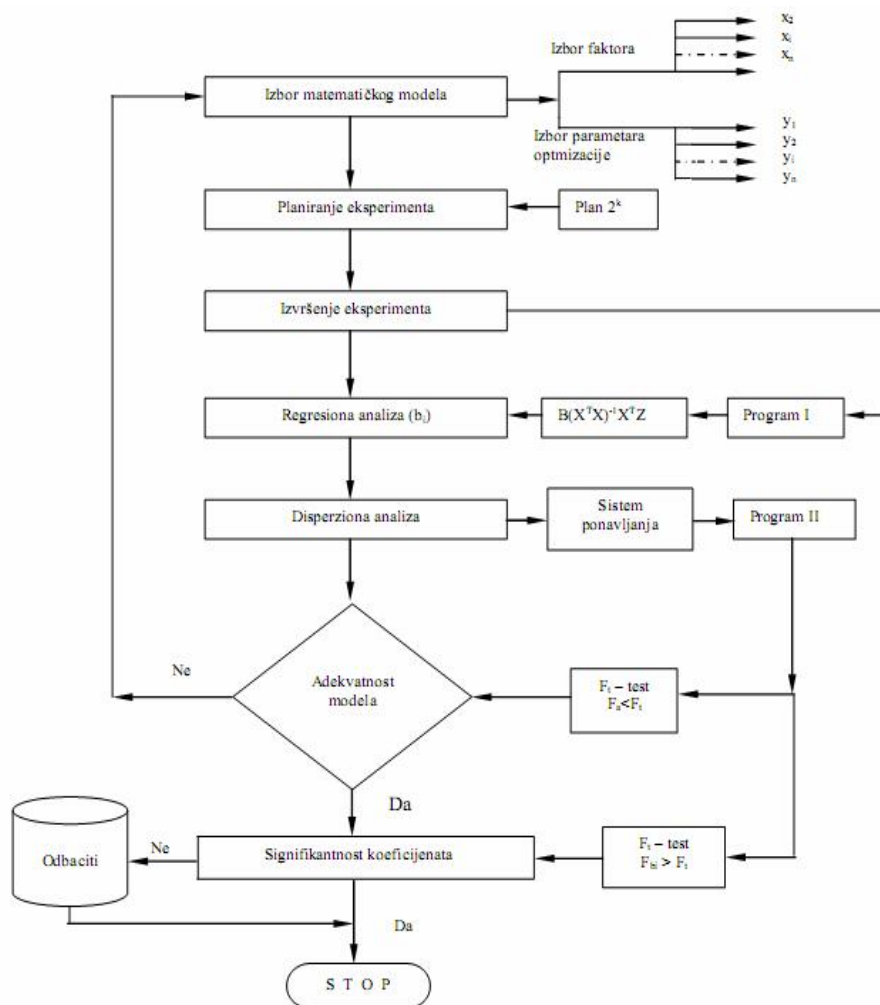
Statistička analiza podrazumeva skup statističkih metoda kvantitativne analize pojava i njihovih odnosa, koje omogućavaju pribavljanje numeričkih informacija, njihovu kvantitativnu interpretaciju, donošenje zaključaka i formiranje zakonitosti ponašanja posmatranih pojava.

Podatke prikupljene kroz eksperimentalni rad potrebno je statistički obraditi. U statističkim istraživanjima interes istraživača je usmeren prema problemu povezanosti među varijablama. Pri tome je od posebnog interesa mogućnost prognoziranja (predikcije) jedne varijable na osnovu drugih.

Svrha obrade i analize podataka je crpljenje informacija neophodnih za sticanje odgovora na pitanje zbog kojeg je istraživanje sprovedeno.

Zahvaljujući razvoju elektronskih računara i upotrebi komercijalnih statističkih paketa račun statističke analize više ne predstavlja problem. Za njihovu upotrebu potrebno je poznavanje statističkih metoda. Najčešće korišćene statističke metode za analizu podataka su

analiza varijanse i višetraka linearna regresija. Na slici 34 prikazan je model realizacije eksperimenta (algoritam).



Slika 34: Model realizacije eksperimenta (šematski prikaz modeliranja procesa)

2.3.2. STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA I STATISTIČKI TESTOVI

2.3.2.1. Regresijska i korelaciona analiza

S obzirom na postavljeni cilj istraživanja – potrebno je utvrditi statističku zavisnost među varijablama (pojavama) i pokazatelje jačine takve zavisnosti – u istraživanju će se koristiti metode regresijske i korelacione analize (D.C. Montgomery and G.C. Runger, 2006; D.C. Montgomery, 2012; J. Stanić, 1990; J. Stankov, 1982; S. Hadživuković i sar., 1982).

Regresijska analiza, je opšte prihvaćena matematička metoda, sastoji se u primeni različitih metoda ispitivanja zavisnosti jedne varijable (kvaliteta proizvoda) od druge varijable ili više njih. Za uspešnu primenu regresijske analize potrebno je meriti i beležiti kvalitet proizvoda i pratiti nivo nezavisnih varijabli. Konkretnije rečeno regresiona analiza pomaže prilikom razumevanja kako se vrednost zavisne varijable menja u zavisnosti od nezavisne varijable, dok vrednosti drugih nezavisnih varijabli ostaju konstantne.

Proces se karakteriše pomoću ulaznih varijabli, koje mogu biti kontrolisane i nekontrolisane, i izlaznih varijabli, odnosno odziva sistema. U tretmanima statistike ulazne varijable su nezavisni, a izlazne zavisni faktori. Nepoznate nekontrolisane varijable su uzrok greške merenja. Cilj eksperimenta je utvrditi njihovu uzročnu posledičnu vezu tj. eksperimentalni model. Osnova regresijske analize je regresijski model, to je algebarski izraz kojim se analitički izražava statistički odnos među varijablama.

Regresiona i korelaciona analiza je oblast statistike čiji je cilj utvrđivanje statističke zavisnosti (tipa veze) i pokazatelja jačine takve zavisnosti koji postoji među slučajnim varijablama (regresija – statistički odnos među pojavama, korelacija – uzajamna zavisnost).

Ukoliko definisanim vrednostima pridružimo tačke u koordinatnom sistemu i susedne tačke povežemo pravcima dobićemo krive regresije. Nameće se ideja da se krive regresije zamene nekom konkretnom funkcionalnom vezom (linearna, polinomna, eksponencijalna, potencijalna i td.). Regresija – tehnika koja omogućava nalaženje jednačine, odnosno funkcionalne veze koja najbolje opisuje posmatrani skup podataka.

Zadatak regresijske analize je, ako se utvrdi postojanje veze između dve ili više numeričkih varijabli, utvrditi analitičko-matematički oblik veze između jedne zavisne ili regresand varijable i jedne ili više nezavisnih ili regresorskih varijabli. Osim objašnjenja prirode zavisnosti posmatranih pojava na osnovu tog analitičkog modela može se vršiti predviđanje vrednosti zavisne varijable pri određenim vrednostima nezavisnih varijabli. Osnova regresione analize je regresioni model. Regresioni model je algebarski model kojim se analitički izražava statistički odnos među pojavama.

Matematički izraz koji pokazuje kako na vrednost zavisne varijable utiče vrednost jedne ili više nezavisnih varijabli naziva se regresijski model. Ovi modeli nastaju kao rezultat brojnih eksperimentalnih istraživanja i primene složenih matematičko statističkih metoda analize i verifikacije.

Opšti oblik modela regresije je:

$$Y = f(X, b) + \varepsilon \quad (56)$$

Y - izlazi sistema

$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - ulazi (faktori)

$b = b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ - nepoznati parametri (koeficijenti) modela

Model se sastoji od determinističkog dela koji predstavlja matematičku funkciju, kojom se izražava zavisnost zavisne varijable od određenog broja nezavisnih varijabli i stohastičkog dela koji predstavlja odstupanje od funkcionalne zavisnosti. Regresijski modeli su vrlo važni alati koji se primenjuju kako bi se utvrdila zavisnost i povezanost između

različitih varijabli, pogotovo za koje ne postoji uspostavljena empirijska zavisnost, pri čemu su neke nezavisne varijable a druge zavisne. Modelom se opisuje kako ponašanje zavisne varijable zavisi od nezavisne varijable i omogućava predikciju zavisne varijable na osnovu ponašanja nezavisne varijable. U statistički model je, zbog stohastičkog odnosa varijabli, uvek uključena i greška modela. Statistički model je moguće unaprediti sa ciljem boljeg razumevanja procesa i bolje predikcije. Formulacija statističkog modela:

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon \quad (57)$$

Y - opservirana vrednost

\hat{Y} - predikcija modela

ε - statistička greška (rezidual), izražava nesistematske uticaje na zavisnu varijablu i čini model statističkim.

Rešavanjem modela dobijaju se parametri i koeficijenti koji opisuju najbolju podudarnost modela s dobivenim eksperimentalnim podacima.

Procena parametara i testiranje hipoteza su dve metode koje se koriste u statistici zaključivanja. Matematički metodi koji koriste verovatnoću da bi doneli zaključak o osobinama populacije na osnovu osobina uzorka podataka koji su uzeti iz populacije-omogućavaju statističko zaključivanje.

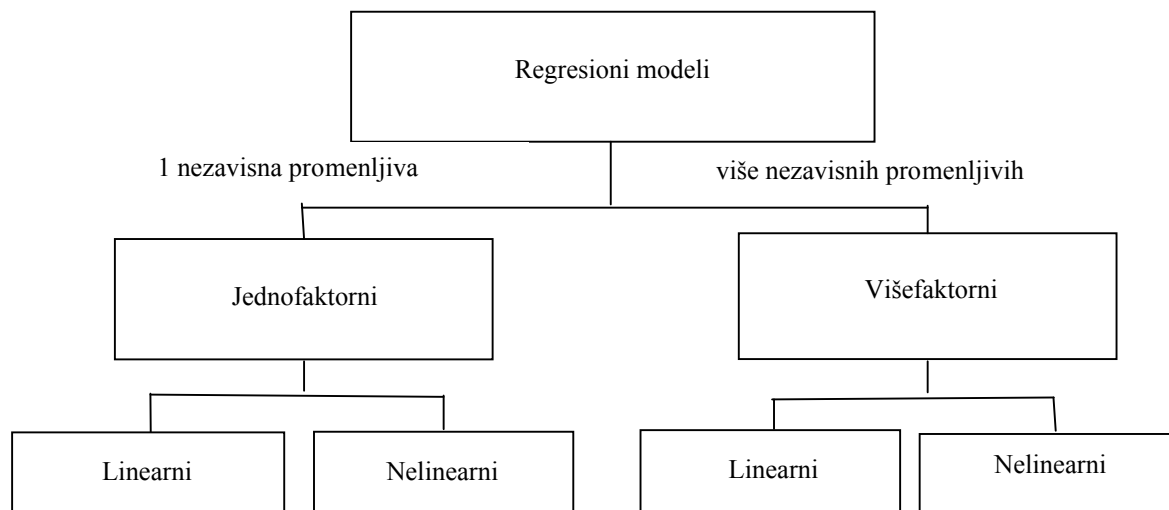
Regresioni modeli izražavaju se jednačinom u kojoj je jedna zavisna varijabla i jedna ili više nezavisnih varijabli i pomoću njega procenjujemo vrednost jedne varijable na osnovu drugih. Model treba da daje što tačniju procenu koliko će se promeniti posmatrana zavisna varijabla (kriterij) kao odgovor na promenu nezavisne varijable (faktora). Osnov ove analize je unapred pretpostaviti uzročno posledičnu vezu, tako da nezavisna varijabla uslovljava promenu zavisne varijable. Razlika između stvarne vrednosti zavisnog faktora Y i predviđene vrednosti \hat{Y} predstavlja grešku predviđanja (rezidual). Greške su skoro uvek različite od nule pa je potrebno pronaći funkciju za koju su minimalne.

Prema tome, dva su osnovna cilja koja se žele postići stvaranjem regresijskog modela:

- 1) odrediti tip realne funkcije (linearna, kvadratna, eksponencijalna, logaritamska, ...) koja najbolje opisuje vezu posmatranih varijabli;
- 2) proceniti osnovne parametre te funkcije tako da zbir kvadrata svih rezidualnih odstupanja bude što manji i analizirati uticaj svake pojedine regresorske varijable na varijacije zavisne varijable

Regresiona analiza se bavi postavljanjem stohastičkog modela objekta istraživanja kojim se na dovoljno pouzdan način objašnjava stanje i ponašanje datog objekta unutar obuhvaćenog eksperimentalnog prostora. Podela regresionih modela zasnovana je na broju

nezavisnih promenljivih i prirodi zavisnosti između njih (Spasić, 2010). Regresioni model koji sadrži jednu zavisnu (Y) i jednu nezavisnu varijablu (X) je model jednostavne regresije, a model koji sadrži jednu zavisnu (Y) i dve ili više nezavisnih varijabli je model višestruke (multiple) regresije. Na slici 35 prikazani su tipovi regresionih modela.



Slika 35: Tipovi regresionih modela

Opšti oblik modela jednostruke regresije:

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (58)$$

Opšti oblik modela višestruke regresije:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (59)$$

Kod svih modela regresije radi se o statističkoj međuzavisnosti pojava, pa modeli imaju funkcionalni deo i slučajnu promenljivu (ε) koja predodređuje nekontrolisane uticaje na zavisnu varijablu (greška ili šum koji se javlja u odzivu). Jasno je da veći broj promenljivih adekvatnije opisuje posmatranu zavisnost ali isto tako usložnjava analizu. Stoga je jedan od najvažnijih zadataka višestruke regresione i korelacione analize da izabere što je moguće manji broj promenljivih koje u velikoj meri determinišu ispitivanu zavisnu promenljivu. Ispitivanje odnosa pojava nemoguće je izvesti na svim jedinicama osnovnog skupa. Korelaciona i regresiona analiza se baziraju na manjem broju jedinica, tj. na uzorcima. Zato pri donošenju zaključaka o ispitivanom odnosu treba voditi računa o mogućnosti uopštenja zaključaka na cele osnovne skupove. Regresioni model predstavlja sredstvo pomoću kojeg možemo da ocenimo i predvidimo ponašanje zavisne promenljive za željene vrednosti nezavisne promenljive.

Utvrđivanje stepena kvantitativnog slaganja varijacija promenljivih predmet je korelacione analize. Pod pojmom korelaciona analiza podrazumeva se skup statističkih procedura za ispitivanje postojanja, jačine i smera veze između dve ili više varijabli. Vrednost

korelacije iskazuje se koeficijentom korelacije, dok se značajnost iskazuje p vrednošću. U praksi se najčešće koriste modeli koji se postupnim transformacijama mogu prevesti u modele linearne regresije (eksponencijalni, logaritamski, recipročni...) i modeli polinomske regresije.

2.3.2.2. Model višestruke (multiple) regresije

Multipla regresija omogućuje da sagledamo učinak dve ili više nezavisnih varijabli (prediktorskih) na zavisnu (kriterijumsku). U slučajevima kada se pojavljuje najmanje tri nezavisne varijable nemoguće je dati grafički prikaz ali se i u takvim slučajevima mogu proceniti parametri modela i dati njihova interpretacija, računati odgovarajući analogni koeficijent (linearne) korelacije, koeficijent determinacije i td.

Opšti oblik modela višestruke regresije je:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (60)$$

ili

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k) \cdot \varepsilon \quad (61)$$

U navedenom modelu Y je zavisna varijabla. To je pojava čije se varijacije izražavaju pomoću nezavisnih (regresorskih) varijabli X_1, X_2, \dots, X_k . Varijabla ε izražava nepoznata odstupanja od funkcionalnog odnosa.

Prva jednačina je aditivni a druga multiplikativni oblik modela.

Pretpostavi li se da je veza između Y i (X_1, X_2, \dots, X_k) linearna model je višestruke linearne regresije čija je aproksimacijska funkcija model prvog reda oblika:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + \varepsilon \quad (62)$$

odnosno u drugačijoj postavci:

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon \quad (63)$$

Model pokazuje da je ponašanje zavisne varijable objašnjeno linearnom kombinacijom k nezavisnih varijabli, što predstavlja hiperravan u k-dimenzionom prostoru (k-broj varijabli), a odgovarajuća jednačina tog modela je (ocenjeni model za predviđanje):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (64)$$

Parametri:

b_1, b_2, \dots, b_k zovu se regresijski koeficijenti modela (koeficijenti višestruke regresije),

b_0 je regresijska konstanta (slobodan član)

ε je stohastička varijabla koja „meri“ grešku procene (rezidual sa očekivanjem nula).

Vrednosti koeficijenta se procenjuju iz uzorka koji se sastoji od $k+1$ -dimenzionih podataka, metodom najmanjih kvadrata. Već za $k=3$ ta metoda postaje dovoljno složena da se moraju koristiti računari.

2.3.2.3. Multivarijantna statistička analiza regresijskog modela

Multivarijantna regresijska analiza postupak je linearnog razlaganja neke izmerene kriterijske varijable na varijabilnost koja se može objasniti drugim varijablama i na varijabilitet koji nije moguće objasniti. Struktura objašnjenog varijabiliteta određuje se na osnovu udela pojedinih prediktora u objašnjenom varijabilitetu.

Multivarijantna regresijska analiza bila je prvi postupak empirijske analize valjanosti na osnovu poznatih prediktora. Postupak ima i praktičnu primenu u vidu prognoze očekivane vrednosti jedne varijable za unapred zadate vrednosti drugih varijabli.

Najvažniji elementi u postupku eksperimentalne identifikacije, nakon što su podaci sa procesa prikupljeni, da se probaju razne strukture modela, izračuna najbolji model u tim strukturama, a zatim da se validira taj model.

2.3.2.4. Inferencijalno statistička analiza – procena parametara i testiranje hipoteza o parametrima.

Inferencijalno statistička analiza polazi od pretpostavke o statističkoj prirodi procesa koji generira podatke i koji se mogu smatrati uzorkom procesa. Uzorak predstavljaju stvarne vrednosti zavisne varijable za date vrednosti nezavisnih varijabli. Metodama inferencijalne statistike na osnovu ispitivanja određenog dela (uzorka) posmatranog objekta donose se zaključci o karakteristikama svih posmatranih objekata. Pri izvođenju takvih zaključaka postoji određeni rizik pogrešno izvedenih zaključaka. Rizik i nesigurnost u primeni rezultata dobijenih istraživanjem na osnovu uzorka procenjuje se na osnovu načela teorije verovatnoće. To uključuje: procenu parametara, procenu vrednosti zavisne varijable, testiranje hipoteza i sprovođenje drugih postupaka.

2.3.2.5. Procena parametara

Problem procene parametara matematičkog modela je jedan od najčešćih zadataka svakog eksperimentalnog istraživanja. Zadatak procene parametara je odrediti procene $\hat{\beta}_i$ pravih vrednosti parametara β_i na osnovu uzorka s n merenja parova ulaznih i izlazne veličine

$$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1j}, \dots, x_{1k}, y_1$$

$$\begin{array}{l}
 x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2j}, \dots, x_{2k}, y_2 \\
 \text{-----} \\
 x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{ik}, y_i \\
 \text{-----} \\
 x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nj}, \dots, x_{nk}, y_n
 \end{array} \tag{65}$$

Iz datih podataka gradi se sistem jednačina:

$$\begin{array}{l}
 y_1 = b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{12} + \dots + b_jx_{1j} + \dots + b_kx_{1k} + \varepsilon_1 \\
 y_2 = b_0 + b_1x_{21} + b_2x_{22} + \dots + b_jx_{2j} + \dots + b_kx_{2k} + \varepsilon_2 \\
 \dots \\
 \dots \\
 y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_jx_{ij} + \dots + b_kx_{ik} + \varepsilon_i \\
 \dots \\
 \dots \\
 y_n = b_0 + b_1x_{n1} + b_2x_{n2} + \dots + b_jx_{nj} + \dots + b_kx_{nk} + \varepsilon_n
 \end{array} \tag{66}$$

odnosno kraće regresijski model uzorka k-varijabli:

$$y_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1x_{i1} + \hat{b}_2x_{i2} + \dots + \hat{b}_jx_{ij} + \dots + \hat{b}_kx_{ik} + \varepsilon_i \tag{67}$$

Isto to se može zapisati u matricnoj notaciji:

$$Y = X\hat{b} + \varepsilon \text{ - matricni zapis eksperimenta} \tag{68}$$

gde su:

$$\begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_i \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1j} & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2j} & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{i1} & x_{i2} & \cdot & \cdot & x_{ij} & \cdot & \cdot & x_{ik} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{nj} & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \hat{b} = \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{b}_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{b}_n \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \\
 n \times 1 \qquad \qquad n \times k \qquad \qquad k \times 1 \quad n \times 1
 \end{array} \tag{69}$$

Y – vektor izmerenih vrednosti zavisne varijable

X – matrica čija prva kolona sadrži jedinice, a ostale kolone izmerene vrednosti nezavisnih varijabli x_1, x_2, \dots, x_k

\hat{b} – vektor nepoznatih parametara

ε – vektor slučajnih varijabli

(y_i – i-to opažanje (merenje) zavisne varijable; x_{ij} – i-to opažanje j-te zavisne varijable)

Postoji više statističkih metoda procene parametara, a najčešće korišćena je metoda najmanjih kvadrata. Rezidualna promenljiva može se izraziti kao razlika između prave vrednosti zavisne promenljive i vrednosti dobijene na osnovu regresione funkcije osnovne populacije:

$$\varepsilon_i = y_i - (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_{i1} + \hat{b}_2 x_{i2} + \dots + \hat{b}_k x_{ik}) \quad (70)$$

Cilj multivarijantne regresione analize je dobiti najbolju regresijsku funkciju, tj. minimizirati sumu:

$$\min \sum (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (71)$$

U postupku identifikacije potrebno je odrediti vektor parametara $\hat{\beta}$ matematičkog modela tako da odstupanja matematičkog modela od stvarnog procesa budu što manja u stacionarnom i dinamičkom režimu rada. Identifikacija procesa pomoću postupka procene parametara zasniva se na obradi izmerenih ulazno/izlaznih signala posmatranog procesa. Valjanost identifikacije na taj način jako zavisi od informacija koje sadrže merni signali. Zato su izbor i obrada ulazno/izlaznih signala posebno važni.

Rezidualna ili neprotumačena suma kvadrata odstupanja (SR) jednaka je razlici između ukupne sume kvadrata odstupanja (ST) i sume kvadrata odstupanja protumačenih modelom (SP):

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (72)$$

$$ST = SP + SR$$

ST – ukupna suma kvadrata odstupanja tj. suma kvadrata odstupanja izmerenih vrednosti od proseka

SP- protumačena suma kvadrata tj. suma kvadrata odstupanja regresijskih vrednosti od proseka

SR- rezidualna suma kvadrata tj. suma kvadrata odstupanja izmerenih vrednosti od regresijskih

Ukoliko se upotrebi matrični zapis, rezidualna suma kvadrata odstupanja može se napisati na sledeći način:

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (Y_i - \hat{b}_0 - \hat{b}_1 x_{i1} - \hat{b}_2 x_{i2} - \dots - \hat{b}_j x_{ij} - \dots - \hat{b}_k x_{ik})^2 \quad (73)$$

$$\sum \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \dots \quad \varepsilon_n] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2 \quad (74)$$

$$Y = X\hat{b} + \varepsilon \rightarrow \varepsilon = Y - X\hat{b}, \quad (75)$$

pa je:

$$\varepsilon^T \varepsilon = (Y - X\hat{b})^T \cdot (Y - X\hat{b}) = Y^T Y - 2\hat{b}^T X^T Y + \hat{b}^T X^T X \hat{b} \quad (76)$$

Poslednji izraz je matricni prikaz rezidualne sume kvadrata odstupanja.

Da bi se procenili nepoznati parametri regresijskog modela potrebno je minimizirati prethodni izraz, tj. parcijalno diferencirati izraz (76) po odgovarajućim koeficijentima b_0, b_1, \dots, b_k i rešiti sistem sledećih jednačina:

$$\frac{\partial(\varepsilon^T \varepsilon)}{\partial \hat{b}} = 0 \Rightarrow -2X^T Y + 2X^T X \hat{b} = 0, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (77)$$

Iz predhodnog proizilazi sistem normiranih jednačina u matricnoj notaciji: $X^T(Y - X\hat{b}) = 0$, ako se relacija sredi dobije se da je:

$$X^T Y = (X^T X) \hat{b} \quad (78)$$

Množenjem predhodnog izraza sa inverznom matricom $(X^T X)^{-1}$, dobije se:

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = (X^T X)^{-1} (X^T X) \hat{b} \quad (79)$$

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = I \hat{b}$$

U matricnom obliku ocena parametara višestruke regresije je:

$$\hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (80)$$

gde su:

$$\hat{b} = \begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \\ \vdots \\ \hat{b}_k \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (81)$$

Iz predhodne relacije sledi da je:

$$\hat{Y} = X\hat{b} \quad (82)$$

\hat{Y} predstavlja ortogonalnu projekciju vektora Y na k – dimenzionalni prostor određen regresorskim varijablama.

Procenjeni regresijski model:

$$\hat{Y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \dots + \hat{b}_k x_k \quad (83)$$

Ocenjeni parametar $\hat{b}_j = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_j}$, $j = 0, 1, 2, \dots, k$ se interpretira kao očekivana vrednost zavisne varijable za jedinični porast nezavisne varijable x_j uz pretpostavku da su ostale $k-1$ regresorske varijable nepromenjene.

Interpretacija parametara modela višestruke linearne regresije je:

- regresijski koeficijent pokazuje prosečnu promenu zavisne varijable u originalnim jedinicama mere kada odgovarajuća nezavisna varijabla poraste za jednu jedinicu (statistička obrada se provodi u kodiranim vrednostima), a vrednosti svih ostalih nezavisnih varijabli ostanu nepromenjene.
- regresijska konstanta (manje važan parametar modela) je očekivana vrednost zavisne varijable u originalnim jedinicama mere kada su sve nezavisne varijable jednake nuli ($b_0 = \hat{Y}$ kada je $X_i = 0$)

Dakle, regresijski koeficijenti svojom veličinom direktno govore o doprinosu odgovarajućih prediktorskih varijabli zavisnoj ili kriterijumskoj. Određivanjem koeficijenata regresije jednačine dobiće se predstava o uticaju razmatranih faktora na proces, o njihovom uzajamnom dejstvu i o pravcu kretanja ka optimalnoj oblasti.

Vrlo često modeli nisu linearni i parametri se procenjuju iterativnim postupkom.

2.3.3. OCENA REPREZENTATIVNOSTI MODELA – VALIDACIJA

Treba imati na umu da rešenje modela nije uvek i rešenje stvarnog sistema koji modeliramo. Za svaki ulaz uvek postoji razlika između odziva modela i odziva stvarnog sistema. Postavlja se pitanje da li je razlika između spomenutih odziva značajna. Provera validnosti modela sastoji se u tome da se izlazi modela i stvarnog sistema upoređuju za isti ulaz kako bi se utvrdilo da li model odgovara svrsi utvrđenoj na početku. Validacija (vrednovanje) ispituje da li model predstavlja sistem sa željenom tačnošću sistem koji je modelom opisan, tj. koliko je dobro sistem opisan modelom (R.A. Fisher, 1915; D.C. Montgomery, 2012; I. Pantelić, 1984; J. Stanić, 1990; J. Stankov, 1982).

Model ćemo prihvatiti ako razlika između odziva sistema i odziva modela nije veća od one koja je rezultat slučajnosti (slučajnih kolebanja). Testiranje da li je dati model odgovarajući (provera da li služi svojoj nameni) je poznato kao validacija modela.

Nakon ocene parametara regresionog modela postavlja se pitanje reprezentativnosti, odnosno sposobnosti modela da objasni kretanje zavisne varijable Y uz pomoć nezavisnih varijabli (x_1, x_2, \dots, x_k). Upotrebljivost modela višestruke linearne regresije za predviđanje i ocenjivanje vrednosti zavisne varijable proverava se testiranjem. Za testiranje može se koristiti F-test i t-test, kojima se proverava da li oblik zavisnosti utvrđene na osnovu raspoloživih podataka (podataka uzorka) važi za osnovni skup (populaciju). Samo u tom slučaju regresioni model može poslužiti za dalju statističku analizu i unapređenje procesa.

Mere kvaliteta višestrukog regresijskog modela su:

- koeficijent višestruke linearne korelacije
- koeficijent determinacije
- standardna greška regresije
- ANOVA tablica.

2.3.3.1. Analiza varijanse u modelu višestruke linearne regresije

ANOVA je moćni postupak za analizu kvaliteta regresijskog modela i služi za njegovu proveru. Analiza varijanse statistička je metoda analize empirijskih podataka, kojom se ispituje da li jedan određeni faktor utiče na rezultat eksperimenta.

Varijansa predstavlja prosečno kvadratno odstupanje svih podataka od aritmetičke sredine i opisana je sledećim izrazom:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (84)$$

Varijansa unutar modela može se rastaviti na delove, a zatim se stavljanjem tih delova u odnos otkrivaju činjenice o modelu.

Jednačina analize varijanse višestruke (multiple) regresije glasi:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (85)$$

$$ST = SP + SR$$

i predstavlja temelj za analize reprezentivnosti regresijskog modela.

$$ST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = Y^T Y - n\bar{Y}^2 - \text{ukupna suma kvadrata tj. suma kvadrata odstupanja}$$

stvarnih vrednosti zavisne varijable od proseka,

$$SP = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \hat{b}^T (X^T Y) - n\bar{Y}^2 - \text{protumačena suma kvadrata tj. suma kvadrata}$$

odstupanja regresijskih vrednosti od proseka

$$SR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = Y^T Y - n\bar{Y}^2 - \text{neprotumačena (rezidualna) suma kvadrata tj. suma}$$

kvadrata odstupanja stvarnih vrednosti zavisne varijable od regresijskih vrednosti.

SR je procena varijabilnosti duž regresijske linije i koristi se za nalaženje procene standardne greške pojedinih koeficijenata b_i .

Pod dele li se sume kvadrata s odgovarajućim stepenima slobode dolazi se do sredina kvadrata koje su nezavisne procene komponenti varijanse. Sume kvadrata, stepeni slobode, sredine kvadrata i druge informacije daju se u tabeli 2 analize varijanse (ANOVA).

Tabela 2: Opšti oblik tabele ANOVA za model višestruke linearne regresije (D.C. Montgomery i G.C. Runger, 2006)

Izvor varijacije	DF	Sume kvadrata SS	Sredine kvadrata MS	F-odnos	PROB _{>} F
Protumačen modelom	k	SP	SP/k	$\frac{SP/k}{SR/(n-(k+1))}$	
Neprotumačena odstupanja	n-(k+1)	SR	SR/(n-(k+1))		
Ukupno	n-1	ST			

U tabeli 3 prikazana je matična formulacija analize varijanse za linearni regresioni model k-varijabli.

Tabela 3: Matična formulacija analize varijanse za linearni regresioni model k-varijabli (D.C. Montgomery i G.C. Runger, 2006)

Izvor varijacije	DF	Sume kvadrata SS	Sredine kvadrata MS
Protumačen modelom	k	$\hat{b}^T X^T Y - n\bar{Y}^2$	$\frac{\hat{b}^T X^T Y - n\bar{Y}^2}{k}$
Neprotumačena odstupanja	n-(k+1)	$Y^T Y - \hat{b}^T X^T Y$	$\frac{Y^T Y - \hat{b}^T X^T Y}{n-(k+1)}$
Ukupno	n-1	$Y^T Y - n\bar{Y}^2$	

Rezidualna suma kvadrata podeljena s $(n-(k+1))$ stepeni slobode je procena varijanse regresije (srednja suma kvadrata odstupanja):

$$s^2 = \frac{SR}{n - (k + 1)} \quad (86)$$

Pozitivni drugi koren iz procene varijanse regresije je procena standardne devijacije (greške) regresije, koja se tumači kao prosečno odstupanje empirijskih od regresijskih vrednosti:

$$s = \sqrt{\frac{SR}{n - (k + 1)}} \quad (87)$$

Standardna greška regresije je apsolutni pokazatelj reprezentativnosti regresijskog modela. Izražen je u originalnim jedinicama mere zavisne varijable Y, zato je na osnovu standardne greške regresije teško ustanoviti reprezentativnost modela s različitim mernim jedinicama. Taj problem eliminiše koeficijent varijacije regresije, relativni pokazatelj, koji predstavlja procenat standardne greške regresije od aritmetičke sredine varijable Y:

$$V_{\bar{Y}} = \frac{s}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (88)$$

Najmanja vrednost koeficijenta varijacije je 0%, a najveća nije definisana. Što je koeficijent varijacije regresijskog modela bliži 0 model je reprezentativniji. Dogovorena granica reprezentativnosti je 10%. Model je dobar ako je koeficijent varijacije regresijskog modela manji od 10%.

Koeficijent determinacije R^2 – specifični pokazatelj reprezentativnosti regresije (mera korisnosti modela), predstavlja odnos:

$$R^2 = \frac{\text{objašnjeni varijabilitet}}{\text{ukupni varijabilitet}} \quad (89)$$

$$R^2 = \frac{SP}{ST} = 1 - \frac{SR}{ST} = 1 - \frac{[n - (k + 1)]s^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\hat{b}^T X^T Y - n\bar{Y}^2}{Y^T Y - n\bar{Y}^2} \quad (90)$$

Mera sposobnosti predviđanja regresionim modelom je koeficijent determinacije. Taj pokazatelj uzima vrednosti na segmentu $[0,1]$, a posmatrani je model to reprezentativniji što je koeficijent determinacije bliži jedinici. Koeficijent determinacije multivarijantnog modela pokazuje procenat varijacija zavisne promenljive objašnjen zajedničkim uticajem regresora.

Korigovani koeficijent determinacije:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)}(1-R^2) \quad (91)$$

je asimptotski nepristrasna ocena determinacije.

Osnovni kriterijum za prihvatanje regresione jednačine je visoka vrednost koeficijenta višestruke linearne korelacije (R). Koeficijent multiple korelacije R pokazuje kolika je povezanost između zavisne varijable, s jedne strane, i linearne kombinacije prediktorskih varijabli (korelacija između Y i \hat{Y}). Visoka vrednost koeficijenta R indicira dobru relaciju i obrnuto što je korelacija niža to je prognoza nepreciznija. Koeficijent R odlikava koliko dobro korelira grupa nezavisnih varijabli sa zavisnom.

Ako model zadovoljava definisane zahteve koristi se u prognostičke svrhe.

2.3.3.2. Testovi značajnosti regresijskog modela

U regresionoj analizi se mora utvrditi da li je nezavisna varijabla statistički značajna za ponašanje zavisne varijable, što je neophodno kod predviđanja.

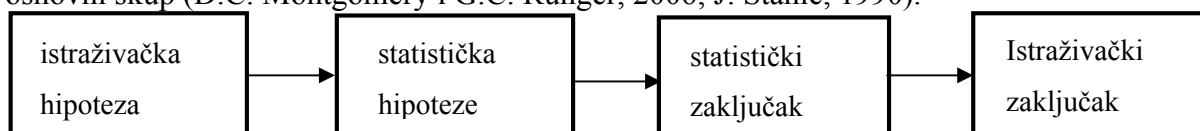
Pre tumačenja rezultata potrebno je testirati njihovu statističku značajnost. Ako koeficijent korelacije i regresioni koeficijenti nisu statistički značajni, zaključuje se da nijedna nezavisna varijabla nema stvarnu povezanost sa zavisnom tj. da dobijeni model nema praktičnu vrednost. Većina statističkih softvera ima opciju testiranja.

Testiranje statističkih hipoteza – predstavlja metodu odlučivanja upotrebom podataka iz kontrolisanog eksperimenta. Svrha testiranja hipoteza je da se potvrdi ili opovrgne hipoteza o posmatranoj pojavi, a na osnovu podataka koji su sakupljeni na uzorku.

Koraci u testiranju hipoteza:

- Formirati H_0 i H_1
- Odabrati nivo značajnosti (α -nivo)
- Odabrati dvosmerno ili jednosmerno testiranje zavisno od formulacije alternativne hipoteze
- Odabrati statistički test i izračunati statistiku testa (empirijsku vrednost)
- Odrediti oblast odbacivanja-teorijska (granična, kritična) vrednost
- Uporediti empirijsku i teorijsku vrednost test statistike. Odabaciti H_0 i prihvatiti H_1 ako statistika testa u regionu odbacivanja ($p \leq \alpha$). Prihvatiti H_0 ako statistika testa nije u regionu odbacivanja ($p > \alpha$)

Istraživačka hipoteza se konvertuje u nultu i alternativnu hipotezu, čija formulacija treba da omogući statističko testiranje hipoteza. posle statističkog testiranja hipoteze, dobijeni statistički zaključci se konvertuju u istraživački zaključak. Zaključak se zatim generalizuje na osnovni skup (D.C. Montgomery i G.C. Runger, 2006; J. Stanić, 1990).



Zajedničko testiranje nulte hipoteze da ni jedna objašnjavajuća promjenljiva nema značajnog uticaja na zavisnu promenljivu

$$H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0 \quad (92)$$

$$H_1: \exists b_j \neq 0$$

što je ekvivalentno:

$$H_0 \quad R^2 = 0 \text{ (povezanost prediktora i kriterija)}$$

$$H_1 \quad R^2 \neq 0$$

testira se statistikom koja počiva na odnosu objašnjene i neobjašnjene varijacije:

$$F = \frac{\frac{SP}{k}}{\frac{SR}{n-(k+1)}} = \frac{\frac{R^2}{k}}{\frac{1-R^2}{n-(k+1)}} - \text{empirijski F odnos} \quad (93)$$

k - broj objašnjavajućih promenljivih modela

n - broj jedinica osmatranja

Donošenje odluke:

ako je izračunata vrednost veća od kritične vrednosti F-distribucije (tablične vrednosti) za nivo signifikantnosti α i brojeve stepeni slobode k i $n - (k + 1)$ zaključuje se da regresori imaju značajan zajednički uticaj na promene zavisne varijable, što se može zapisati:

$$F > F_{\alpha, [k, (n-(k+1))]} \rightarrow \text{odbacuje se } H_0 \quad (94)$$

ili

$$p - \text{vrednost} < \alpha \rightarrow \text{odbacuje se } H_0$$

$$p - \text{vrednost} > \alpha \rightarrow \text{prihvatamo } H_0$$

U programskim paketima kao što su STATISTICA koristi se p-vrednost za testiranje hipoteza. p-vrednost je najmanja vrednost verovatnoće nastanka greške prve vrste, za koje još uvek odbacujemo H_0 .

Istovremeno, ovaj rezultat se tretira i kao pokazatelj statističke značajnosti koeficijenta determinacije. Ako je $F > F_{\alpha, [k, (n-(k+1))]}$ znači da je koeficijent determinacije statistički značajan (uz 5% rizika greške).

Za pojedinačno testiranje hipoteze o regresionim koeficijentima $\beta_j = 0$ koristi se ista logika, samo što se zbog $k=1$, F odnos svodi na t-odnos s $n-2$ stepena slobode.

Test statističke značajnosti ocenjenih paramrtara izvodi se na osnovu relacije:

$$t_j = \frac{\hat{b}_j}{s_j}, \quad \forall j \quad (95)$$

s_j - standardna greška ocenjenog parametra b_j

Ako je apsolutna vrednost statistike veća od kritične vrednosti t-distribucije uz nivo signifikantnosti α i broj stepeni slobode (n-2), tada se ocena parametra statistički značajno razlikuje od nule, i izvodi se zaključak da j-ti regresor značajno utiče na zavisnu varijablu. Ovim se dobijaju informacije o značajnosti individualnog uticaja pojedinih regresora na zavisnu promenljivu.

Ako model ispunjava definisane zahteve koristi se u prognostičke svrhe.

Kompletno prikazana metodologija nazvana je metodologija odziva površine (response surface methodology – RSM) predložena od strane R.A. Fisher, 1935 i G.E.P. Box i K.B. Wilson, 1951.

Matematički i literaturni prikaz ove metodologije prikazan je mnogim radovima, kao što su npr.: M.J. Anderson i P.J. Whitcomb, 2005; G.E.P. Box i N.R. Draper, 1959; D.J. Downing, R.H. Gardner i F.O. Hoffman, 1985; N.R. Draper i D.K.J. Lin, 1990; W.J. Hill i W.G. Hunter, 1966; H.M. Ibrahim i E.E. Elkhidir, 2011; A.I. Khuri, 2006 i 2011; X. Lu, D.K.J. Lin i D. Zhou, 2009; D.C. Montgomery, 2012; M.D. Morris, 2000; R.H. Myers, 1999; R.H. Myers i sar., 2004 i 2009; I. Pantelić, 1984a i 1984b; R. Paunović, 2010; J. Stanić, 1990; J. Stankov, 1982; M. Ukrainczyk, 2010; Ю.П. Адлер, i sar., 1976; В.В. Налимов, 1969 i 1971; В.В. Налимов i Н.А. Чернова, 1965 i mnogi drugi.

Izbor varijante matematičkog modela kod različitih tehnoloških procesa za jednofaktorne regresione modele prikazan je u radovima P. Dašića, 2006 i 2011 i P. Dašić i G. Petropoulos, 2002 i za višefaktorne regresione modele prikazan je u radovima P. Dašića, 1987, 2001, 2003 i 2013.

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je eksperimentalna identifikacija procesa i (izučavanje) matematičko modeliranje kinetike sušenja jabuke sorte Crveni delišes u laboratorijskoj kondenzacionoj sušari uz optimizaciju utroška energije, vremena trajanja procesa uz što je moguće veće očuvanje izvornog kvaliteta. Eksperimentalna identifikacija zasniva se na merenju ulazno/izlaznih veličina procesa i obradi tih veličina. Ispitati (ustanoviti) uticaj i dati doprinos razumevanju delovanja različitih procesnih parametara sušenja, u laboratorijskoj kondenzacionoj sušari, pri kojima se dobija kvalitetan suvi proizvod. Brojni parametri procesa sušenja utiču na kvalitet sušenog proizvoda. Pri analizi sušenja moguće je razmotriti veći broj različitih parametara procesa, ali su najčešće istraživanja usmerena na manji broj najuticajnijih parametara koji tokom procesa sušenja utiču na kvalitet i dužinu trajanja procesa sušenja.

U analizi efekata parametara koji utiču na kvalitet sušenog proizvoda primenjen je metod statističkog planiranja eksperimenta (plan eksperimenta i statistička obrada rezultata). Plan eksperimenta napravljen je prema modelu faktorski planovi eksperimenta, čijom se primenom na brz, kontrolisan i razumljiv način dolazi do optimalnih rešenja problema i postižu se uštede ljudskih, vremenskih i finansijskih resursa.

Analiza procesa sušenja trajno doprinosi njegovom efikasnijem vođenju (upravljanju) i kontinuiranom poboljšanju.

Ovim istraživačkim radom želi se kreirati matemtički put iznalaženja optimalnog procesa sušenja u pogledu njegove efikasnosti, kvaliteta proizvoda i cene koštanja.

Na osnovu prikupljenih rezultata i parametara regresijske analize za svaki pojedini model treba dati odgovor na sledeća pitanja:

- Koliko dobro sve nezavisne varijable kombinovano objašnjavaju varijacije zavisne varijable (R^2 - koeficijent determinacije)
- Kolika je relativna važnost svake nezavisne varijable u objašnjavanju varijacija zavisne varijable (koeficijenti regresije)
- Koja je najbolja predviđena vrednost zavisne varijable za bilo koju kombinaciju nezavisnih varijabli
- Koji se obim promene zavisne varijable može očekivati za jedinicu promene svake nezavisne varijable (koeficijenti proste korelacije)

Ovim radom želi se kreirati matematički model procesa sušenja, na osnovu eksperimentalnih istraživanja, koji će poslužiti za simulaciju procesa na računaru čime se omogućava „eksperimentisanje“ na matematičkom modelu, umesto na stvarnom procesu. Cilj je simulacija odziva (procena parametara kvaliteta) na različita ulazna dejstva i pronalaženje optimalne kombinacije parametara procesa sušenja i njegova ekstrapolacija sa modela u poluindustrijske i industrijske razmere.

Temeljni cilj rada jeste da istraživanje rezultira podacima za primenu u praksi, tj. da se korisnicima preporuče režimi sušenja koji će dati bolje efekte kada je reč o kvalitetu i utrošku energije što direktno utiče na cenu koštanja finalnog proizvoda. (utvrditi mogućnosti poboljšanja kvaliteta sušenog proizvoda) kao i proširivanje postojećeg skupa znanja u području procene parametara kvaliteta sušenih proizvoda na različita ulazna dejstva na osnovu eksperimenta.

3.1. HIPOTEZE RADA

U radu se istražuje i opisuje modeliranje složenog termodifuzionog procesa sušenja voća. Dešavanja u radnom prostoru sušare tokom procesa imaju presudni uticaj na kvalitet sušenog proizvoda. Za navedeno istraživanje i izradu matematičkog modela procesa koriste se laboratorijska merenja na fizičkom modelu – primarna istraživanja i identifikacija procesa na osnovu rezultata eksperimenata.

Na kvalitet sušenog voća i energetske efikasnost procesa sušenja može se uticati menjanjem pojedinih procesnih parametara (temperatura sušenja, brzina strujanja vazduha, pritisak vazduha) i konstrukcionim parametrima uređaja.

Polazeći od definicije predmeta i cilja disertacije istraživanje je sprovedeno s ciljem da se potvrde (ili odbace) sledeće hipoteze:

H1: Na osnovu polaznih podataka i veličina, kao i na osnovu veličina merenih u toku procesa sušenja (merenjima mase materijala za vreme sušenja u određenim vremenskim razmacima) mogu se dobiti krive kinetike sušenja. Krive sušenja mogu se predstaviti grafički i matematičkim modelom – polinomnom regresijom (polinomom n-tog stepena).

H2: Istraživanjem na osnovu eksperimenta moguće je utvrditi uticaj pojedinih procesnih parametara na kvalitet sušenog proizvoda (sadržaj šećera, sadržaj ukupnih kiselina) i dužinu trajanja procesa, osim toga moguće je definisati i veličinu uticaja svakog parametra kao i njihovih međudejstava.

H3: Primenom faktorskih planova eksperimenta moguće je izraditi eksperimentalne matematičke modele za opisivanje uticaja parametara sušenja na kvalitet finalnog proizvoda odnosno matematičke modele kojima će se moći zavisno od ulaznih parametara predvideti kvalitet sušenih proizvoda .

U cilju dokazivanja radne hipoteze i izrade matematičkog modela i grafičkog prikaza uticaja procesnih parametara na promenu merenog svojstva biće sprovedeno eksperimentalno istraživanje sa 10 stanja eksperimenta u svim kombinacijama procesnih parametara.

Kao rezultat istraživačkog rada na ovoj temi očekuje se potvrđivanje radnih hipoteza.

Očekivani rezultati istraživanja trebalo bi da unaprede postupak sušenja u praksi, da se izmenama u postupku sušenja i minimalnim izmenama postojećih konstrukcija sušara dostigne željeni efekat očuvanja kvaliteta sušenog voća i skraćenje trajanja sušenja uz ostvarenje uštede energije. Unapređenje postupka sušenja uključuje razvoj matematičkih modela koji imaju važnu ulogu u optimiranju parametara procesa sušenja, zasnovanih na rezultatima sprovedenih eksperimenata. Matematički model opisuje kako kvalitet sušenih proizvoda zavisi od ključnih procesnih parametara.

4. MATERIJAL I METOD RADA

U ovom poglavlju su opisani materijal (sirovina), oprema i metode istraživanja koji su korišćeni tokom izvođenja eksperimenta.

4.1. MATERIJAL KORIŠĆEN U RADU

Uopšteno govoreći, voće i povrće služi organizmu kao izvor energije i niza prehrambeno korisnih materija (minerali, vitamini, organske kiseline...) koje služe ćelijama za normalno obavljanje njihovih funkcija. Posle sazrevanja plodovi voća se mogu koristiti u svežem stanju ili za preradu u veći broj prerađevina. Jedna od grupa gotovog proizvoda je sušeno (suvo) voće. Sušenju se mogu podvrgavati skoro sve voćne vrste, dok se od grožđa za ovu svrhu isključivo koriste bez semene sorte (Milić i Radojević, 2003). Vrste i sorte voća koje su veoma pogodne za preradu i konzervisanje su šljiva, grožđe i kajsija. Ostale vrste voća se mogu sušiti, ali imaju manju mogućnost plasmana.

Kao vlažni materijal (objekat sušenja), u ovom eksperimentalnom istraživanju će se posmatrati čvrst prehrambeni materijal (voće). Voće i povrće ima posebnu važnost u normalnoj, zdravoj ishrani. Ta važnost proizilazi iz njegove specifične prehrambene vrednosti zasnovane pre svega na biološkoj a manje na energetskej vrednosti. Takvo obeležje ponajviše je u vezi s hemijskim sastavom i organoleptičkim karakteristikama svojstvenim svežem voću. Upravo ta činjenica upućuje na relativno velike tehnološke zahteve u preradi i konzerviranju voća, inače retke pri konzerviranju drugih namirnica.

S obzirom da plodovi mnogih vrsta i sorti voća nisu pogodna sirovina za proizvodnju kvalitetnog proizvoda, posebno za inostrano tržište, odavno se nametnula potreba za uvođenjem u proizvodnju tzv. industrijskog voća, odnosno sorti voća koje je isključivo namenjeno za različite oblike prerade (Milić i sar., 2006). U pitanju je proizvodnja sirovina visoke tehnološke vrednosti, odnosno sirovine ujednačenog i standardnog kvaliteta, koje jedino obezbeđuje dobijanje uniformnih prerađevina od voća. Na ovaj način se industrija za preradu voća kontinuirano snabdeva sa sirovinama visokog kvaliteta i po prihvatljivoj ceni. Kod nas još uvek ne postoji dobar i širok izbor voća za preradu. Najčešće se u preradi koriste plodovi koji su inače namenjeni za neposrednu potrošnju, kao stono voće, a koji imaju određene nedostatke izazvane ubodima, mehaničkim povredama, početnim fazama plesnivosti i truleži.

Proizvodnja kvalitetnog sušenog voća, zahteva da se kod nas u potpunosti promeni pristup prema sušenju. U tom cilju je potrebno definisati:

- Primarnu proizvodnju plodova, namenjenih sušenju,

- Tehnološki postupak sušenja i
- Doradu i pakovanje suvih proizvoda prema savremenim zahtevima tržišta.

Voće je sezonskog karaktera i zbog velikog sadržaja vode spada u lako kvarljive namirnice. Konzervisanje i prerada voća podrazumevaju sprečavanje kvarenja i očuvanje bez promena u sastavu i izgledu, bez umanjenja hranljive vrednosti i higijenske ispravnosti. Kvalitet svežih plodova voća izuzetno je važan jer od njega direktno zavisi ekonomičnost proizvodnje. Tržište prihvata samo kvalitetne plodove i proizvode i spremno je za njih platiti odgovarajuću cenu.

Kvalitet plodova i suvog proizvoda utvrđuje se laboratorijskim analizama i senzornom ocenom.

Kvalitet plodova možemo definisati kao stepen njegove pogodnosti za određenu primenu (Jemrić, 1996). Plodovi voća služe za potrošnju u svežem stanju i za preradu pa tako razlikujemo.

- a) kvalitet plodova za potrošnju u svežem stanju
- b) kvalitet plodova za preradu

Za određivanje kvaliteta plodova potrebno je poznavati pokazatelje na osnovu kojih se on ocenjuje. U literaturi se najčešće pojavljuju sledeći pokazatelji:

- a) veličina ploda
- b) boja kože
- c) količina topive suve materije
- d) količina ukupnih kiselina
- e) masa ploda
- f) čvrstoća mesa

Kvalitet plodova nije jednoznačan pojam. Kriterijumi kvaliteta se razlikuju zavisno od namene plodova. Za proizvodnju sušenog proizvoda neophodno je da se odaberu pogodne sorte. Kvalitet sorte se ceni pre svega po sadržaju suve materije. Ukoliko je veći sadržaj suve materije u sirovini pored kvalitetnijeg sušenog proizvoda postiže se i ekonomičnija proizvodnja.

Svaki prehrambeni materijal sa aspekta sušenja sastoji se iz dve komponente: suve materije (SM) i vode (W). Suva materija i vlaga definišu masu sušenog materijala.

SM	W
----	---

Količina suve materije je vrlo važno svojstvo ako se radi o plodovima namenjenim za preradu, dok će to biti od manjeg značaja ako su plodovi namenjeni za potrošnju u svežem

stanju. Tada će nam biti važni vreme dozrevanja, veličina plodova, boja, aroma i ukus. Zato u prvom redu treba imati u vidu namenu plodova, pa tek onda govoriti o njihovom kvalitetu.

Sveže voće ima relativno malu energetska vrednost, izuzimajući neke vrste (banane, kesten, orah, lešnik, badem) i sušeno voće, zbog visokog sadržaja vode i visoku biološku vrednost zbog sadržaja vitamina, minerala, antioksidanasa i vlakana. Voće sadrži niz ostalih sastojaka koji su neophodni za pravilno i zdravo funkcionisanje ljudskog organizma, pa konzumiranje svežeg voća ima nezamenjivu ulogu u ishrani. Na osnovu mehaničkog i hemijskog sastava moguće je odrediti prehrambena i druga svojstva voća i povrća i preradevina.

Mehanički sastav predstavlja težinski odnos pojedinih delova (kožica ili ljuska, koštica, meso, peteljke, neupotrebljivi ili oštećeni deo ploda). U tehnologiji prerade razlikuju se dva elementa koji definišu iskoristivost sirovine i to upotrebljivi i neupotrebljivi deo (otpad). Pod otpadom se podrazumeva sve ono što se u određenom tehnološkom procesu u tom trenutku ne koristi. Odnos upotrebljivog i neupotrebljivog dela izražava se u procentima (%) i predstavlja randman. Težnja ka što većem randmanu predstavlja osnovni uslov za ekonomski isplativu proizvodnju.

Radi ocene kvaliteta svežeg voća i proizvoda od voća vrše se određena ispitivanja u bromatološkim laboratorijama. Specijalizovana laboratorija za ispitivanje kvaliteta životnih namirnica utvrđuje vrednosti parametara kvaliteta životnih namirnica, aditiva i sl., propisanih odgovarajućim pravilnicima, specifikacijom ili deklaracijom proizvoda. Tehnike rada koje se primenjuju u laboratoriji spadaju u klasične bromatološke analize, potenciometrijske analize i spektrometrijske analize. Metode su propisane pravilnicima o vršenju analiza životnih namirnica, ISO i JUS. Stručni kadar laboratorije čine diplomirani inženjeri hemije, diplomirani prehrambeni tehnolozi diplomirani hemičari i hemijski tehničari.

Osnovni hemijski konstituenti voća su voda i suva materija. Kvantitativno najznačajniji konstituent je voda koja se na različite načine vezuje u hemijsku kompoziciju voća. U sastav suve materije ulazi na hiljade jedinjenja. Možemo ih svrstati u:

- makrokonstituente (ugljeni hidrati, proteini i lipidi)
- mikrokonstituente (vitamini, minerali, pigmenti i aromatične materije)

Sadržaj suve materije u sirovini pruža jasna i određena uputstva za usmeravanje i vođenje tehnološkog postupka. Sa tehnološkog aspekta kvalitetnija sirovina ima veći sadržaj suve materije. Što je sadržaj suve materije u sirovini veći, pored kvalitetnijeg gotovog proizvoda postiže se i ekonomičnija proizvodnja. U tabeli 4 dat je mehanički sastav voća

Tabela 4: Mehanički sastav voća (Dragović-Uzelac, V. 2008)

Vrsta voća	Jestivi dio (%)			Otpadak (%)		
	Meso	Randman soka	Koštica	Peteljka	Kožica	Ukupan otpadak
Breskva	74-85	-	8-15	-	3-7	11-22
Grožđe	77-86	75-84	4	3-8	6-11	10-23
Jabuka	85-92	60-80	-	-	10-23	20-25
Kruška	84-92	64-80	-	-	10-18	20-36
Limun	60-65	45-55	3	-	35	35-40
Marelisa	82-88	-	8-15	-	6-8	14-23
Naranča	60-70	48-58	3	-	28-38	30-40
Trešnja	89-91	60-79	6-8	3	-	8-10

Hemijski sastav voća je složen i zavisi od više faktora među kojima su pored vrste i sorte, veoma bitni klimatski uslovi, pedološke osobine zemljišta, primenjene agrotehničke mere, ekoloških faktora, geografskih i klimatskih uslova, stepen zrelosti i dr. (Dobrića Randelović, 2009). Hemijski sastav voća značajan je sa gledišta ishrane i sa gledišta tehnologije. Koji tehnološki postupak će se primeniti, koje relacije mogu da se očekuju tokom prerade i kakav proizvod će se dobiti, tesno je vezano sa sastavom sirovine.

Svaka sirovina sastoji se od dela vode i suve materije. U suvoj materiji sadržani su svi parametri (minerali, pektinske materije, ugljene hidrate, kiseline, belančevine, taninske materije, masti i materije arome, boje i vitamini) koji čine prehrambenu vrednost neke namirnice (tabela 5). Udeo vode određuje se sušenjem odgovajuće pripremljenog uzorka na određenoj temperaturi do konstantne mase. Iz razlike mase uzorka pre i posle sušenja odredi se procenat vode, a razlika do 100 procenat suve materije.

Udeo suve materije definiše kvalitet sirovine i više vrednosti predstavljaju veće udele vitamina, šećera, kiselina, pektina i drugih materija.

Visoki sadržaj vode u većini voća (od 70-95%) značajno utiče na kvalitet i održivost voća od vremena berbe, pa zahteva posebne uslove transporta, čuvanja, prerade i prodaje. Vreme skladištenja voća u neprerađenom stanju je relativno kratko zbog čega se često prerađuje. Da bi se sačuvalo od kvarenja ali i dobili različiti proizvodi voće se konzervira. Najpoznatija i najefikasnija metoda konzervisanja voća je sušenje. Konvencionalni način sušenja s aktivnom izmenom vazduha je još uvek najčešće prisutan u industriji. Bazira na primeni toplotne energije. Takve metode mogu uzrokovati strukturne promene u finalnom proizvodu. Suvo voće sadrži daleko manje vitamina, posebno folne kiseline, vitamina C i tjanina.

Tabela 5: Hemijski sastav nekih vrsta voća (u 100 grama svežeg) (Jeremić, T. 2011)

Vrsta voća	Suva marejija (%)	Kiseline (%)	pH	Vitamin C (mg)
Jabuka	13,80	0,51	3,5	4
Kruška	13,55	0,21	4,8	4
Šljiva	17,65	0,63	3,6	-
Breskva	14,50	0,85	3,6	7
Marelica	11,50	1,92	3,5	10
Trešnja	13,18	0,45	4,0	3
Višnja	15,35	1,25	3,3	5
Borovnica	12,50	0,88	3,4	14
Jagoda	9,25	0,84	3,5	20
Malina	12,15	1,95	3,30	9
Kupina	11,95	0,62	3,2	21
Crni ribiz	15,80	2,40	3,3	200
Naranča	10,95	0,88	3,50	50

Voće i povrće – bogatstvo bioaktivnih sastojaka osetljivih na povišene temperature

4.1.1. Jabuka kao predmet sušenja

Kao uzorak voća koriste se jabuke. Jabuka je značajna voćna vrsta koja se koristi u ishrani u svežem stanju, kao osvežavajuće sredstvo i lek, i prerađenom u sok, voćna vina i sirće, a može se preraditi različitim načinima primenom visokih i niskih temperatura. Hemijski sastav i senzoričke karakteristike plodova jabuke značajne su u zdravoj ishrani, gde se često spominje kao izvor važnih sastojaka (nutrijenata). Pravilna ishrana sve više daje prednost konzumaciji žitarica obogaćenih komadićima voća. U pripremi takvih proizvoda često se koristi suva jabuka (Dobričević, 2008). Nakon pripreme sirovine (pranje, odstranjivanje kožice i neupotrebljivog dela) plodovi se režu u različite oblike, jer se vrlo retko suše celi plodovi. Ovalni oblik ploda određuje oblik rezanja u kolutiće, kriške, ploske, štapiće ili rezance, te kockice različitih dimenzija. Za smanjenje promene boje tkiva zbog oksidacijskih reakcija upotrebljavaju se različiti postupci hemijske ili toplotne obrade sirovine.

Obradena sirovina suši se u zatvorenom kontrolisanom prostoru (veštačko sušenje), gde se zbog razlike pritiska zagrejanog vazduha i vode u tkivu jabuke povećava količina suve materije.

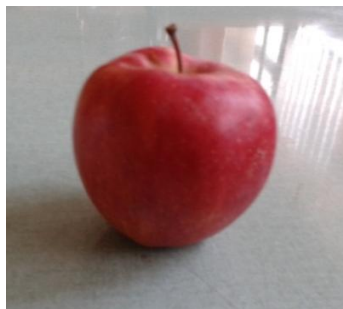
Brzina otpuštanja vode iz tkiva jabuke zavisi o mnogo uticajnih faktora kao što su temperatura i način zagrevanja sirovine, brzina vazduha kojim se suši, veličina oblika i

dimenzije rezanja sirovine ili sam oblik sirovine (Burić i Beki, 1978; Vrač, 1990; Dobričević, 1997).

Kao materijal za istraživanje u ovom radu poslužili su uzorci jabuke uzgajanog na području opštine Trstenik, sorta “crveni delišes”.

„Crveni delišes” je jedna od najpoznatijih sorti jabuke poreklom iz SAD. Ova sorta postiže zavidan kvalitet u agroekološkim uslovima Srbije i spada u vodeće svetske sorte u strukturi proizvodnje (slika 36). Karakteristike ploda:

- plodovi: dozrevaju u prvoj polovini septembra, krupni su do vrlo krupni (180 – 250 gr), konusnog oblika
- ukus: sladak i aromatičan sa hrskavim i sočnim mesom, visokim sadržajem šećera i niskim procentom kiseline
- boja: slamasto žuta, s oko 88% pokrivena površine intenzivnom tamnocrvenom sjajnom bojom.
- Skladištenje: od septembra do aprila u ULO atmosferi



Slika 36: Izgled jabuke sorte “crveni delišes”

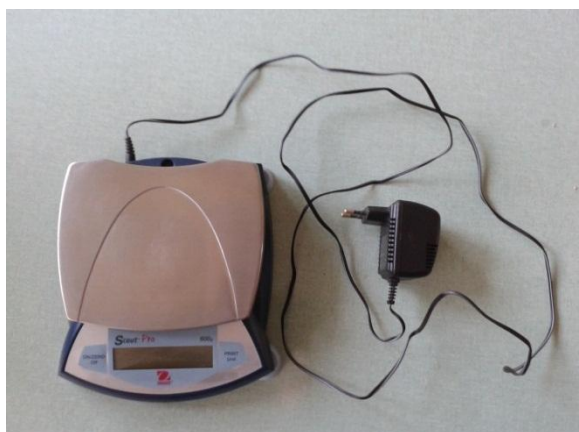
4.1.2. Mehanička i hemijska analiza plodova jabuke

Posmatrano s tehnološkog aspekta osnovni parametri kvaliteta voća kao sirovine za preradu su:

- mehanički sastav
- hemijski sastav
- tehnološka zrelost

Mehanički sastav predstavlja osnovni uslov za ekonomski isplativu proizvodnju. Mehanički sastav jabuke predstavlja težinski odnos pojedinih delova ploda (kožica, peteljka, meso, neupotrebljivi deo). Neupotrebljivi deo je sve ono što se u određenom tehnološkom procesu ne koristi. Odnos upotrebljivog i neupotrebljivog dela izražava se u % i predstavlja randman.

Na tehničkoj vagi (slika 37) izmeren je celi plod jabuke. Kuhinjskim nožem oguljena je kožica i izmerena, zatim je odstranjena semena loža zajedno sa košticama i peteljkom i izmerena.



Slika 37: Tehnička vaga

Izmerene vrednosti mase:

$$m(\text{celog ploda}) = 197,1 \text{ gr}$$

$$m(\text{kožice jabuke}) = 26,6 \text{ gr}$$

$$m(\text{peteljka} + \text{semena loža} + \text{koštica}) = 13,7 \text{ gr}$$

$$m(\text{mesa}) = 156,8 \text{ gr}$$

$$\text{Iskoristivost (\%)} = \frac{m(\text{mesa})}{m(\text{celog ploda})} \cdot 100 = \frac{156,8}{197,1} \cdot 100 = 79,55\%$$

$$\text{Udeo otpada (\%)} = \frac{m(\text{otpada})}{m(\text{celog ploda})} \cdot 100 = \frac{40,3}{197,1} \cdot 100 = 20,45\%$$

Tabela 6: Vrednosti mehaničkog sastava analizirane sorte

Sorta	Količina mesa (%)	Količina kožice (%)	Količina semene lože (%)	Količina neupotrebljivog dela (%)
“Crveni delišes”	79,55	13,49	5,46	1,5

Hemijski sastav voća je sadržaj svih sastojaka koji se nalaze u sirovini, uključujući i vodu. Hemijske analize kvaliteta sveže jabuke urađene su u akreditovanoj laboratoriji „ALFA LAB“ u Aleksandrovcu (Poglavlje 8.2, Prilog 2). Za ispitivanje hemijskog sastava ploda jabuka korišćene su standardne hemijske metode:

- sadržaj suve materije određen je refraktometrijski,
- sadržaj šećera određen je po metodi BERTTRAND-a,
- sadržaj ukupnih kiselina određen je titracijom sa NaOH.
- Sadržaj vitamina C određen je jodometrijski

Dobijeni rezultati hemijskih ispitivanja sirovih jabuka, na osnovu napred navedenih metoda su izraženi u %, i prikazani su u tabeli 7.

Tabela 7: Rezultati hemijske analize kvaliteta sveže jabuke, sorte „crveni delišes”

R. br.	Karakteristika	Jed. mere	Metoda	Dobijene vrednosti
1.	Suva materija refraktometrijski na 20°C	%	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 1	12,93
2.	Ukupne kiseline izražene kao jabučna	%	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 18	0.171
3.	Vitamin C	mg/l	AL-DM-35	< 12
4.	Sadržaj ukupnog šećera	%	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 3	10

Svi parametri su rađeni u iscedenom soku jabuke.

Hemijski sastav svežih jabuka pokazuje da je količinski najviše zastupljena voda a zatim ugljeni hidrati. Voda im ograničava trajnost u svežem stanju, jer pruža mogućnost iniciranja i odvijanja raznih biohemijskih i mikrobioloških procesa. Voda je glavni sastojak jabuka, neposredno učestvuje u izgradnji biljnog tkiva i ima uticaj na izbor i primenu metoda i postupaka konzervisanja. Prisutna količina vode nalazi se vezana u različitim oblicima. Univerzalni je rastvarač soli, vitamina, šećera, gasova, pigmenata i drugih konstituenata. Sadržaj vode u prerađenim i konzervisanim proizvodima drastično se smanjuje, tako da se menjaju ukupna fizičko hemijska svojstva a time i tekstura. Početni sadržaj vode u sirovini je 87,07% a cilj sušenja je postizanje konačnog sadržaja vode oko 8 %. Količina suve materije povećava se prosečno 6,5-7 puta.

Šećeri su posle vode najzastupljeniji sastojci u voću. U suvoj materiji ima ih i do 90%. Zahvaljujući visokom udelu ugljenih hidrata, posebno fruktoze i glukoze, jabuka obezbeđuje organizam energijom i sprečava umor i gubitak koncentracije. Sadržaj ukupnih šećera varira u dosta širokim granicama, što zavisi od sorte, stepena zrelosti kao i uslova gajenja. Šećeri sačinjavaju najveći deo rastvorljivih suvih materija, koje se određuju kao refraktometrijska vrednost. Refraktometar je optički uređaj za utvrđivanje sadržaja rastvorljivih suvih materija.

U pokazatelje kvaliteta plodova ubraja se i ukupan sadržaj kiselina. Kiselost voćnih plodova čine kiseline kao što su: limunska, jabučna, vinska a manje su zastupljene: sirćetna, jantarna, maslačna i oksalna. Ove kiseline i njihove soli daju voću kiseo ukus i usporavaju kvarenje istih uzrokovano radom bakterija i drugih mikroorganizama. Prosečna kiselost Organske kiseline imaju uticaja na boju hrane. One se nalaze u voćnom soku kao slobodne ili u obliku soli. Određivanje kiselosti se vrši titracijom s rastvorom NaOH, uz fenolftalein kao indikator.

Sadržaj kiselina i šećera su dva glavna elementa koji imaju uticaj na ukus voća. Odnos šećer/kiselina se veoma često koristi u tehnološkim zahtevima za voće u nekim vrstama. Optimalni odnos šećera i kiselina = 10 : 1.

Vitamin C (askorbinska kiselina) je vrlo nestabilno jedinjenje, oksidira u dodiru sa kiseonikom iz vazduha i svetlošću, a naročito pri povišenim temperaturama. Naročito se gubi tokom prerade, skladištenja i kuvanja. Ostali vitamini prisutni su u znatno manjim količinama.

Mineralne materije neophodne su za održavanje životnih funkcija ćelija i smatraju se jednim od fiziološki najvažnijih sastojaka voća i povrća. Mineralne materije prisutne su u obliku soli organskih i neorganskih kiselina, a najviše ima metala: K, Na, Ca, Mg i Fe. Sadržaj mineralnih materija određuje se kao pepeo, a dobija se kao ostatak spaljivanjem uzorka pro 550⁰C.

4.1.3. Priprema uzoraka jabuke za sušenje

Pre pristupanja sušenju jabuka se mora pripremiti. Za sušenje biraju se kvalitetni i zdravi plodovi u tehnološkoj zrelosti. Odstranjuju se oštećeni i truli plodovi. Pranje voća je obavezno, jer se na taj način odstranjuju ostaci zaštitnih sredstava i neželjena prljavština. Jabuke nisu ljuštene, sečene na kolutove debljine 4 mm, semenke i semena loža su mehanički odstranjene (slika 39). Rezanjem na istu debljinu osiguraće se ravnomerna dehidracija. Za rezanje na istu debljinu korišten je sekač prikazan na slici 38.



Slika 38: Sekač za rezanje jabuke



Slika 39: Rezane jabuke na jednake delove

Narezani kolutovi, u cilju sprečavanja oksidativnih promena (potamnjenja ili promene ukusa), tretirani su antioksidativnim sredstvom, potapanjem u 1% rastvor limunske kiseline u trajanju od 5 minuta. Ocedeni kolutovi sušeni su konvektivno, na okvirima s mrežicom u tankom sloju pod različitim režimima.

Tokom izvođenja eksperimenata temperatura vazduha u laboratoriji je iznosila 18-20⁰C a relativna vlažnost se kretala 60 do 65 ± 0.1%. Vrednosti su dobijene korišćenjem temohigrometra.

Svi uzorci su od početka eksperimenata skladišteni u hladnjaču na temperaturu $t=4\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Na svetskom tržištu, u poslednje vreme, postoji veliko interesovanje za sušene proizvode od jabuke (tkz. čips od jabuke). Pri konzerviranju sušenjem od tehnološkog postupka se zahteva da obezbedi gotov proizvod optimalnog kvaliteta (slika 40).



a)

b)

Slika 40: Uzorak jabuke: a) neposredno pre sušenja, b) nakon sušenja

4.2. EKSPERIMENTALNI DEO

Svrha sušenja prehrambenih sirovina u sušari je da se materijal osuši na odgovarajući % vlage što je moguće brže sa što manjim troškovima ne umanjujući pri tom njegov kvalitet.

U cilju dokazivanja hipoteze rada i izrade matematičkih modela za opisivanje uticaja parametara procesa sušenja na svojstva sušenog proizvoda, odnosno matematičkih modela kojima će se zavisno od ulaznih parametara predvideti vreme trajanja procesa i svojstva sušenog proizvoda, proveden je planirani eksperiment procesa sušenja na pilot postrojenju konvektivno-kondenzacione sušare vlastite konstrukcije. Laboratorijsko postrojenje je fizički model stvarnog procesa. Fizički model predstavlja trodimenzionalni prikaz realnog sistema koji čini funkcionalnu celinu.

4.2.1. TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA

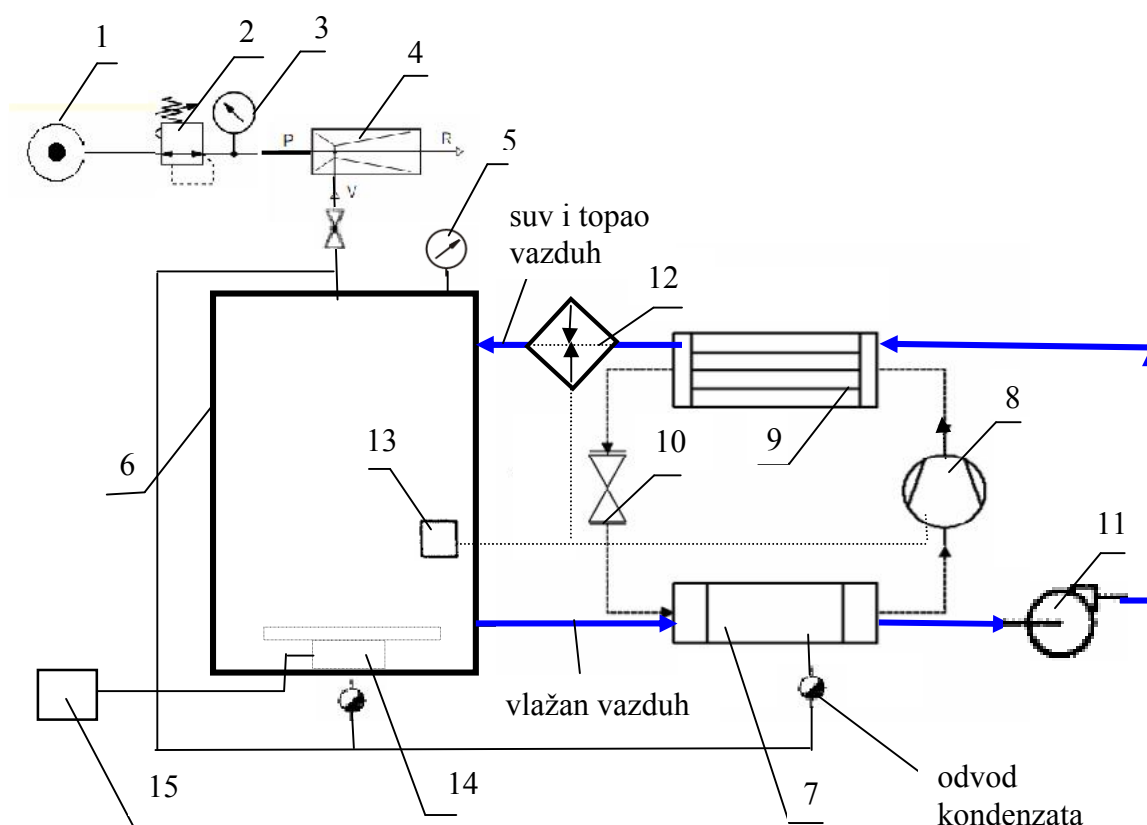
U slučaju da je nemoguće sprovesti eksperimentalnu identifikaciju objekta, a analitičke metode su neefikasne zbog složenosti procesa, budući tehnološki proces, ili njegovi pojedini delovi razrade se u laboratorijskim uslovima, a zatim se izgradi eksperimentalni fizički model. Fizički model mora u određenom smislu odgovarati realnom objektu. Ta korespondencija naziva se teorija sličnosti (podudarnosti). Sličnost mora biti dvojaka : a) geometrijska sličnost radnih zapremina modela i objekta i b) sličnost samih tehnoloških procesa. Fizičko modeliranje sastoji se u provođenju eksperimentalnih istraživanja na modelu u kome teku identični prirodni procesi u objektu sa preračunavanjem rezultata u cilju dobijanja rezultata koji su adekvatni realnom objektu (ekstrapolacija).

Svi eksperimenti konvektivnog sušenja (sušenje strujom zagrejanog vazduha u kontrolisanim i podešenim uslovima) izvedenisu u laboratorijskim uslovima na postrojenju

vlastite konstrukcije. U cilju izrade matematičkog modela i ocene kvaliteta procesa sušenja određivaće se sadržaj pojedinih sastojaka u materijalu pre i nakon sušenja kao i senzorska ocena, za svako stanje parametara određeno planom eksperimenta. Merenje se provodi mernom opremom dostupnom u specijalizovanim laboratorijama za ispitivanje kvaliteta životnih namirnica „ALFA LAB“ u Aleksandrovcu i „ZAVODU ZA JAVNO ZDRAVLJE“ u Kruševcu.

Postrojenje predstavlja integrisanu celinu koja se sastoji iz dva dela: procesnog i kontrolnog. Ti podsistemi su međusobno povezani ulaznim i izlaznim veličinama. Integrisanje procesa i kontrole zasniva se na primeni matematičkih modela pomoću računarske infrastrukture.

Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja dat je na slici 41.



Slika 41: Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja vakuum kondenzacione sušare za voće i povrće

(1-izvor komprimovanog vazduha (kompresor), 2- regulator pritiska, 3- manometar, 4- ejektor, 5- vakuummeter, 6-komora sušare, 7- isparivač, 8- rashladni kompresor, 9- kondenzator, 10- prigušni ventil, 11- ventilator, 12- grejač, 13- senzor stanja vazduha (relativne vlažnosti i temperature), 14-digitalna elektronska vaga, 15- displej)

Vakuum kondenzaciona sušara se sastoji od zatvorene, čelične konstrukcije, komornog tipa unutar koje je postavljena polica sa nosačima uzorka - lesama. U ovom uređaju za sušenje se upotrebljava zagrejani vazduh, a parametri vazduha utiču na uspeh procesa sušenja. Sušiona komora je u stvari grejna prostorija odgovarajuće termodinamičke i konstrukcione stabilnosti u kojoj se prema potrebnom režimu sušenja mogu održavati

temperatura (t), relativna vlažnost (φ), brzina strujanja (v) i pritisak vazduha (p). Opremljena je sistemima: za grejanje, odvlaživanje vazduha, prinudnu cirkulaciju, rekuperaciju toplote, sensorima i regulacijskom opremom za upravljanje i vođenje procesa sušenja različitih sorti voća i povrća. Proizvod razasrt u tankom sloju na nosačima, suši se toplim vazduhom koji struji preko slojeva, kojim se dovodi određena količina toplote potrebna za isparavanje i odvođenje vlage. Sistem koji modeliramo je sloj koji se suši na jednom od nosača. Veličine koje treba definisati modelom su parametri kvaliteta sušenog proizvoda, ali zbog interakcije materijala koji se suši i vazduha, u modelu figurišu, temperatura vazduha, njegova vlažnost i brzina strujanja.

Konstrukcija sušare znatno utiče na tok procesa sušenja. Rasipanje energije tokom sušenja i dužina trajanja procesa razlozi su zbog kojih se traže racionalniji postupci sušenja na osnovu najrazličitijih tehnika. Energija se štedi samom konstrukcijom sušare i rešenjima na njoj.

Istraživanja na eksperimentalnim postrojenjima imaju veliki značaj radi određivanja podataka potrebnih za postavljanje materijalnog i energetskog bilansa, kapaciteta sušare i dr. U cilju projektovanja industrijskih sušara potrebno je raspolagati sa niz podataka o kinetici sušenja, režimu sušenja, koeficijentu prenosa toplote i dr, iz tih razloga veliki značaj imaju istraživanja na eksperimentalnim postrojenjima. Eksperimentalno postrojenje, vlastite konstrukcije, razvijeno je i testirano za dehidrataciju (biljnog) materijala u laboratoriji za procesnu tehniku Visoke mašinsko tehničke škole u Trsteniku. Sušara je univerzalna, može služiti za sušenje voća i povrća. Radna komora sušare, kao i svi delovi kuda prolazi vazduh izrađeni su od nerđajućeg čelika, kako bi se sprečila kontaminacija materijala koji se suši i zadovoljili HACCP i ISO standardi za prehrambenu industriju. Sa čeine strane radnog prostora postavljena su vrata, sa ručnim mehanizmom za otvaranje, za punjenje i pražnjenje sušare. Sistem za raspodelu vazduha omogućuje jednoličnu raspodelu vazduha po preseku sušare i ravnomerno sušenje. Kao energent koristi se električna energija. Proces sušenja upravljan je mikroprocesorom uz različite režime sušenja. Moguće je kontrolisati temperaturu i relativnu vlagu vazduha koji su glavni parametri procesa sušenja a u isto vreme i najvažniji faktori za kvalitet osušenog proizvoda i ekonomičnost procesa. Sve potrebne veličine očitavaju se na digitalnim pokazivaču. Osim toga, sušara je opremljena (slika 42):

- podsistemom za stvaranje vakuuma (vakuum ejektor)
- podsistem za odvlaživanje vazduha (kondenzacijski agregat)
- merno-regulacioni podsistem



Slika 42: Izgled uređaja za sušenje

Glavne tehničke karakteristike sušare:

- spoljašnje dimenzije komore (širina x dužina x visina): $400 \times 500 \times 600 \text{ mm}$
- masa prazne komora: 200 kg
- zapremina komore: 120 l
- površina lese: 784 cm^2
- broj lesa: 6
- instalisana snaga: 2 kW
- regulacija: *automatska*
- električni priključak: 220 V

Sklopni crtež komore laboratoriske eksperimentalne sušare dat je u prilogu rada (Poglavlje 8.1, Prilog1).

Polica sa lesama, poređanim jedna iznad druge po visini, smešta se u radni prostor sušare (slika 43). Lesama se nazivaju drveni ramovi sa mrežastim dnom od pletene prohromske žice, dimenzija $280 \times 280 \text{ mm}$ na koje se postavlja materijal koji se suši u jednom sloju. Agens za sušenje definisanih karakteristika ne prolazi kroz sloj materijala nego ga opstrujava. Zagrevanje i kondicioniranje vazduha u eksperimentalnoj sušari (slika 44) trajalo je u vremenskom intervalu 1-1,5 časa zavisno od zadate temperature i uslova spoljašnje sredine.



Slika 43: Komora sušare sa lesama



Slika 44: Fotografija postrojenja na kome je izvršeno eksperimentalno istraživanje

Vazduh iz komore usisava ventilator na jednosmernu struju sa promenljivim brojem obrtaja i usmerava preko kondenzatora i grejača gde mu se povećava temperatura. Ventilator je radna mašina koja gasu povećava brzinu strujanja (tj. kinetičku energiju), a manje pritisak, kako bi gas mogao savladati gubitke strujanja u cevovodu pri datom protoku. Promenom broja obrtaja ventilatora, pomoću potenciometra, podešava se protok, tj. brzina strujanja vazduha preko materijala koja direktno utiče na brzinu sušenja. Brzina kretanja zagrejanog vazduha predstavlja uticajan faktor u brzini sušenja i kvalitetu sušenog proizvoda. Sa povećanjem brzine strujanja vazduha povećava se i isparavanje vode ali do određene granice.

4.2.1.1. Pneumatski podsistem za stvaranje vakuuma (vakumiranje komore)

Termin „vakuum“ se koristi za pritisak vazduha koji je ispod normalnog atmosferskog pritiska to je stanje razređenog gasa. Ovakvim pristupom vakuum dobija smisao obične fizičke veličine koju je moguće meriti u jedinicama pritiska.

Ukoliko se sušenje obavlja u vakuum sušionicama temperatura isparavanja vode je niža (proces je intenzivniji) i to direktno srazmerno s veličinom vakuuma. U vakuum sušionicama temperatura se kreće od 40-50⁰C.

Vakuum sušenje je pogodna metoda za sušenje materijala osetljivih na visoke temperature ili materijale sklone oksidaciji. U vakuum sušari vakuum se može postići i održavati ugradnjom dodatnog uređaja. Taj uređaj može biti: mehanički kompresor, vakuum pumpa, ejektor. Ovakva sušara sastoji se od hermetički zatvorene konstrukcije od nerđajućeg

čelika, koja sadrži police sa više nosača uzoraka. Vlaga se uklanja iz materijala pri niskim temperaturama, čime se smanjuje mogućnost termičke razgradnje proizvoda, a zbog sniženog sadržaja kiseonika smanjuje se i brzina štetnih procesa kao što je hemijska razgradnja.

Za vreme sušenja komora je spojena na uređaj za stvaranje vakuuma preko cevnoг priključka. Sniženi pritisak (vakuum) u komori sušare se održava na određenom nivou, time što se kondenzovana isparenja i nekondenzovani gasovi koji u komoru sušare dopiru iz okoline, zbog nesavršenosti zaptivanja, neprekidno izvlače primenom ejektora. Konstrukcija ejektora izvedena je tako da se sa energijom pogonskog fluida (tečnost, para, gas sa višim ulaznim pritiskom) usisava, sabija a potom potiskuje usisavani fluid (fluid sa nižim ulaznim pritiskom). Ejektor zahteva kompresorski agregat za snabdevanje komprimovanim vazduhom koji prolazeći kroz Venturijeve cevi ejektora stvara vakuum u komori sušare. Vrlo velika buka i velika potrošnja vazduha kao i otežana regulacija nivoa vakuuma koji zahteva određena materija koja se suši, ograničava primenu ovog sistema.

Ejektor je cev promenljivog prečnika. Konstruisan je poput Lavalove mlaznice. Zbog promenljivog prečnika izentalpski menja količine pojedinih energija u ukupnoj strujnoj energiji primarnog fluida - komprimovanog vazduha. Mlaznica dejstvo postiže postepenim smanjivanjem poprečnog preseka proticanja. Pogonski fluid prolaskom kroz mlaznicu najveći deo svoje pritisne energije pretvara u kinetičku (brzinsku) energiju, a kao posledica toga pada pritisak i raste brzine primarne struje. Dovodna cev iz komore priključena je u minimalni presek ejektora gde je pritisak najniži što ima za posledicu usisavanje sekundarnog fluida i stvaranje mešavine primarne i sekundarne struje. Posle minimalnog preseka, preseci ponovo rastu radi postepenog smanjenja brzine i povećanja pritiska.

Vakuum ejektor

Stvaranje i održavanje vakuuma u radnom prostoru komore postiže se pomoću ejektora. Ejektor su uređaji koji na principu strujanja komprimovanog vazduha kroz mlaznicu stvaraju vakuum isisavanjem vazduha iz radne zapremine.

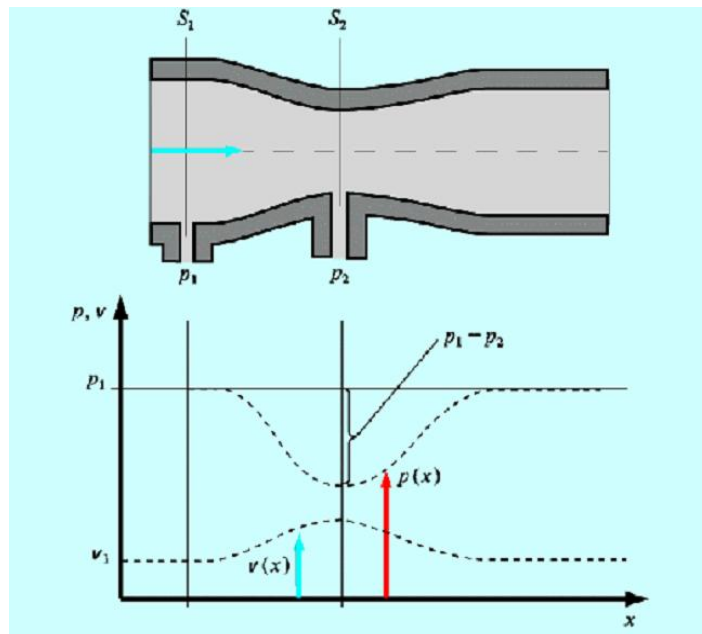
Faktori koji su presudili u odabiru načina dobijanja podpritiska ovim putem su:

- male dimenzije i težina,
- niska cena (u poređenju s vakuum pumpom istih performansi)
- nizak nivo buke
- jednostavna ugradnja
- miran rad
- jednostavna ugradnja
- rad nezavistan od radnog fluida (može biti homogena i heterogena faza)

- raspoloživa postojeća pneumatska oprema (kompresorski agregat, regulator pritiska)

Venturijeva cev je kombinacija konfuzora i difuzora i služi za lokalno povećanje brzine struje ili sniženje pritiska.

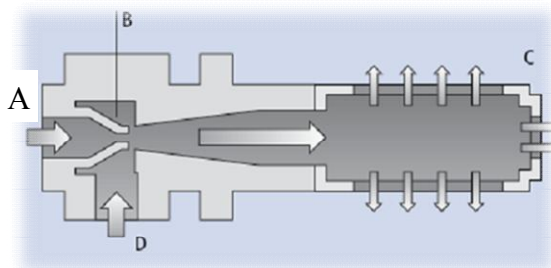
Princip rada klasične Venturijeve cevi prikazan je sledećom slikom 45:



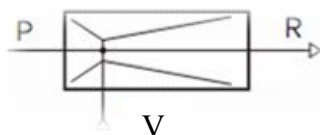
Slika 45: Princip rada Venturijeve cevi

Vakuumpojektor generiše vakuum na osnovu tzv. Venturijevog principa.

Primarni fluid (komprimovani vazduh), slika 46, ulazi na priključku A i nailazi na suženi deo (mlaznik B), gde istovremeno dolazi do povećanja brzine (uslov jednačine kontinuiteta) i prema Bernulijevoj jednačini do smanjenja pritiska (prikazano kao razlika $p_1 - p_2$ na najužem delu, slika 47) što za posledicu ima usisavanje sekundarnog fluida (vazduha) iz komore kroz otvor D. Ovaj vazduh zajedno sa komprimovanim prolazi kroz suženje i izlazi kroz otvor C na prigušnici.



Slika 46: Jednostepeni ejektor



Slika 47. Tehnički simbol jednostepenog vakuum ejektora

Oznake priključaka: P- dovod vazduha, R- odvod vazduha, V- vakuum

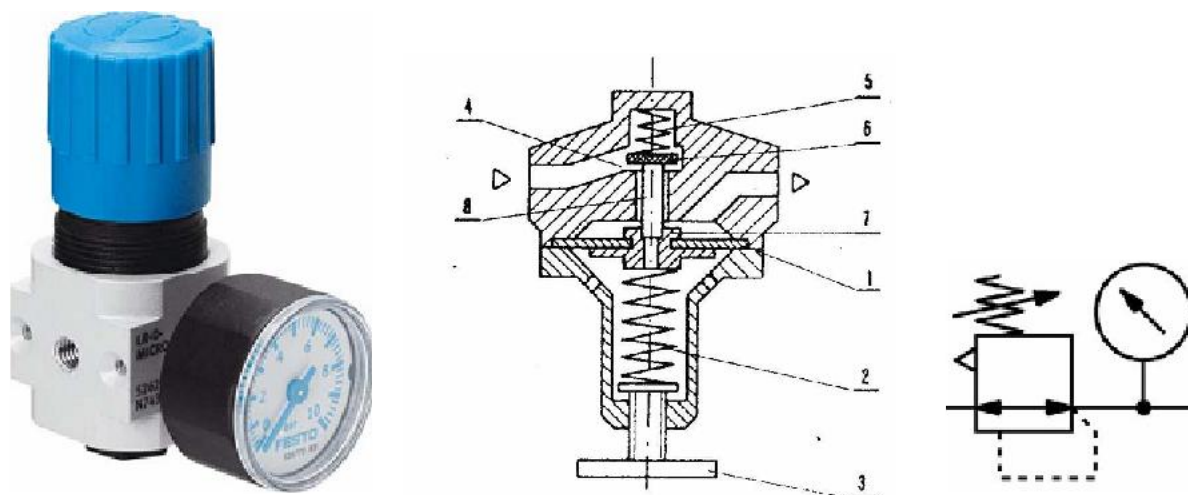
Ejektori su uređaji koji na principu strujanja komprimovanog vazduha kroz mlaznicu (Venturijev efekat) stvaraju vakuum isisavanjem vazduha iz radne zapremine.



Slika 48: Dvostepeni ejektor proizvođač PPT- Trstenik

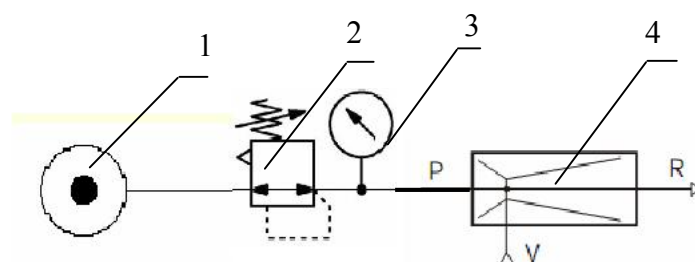
Regulator pritiska - princip rada

Regulator pritiska osigurava stabilan željeni radni pritisak. S jedne strane neutralizuje oscilacije pritiska zbog promenljive potrošnje vazduha (poremećaj na izlaznoj strani regulatora), a s druge strane u njemu se pritisak iz glavnog voda reducira na potrebnu vrednost radnog pritiska. Na ulaznoj strani pritisak mora biti veći od zahtevanog pritiska na izlaznoj strani regulatora. Podešavanje izlaznog pritiska vrši se regulacijom sile u opruzi (2), slika 49, pomoću vijka (3). Ako je sila u opruzi veća od sile koju stvara pritisak vazduha na površini membrane (1) otvara se razvodni element ventila (6) i propušta vazduh prema izlazu regulatora. Porastom pritiska na izlaznoj strani, pomiče se membrana i sabija oprugu tako da se ventil pritvara i smanjuje protok, čime se izlazni protok smanjuje. Prilikom značajnijeg porasta izlaznog pritiska membrana i dalje sabija oprugu i pri tome otvara otvor za odzračivanje. Kao rezultat ostvaruje se konstantan nivo pritiska na izlazu regulatora. Uz regulator pritiska u izlaznim vodu je ugrađen manometar za kontrolu regulisanog pritiska.



Slika 49: Regulator pritiska: 1- membrana, 2-opruga, 3-vijak. 4-ulazni pritisak, 5-opruga, 6-razvodni element ventila, 7-otvor za odzračivanje, 8- vreteno ventila

Vakuumska šema za navedenu aplikaciju data je slikom 50.



Slika 50: Vakuumska šema - podsistem za stvaranje vakuuma

1- izvor komprimovanog vazduha, 2 - regulator pritiska, 3 - manometar, 4 - ejektor

4.2.1.2. Podsistem za odvlaživanje vazduha

U sušari je zastupljen sistem podpritisno-kondenzaciono konvektivnog sušenja. Kondenzacione sušare pripadaju novijim tehnologijama sušenja. Kod svih postupaka konvekcijskog sušenja sušenje se provodi u struji zagrejanog vazduha. Toplota se prenosi konvekcijom iz vazduha na površinu materijala i onda dalje kondukcijom unutar materijala. Kružni tok vazduha (potpuna recirkulacija) u sušari ostvaruje se pomoću ventilatora, koji pokreće elektro-motor s promenljivim brojem obrtaja.

Strujeći između leša sa vlažnim materijalom, vazduh apsorbuje vlagu iz materijala nastalu isparavanjem, izazvanog dovođenjem određene količine toplote. Za izdvajanje vode u kondenzacionim sušarima koristi se modifikovana toplotna pumpa (kondenzacijski agregat). Toplotna pumpa se sastoji od dva izmenjivača toplote, pri čemu jedan deluje kao isparivač a

drugi kao kondenzator, kompresora i prigušnog ventila. Toplotna pumpa je punjena ekološkim freonom R 134a, koji zadovoljava evropske standarde zaštite životne sredine.

Zbog velike količine vode koja izlazi iz materijala, vazduh posle prolaska kroz komoru postaje zasićen i treba ga odvlažiti, da bi mu u procesu sušenja opet povratili efikasnost. Vodena para je izuzetno bogata energijom pa je poželjno tu energiju iskoristiti. Kondenzacijom vodene pare dobija se energija koja se ponovo koristi za zagrevanje vazduha i voća i kontinuirano isparavanje vode iz voća i njegovo sušenje. Zagrejan vazduh sa preuzetom vodenom parom iz procesa sušenja se ventilatorom transportuje u izdvojeni razmenjivač toplote (isparivač toplotne pumpe) gde se koristi kao grejni fluid koji zagreva rashladno sredstvo koje cirkuliše kroz toplotnu pumpu. Rashladni fluid toplotne pumpe prilikom zagrevanja isparava, a nastala para ulazi u kompresor gde se komprimuje na viši pritisak i višu temperaturu. Vlažan vazduh se hladi ispod tačke rose, a količina kondenzovane vode zavisi od stepena rashlađivanja. Vazduh je zbog hlađenja nakon prolaska kroz isparivač zasićen ($\varphi = 100\%$), pa zato nije iskoristiv za sušenje. Ulaskom u drugi razmenjivač toplote – kondenzator R 134a kao topliji predaje toplotu vazduhu i pri tome kondenzira. U prvi izmenjivač toplote R134a vraća se preko prigušnog ventila, a zagrejani vazduh se ventilatorom vraća u radni prostor sušare. Pre ponovnog uvođenja u proces sušenja moramo ga zagrejati na temperaturu koju propisuje režim sušenja, dogrevanjem prolaskom preko dodatnog grejača, postavljenog na ulazu u sušaru, čime mu se snižava relativna vlažnost. Ovakav vazduh je kondicioniran (njegova temperatura i vlažnost su stalni i ne zavise od spoljašnjih uslova) i ponovo sposoban da apsorbuje vlagu. Sistem toplotne pumpe radi pod pritiskom radnog fluida koji u pojedinačnim koracima dostiže 15 bar - pritisak kondenzacije ($t_k = 55^{\circ}\text{C}$) dok je pritisak isparavanja 1,2 bar ($t_i = - 22^{\circ}\text{C}$).

Proces odvlaživanja teče periodičnim uključivanjem i isključivanjem kondenzacijskog agregata (rashladnog kompresora), slika 51.



Slika 51: Rashladni kompresor s pogonskim motorom

Higrostat ugrađen u uređaj reguliše relativnu vlažnost u komori. Na osnovu signala koje dobija od higrometra šalje impuls za uključivanje ili isključivanje rashladnog kompresora –

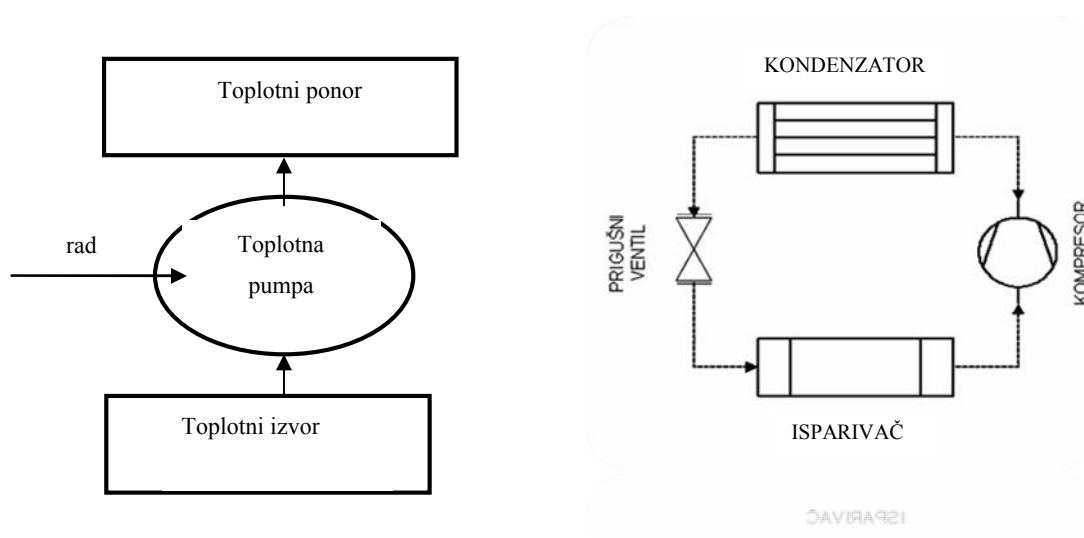
klasičan princip rada on-off uređaja, čime se postiže bolja efikasnost rada sušare. Kompresor pokreće sistem - komprimira paru rashladnog fluida na viši pritisak (i temperaturu) odnosno povećava joj energetski nivo i omogućuje provođenje levokretnog kružnog procesa.

Toplotna pumpa se u ovom slučaju osim za odvlaživanje vazduha koristi i za rekuperaciju toplote, čime se postiže veći stepen korisnosti postrojenja. Pored toga što ovo rešenje obezbeđuje uštedu energije ovakva rešenja sušara su i ekološka.

Sušenje se odvija u recirkulacijskom modu, bez ubacivanja svežeg vazduha tj. cirkulacijom istog, kojem se pri prolazu preko agregata oduzima voda. Tako dobijena voda naziva se hidrolat – voda sa aromom voća koje se suši i ona ima svoju prodajnu vrednost. Koristi se u kozmetici ali su i proizvođači voćnih rakija veliki potrošači takvog proizvoda.

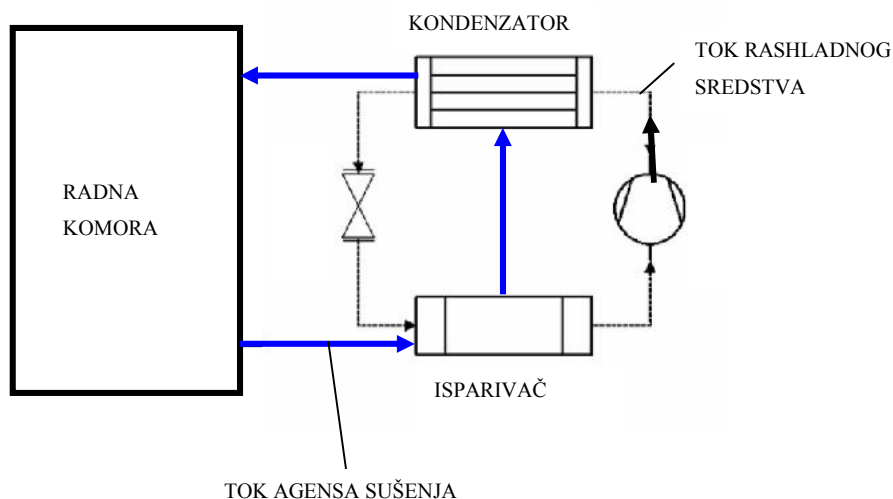
4.2.1.3. Princip rada kondenzacijskog agregata – kompresijske toplotne pumpe

Kondenzacijski agregat (toplotna pumpa) radi na principu levokretnog kružnog procesa, koji se sastoji od četiri otvorena procesa: isparavanja, kompresije, kondenzacije i izentalpskog prigušenja (slika 52). Upotrebom toplotne pumpe ostvaruje se rekuperacija toplote kondenzacijom vlage iz vazduha koja napušta materijal. Toplotna pumpa je uređaj koji rade na termodinamičkom principu podizanja toplote, tj. toplotnu energiju uzima od toplotnog izvora niže temperature i predaje je toplotnom ponoru više temperature trošeći pritom mehanički rad, koji je nekoliko puta manji od prenete energije, pomoću levokretnog kružnog procesa prikladnog radnog fluida. Udeo utrošene električne energije iznosi od jedne trećine do jedne petine dobijene toplotne energije, to znači da se utroškom 1kWh električne energije može izvršiti prenos 3 – 5 kWh toplotne energije.



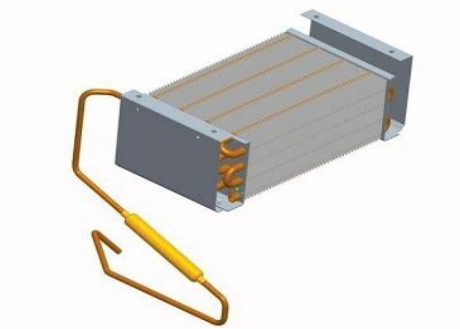
Slika 52: Princip rada i osnovne komponente parno-kompresorske toplotne pumpe

Uređaj poseduje zonu sušenja namirnica i zonu sušenja vazduha čime se obezbeđuje maksimalan kvalitet osušenog proizvoda. Proces sušenja odvija se u dva spregnuta sistema razmene toplote – spoljašnjeg i unutrašnjeg. Spoljašnji sistem čini vazduh za sušenje koji cirkuliše kroz sušaru, a unutrašnji se odnosi na cirkulaciju radnog fluida toplotne pumpe. Komponente toplotne pumpe su postavljene tako da vazduh koji prolazi kroz komoru za sušenje prestrujava preko isparivača (izdvajanje vlage) i kondenzatora (zagrevanje vazduha i podizanje njegovog potencijala sušenja), slika 53.



Slika 53: Tok kruženja vlažnog vazduha i rashladnog sredstva pri kondenzacijskom sušenju

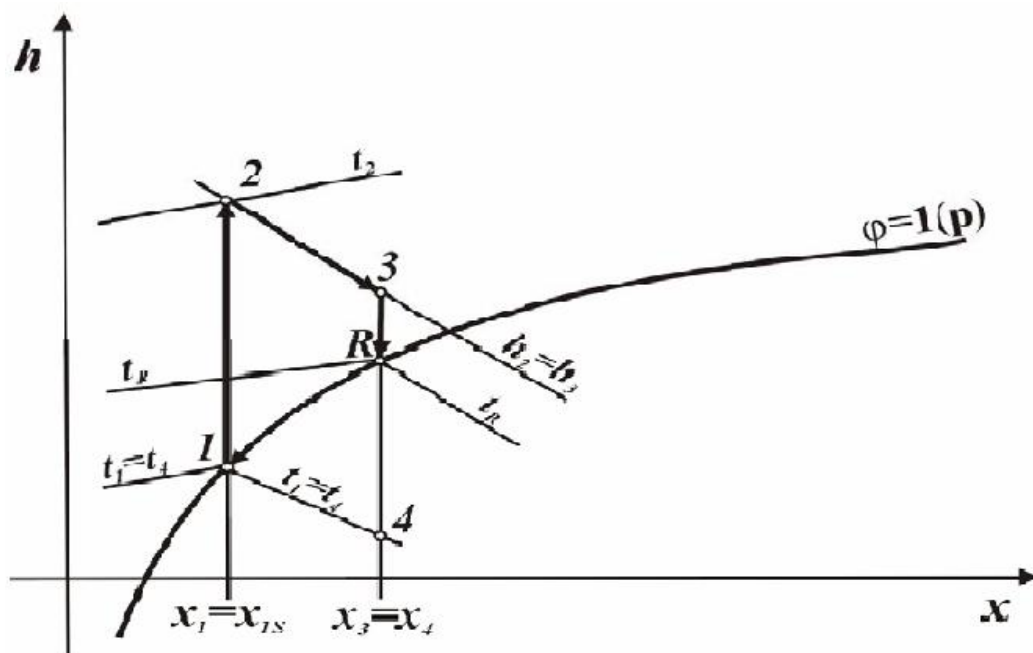
Da bi se sušilo na niskoj temperaturi, što je povoljno i skratilo vreme neophodno je sušiti što suvljim vazduhom, da bi se to obezbedilo, vazduh je potrebno maksimalno ohladiti (od stanja 3 do 4, slika 55) prolaskom preko isparivača. Isparivač je lamelastog tipa (slika 54), kod njega se prinudna cirkulacija ostvaruje upotrebom ventilatora. Zbog čvrstog spoja cevi i lamela uspostavlja se intenzivni toplotni fluks kroz lamele pa one poprimaju nisku temperaturu. Hlađenjem vazduha raste njegova relativna vlažnost, ako se vazduh ohladi ispod linije zasićenja određeni sadržaj vlage će se kondenzovati na njegovoj površini. Zbog toga se ispod isparivača instaliraju posude koje služe za sakupljanje kondenzata (slika 41).



Slika 54: Isparivač s lamelama

Pri izobarskom hlađenju toplog vazduha i vlage u njemu do temperature koja je niža od temperature tačke rose t_R , ($t_4 < t_R$), slika 55, stanje 4 vlažnog vazduha nalazi se u području magle, vazduh se ohladi i osuši. Kada se, pri izobarskom hlađenju dostigne temperatura tačke rose t_R , vlažan vazduh postaje zasićen i promena stanja tog zasićenog vlažnog vazduha (kada se on posmatra nezavisno od kondenzata koji se stvara u sve većoj količini pri daljem snižavanju temperature) odvija se po liniji zasićenja $\varphi = 1$, od tačke R do tačke 1. Tako u stanju 4 na temperaturi t_4 , postoji suvi vazduh, suvozasićena vodena para čija je masa po kg suvog vazduha određena apscisom x_1 i kondenzat čija je masa $\Delta x = x_4 - x_1$. Kapi kondenzata se pri tom slivaju i odstranjuju iz procesa. Ventilator usisava zasićen vazduh i potiskuje ga preko kondenzatora i grejača (slika 41), gde se zagreva i koristi za sušenje jer tada vazduh ima najveći potencijal sušenja.

Kod sušenja značajne su promene stanja vlažnog vazduha u termodinamičkom smislu.



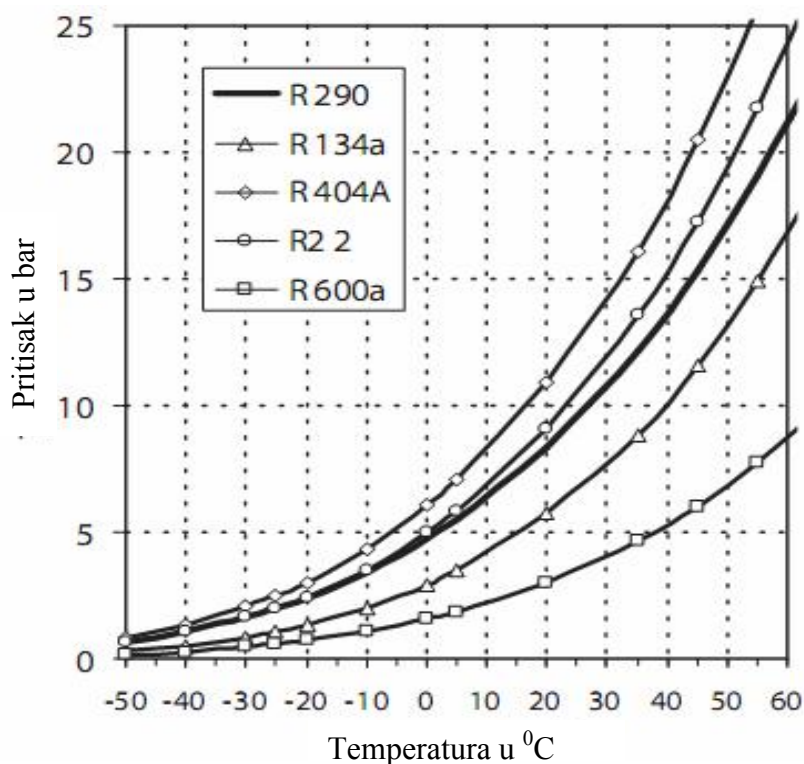
Slika 55: Termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha u h-x dijagramu stanja kod kondenzacionog sušenja

- 3- stanje vlažnog vazduha pri ulasku u kondenzacijski agregat
- 3-R hlađenje vlažnog vazduha na isparivaču do tačke rose
- R-4 - podhlađivanje vazduha i kondenzacija vodene pare
- 1-2- zagrevanje vazduha na temperaturu sušenja
- 2-3 - adijabatsko sušenje materijala u komri za sušenje

U kondenzacijskom agregatu važnu ulogu ima rashladno sredstvo koje mora ispunjavati posebne zahteve: pored niske temperature ključanja mora imati nizak specifični

toplotni kapacitet i veliku toplotu isparavanja; ne sme biti zapaljivo, toksično i korozivno; mora biti termički i hemijski stabilno i ekološki prihvatljivo. Rashladna sredstva su stabilna hemijska jedinjenja koja služe za prijem, transport i predaju toplotne energije. Prvobitno korišćeni hemijski nestabilni halogenizirani ugljovodonici, poznati i kao freoni (R-12, R-22) zamenjuju se stabilnijim (R 134a, R407c, R 410a i R404a). Radne materije mogu biti prirodne materije (amonijak, izobutan i ugljen dioksid).

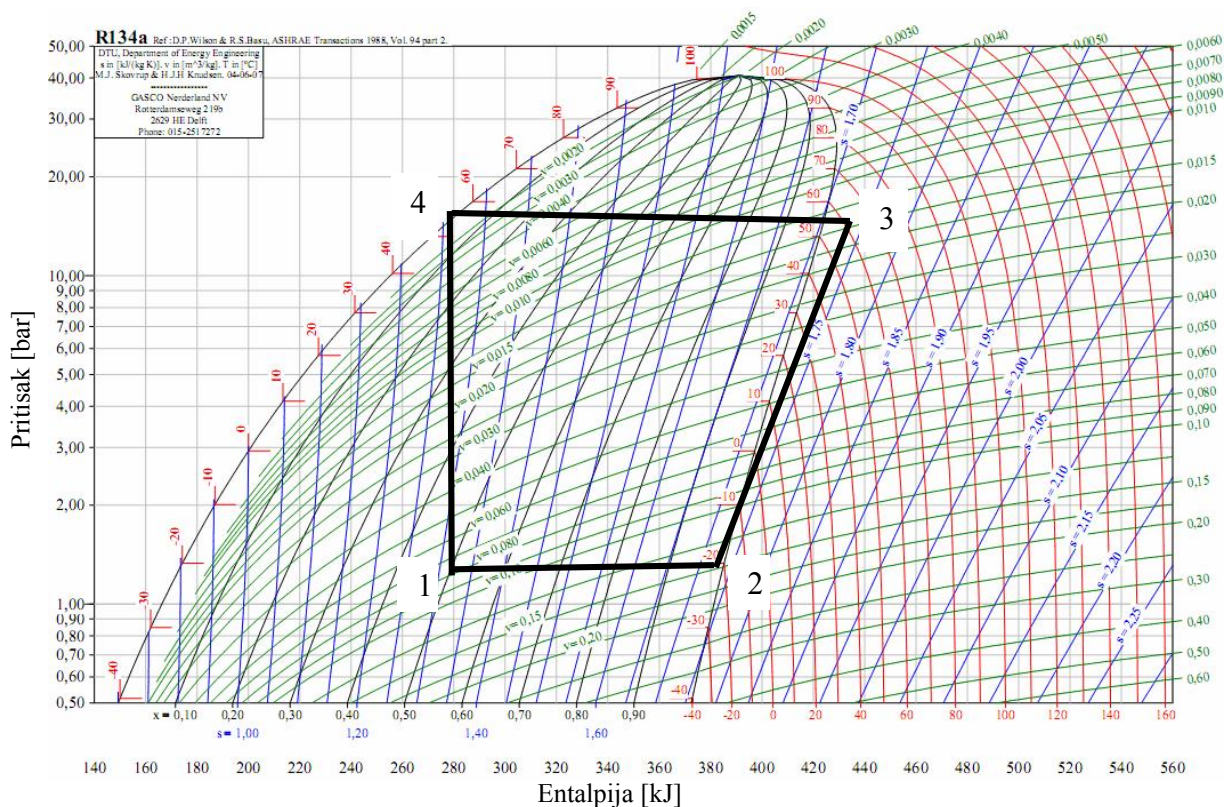
Odnos pritiska i temperature zasićenja rashladnih materija prikazan je na slici 56. Kondenzacijski agregat ispunjen je rashladnim sredstvom R 134a (CH_2FCF_3). Zbog znatno nižih pritisaka zasićenja R 134a ima prednosti nad ostalim rashladnim sredstvima. Toplota isparavanja radne materije pri karakterističnim temperaturama treba biti što veća, da bi za isti učinak isparivača protočna masa radne materije bila manja.



Slika 56: Kriva napetosti rashladnih materija (Pavković, 2006)

Parametri stanja (pritisak, entalpija, temperatura) rashladnog sredstva se menjaju njegovim prolaskom kroz sastavne elemente toplotne pumpe (kompresor-kondenzator-ekspanzioni ventil-isparivač).

Termodinamička svojstva pojedinih rashladnih sredstava mogu se naći u odgovarajućim priručnicima u vidu dijagrama (slika 57) i tabela.



Slika 57: Fazni dijagram R134a i ciklus rada toplotne pumpe prikazan na p-h dijagramu

Kompresor – rad kompresora tokom izentropske kompresije rashladnog sredstva može se izračunati iz porasta entalpije i masenog protoka rashladnog sredstva:

$$\dot{L} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (96)$$

gde je:

\dot{m} - maseni protok rashladnog sredstva (kg/s)

h_3 - entalpija rashladnog sredstva na kraju kompresije (kJ/kg_{rs})

h_2 - entalpija rashladnog sredstva na početku kompresije (kJ/kg_{rs})

\dot{L} - rad predat rashladnom sredstvu u jedinici vremena (kW)

Kondenzator - u kondenzatoru se rashladno sredstvo hladi pri konstantnom pritisku.

Razmenjena toplota, data je izrazom:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}(h_3 - h_1) \quad (97)$$

gde je:

\dot{Q}_k - količina toplote razmenjena u kondenzatoru (kW)

h_1 - entalpija rashladnog sredstva na izlazu iz kondenzatora (kJ/kg_{rs})

Isparivač – u isparivaču faznim prelazom tečnosti u gas, rashladno sredstvo oduzima toplotu od struje vlažnog vazduha pri konstantnom pritisku, pri čemu se primljena toplota može izračunati na sledeći način:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (98)$$

gde je: Q_i - toplota razmenjena u isparivaču (kW)

Najveća prednost kondenzacijskog sušenja je velika energetska efikasnost koju povećava zatvorenost sistema i visok koeficijent grejanja (odnos između dobijene toplotne energije, koja se oslobađa na kondenzatoru, i uložene energije pri izentropskom sabijanju rashladnog sredstva u kompresoru)

$$\eta_g = \frac{h_3 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (99)$$

Energija koja se kondenzacijom freona predaje vazduhu za sušenje 3 -5 puta je veća od električne energije potrebne za rad kondenzatora. Ovim se postiže znatna ušteda energije u odnosu na potrošnju standardnih električnih grejača. Sprečavanje kontaminacije sirovine, ekonomičnost i visok kvalitet osušenih proizvoda obezbeđuje zatvoren kondenzacioni sistem sa ugrađenom toplotnom pumpom.

Kao energent za pogon kondenzacione sušare koristi se isključivo električna energija tako da ova tehnologija sušenja spada u tkz. ekološki prihvatljive tehnologije.

4.2.2.3. Uređaji za merenje i regulaciju (merno regulaciona oprema)

Ni jedan sistem ne može postojati niti opstati bez regulacije. Sistem osigurava postizanje svojih ciljeva putem procesa regulacije, a on se postiže povratnom spregom. Regulacijom se postiže:

- veća produktivnost,
- konstantni kvalitet proizvoda,
- ekonomičnost.

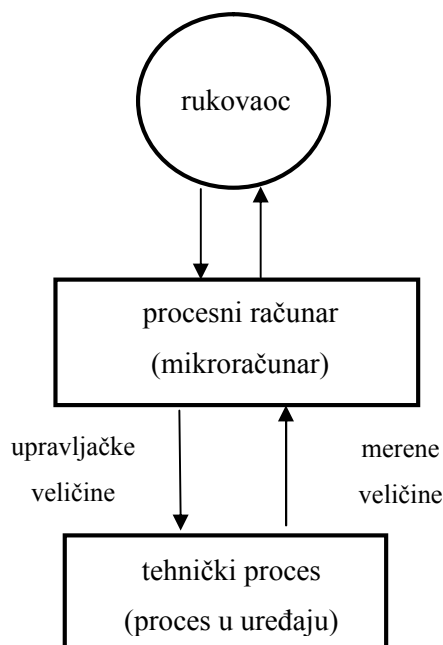
Proces sušenja karakteriše se celokupnošću fizičkih veličina koje se nazivaju parametrima sušenja. Parametri procesa sušenja sastoje se od osnovnih merljivih veličina (temperatura, pritisak, brzina, relativna vlažnost itd.) koje se mogu meriti pomoću senzora. Sušara ima mogućnost podešavanja i održavanja parametara agensa za sušenje u radnom prostoru. Tokom procesa sušenja potrebno je osigurati pravilan režim za sušenje jabuka. Poznato je da je suv i topao vazduh idealan za sušenje, samo ako je njegova temperatura strogo kontrolisana. Da se pregrevanjem vazduha ne bi smanjio kvalitet zaduženi su senzori, koji daju informacije regulatornom sistemu o stanju temperature i relativne vlažnosti u

komori. Temperatura se koriguje po potrebi (uključivanjem i isključivanjem grejača) i obezbeđuje sušenje po unapred određenom režimu. Programskim prilagođavanjem parametara sušenja omogućena je potpuna kontrola procesa sušenja.

Regulacija procesa sušenja je automatska. Moguće je kontrolisati temperaturu, brzinu strujanja i relativnu vlažnost vazduha koje su glavni parametri procesa sušenja, a u isto vreme i najvažniji faktori za kvalitet osušenog proizvoda. Proces sušenja se reguliše i kontroliše mernom i regulacionom armaturom koju čine: termometar i termostat, higrometar i higrostat, vakuummetar i vakuumstat, tako da u sušari postoji mogućnost regulisanja temperature, brzine strujanja, pritiska i relativne vlage vazduha koja se nagomilava isparavanjem vode iz voća. Ugrađeni instrumenti za merenje i regulaciju visoke su tačnosti i moguće ih je priključiti na sistem za akviziciju podataka.

Dodatna oprema sušare, odnosno merni i regulacijski uređaji (Pervan i Grbac, 1997) takođe su važan činilac kvaliteta i ekonomičnosti procesa. Zadatak je opreme da omogući kontrolu većeg broja parametara uz dovoljan broj merenja i jednostavnost korišćenja.

Da bi se bilo koji proces odvijao na zadovoljavajući način (pouzđano i efikasno) njime se mora upravljati (slika 58). Sušare kao grejane prostorije, s mogućnošću regulacije potrebne temperature i relativne vlage imaju veliku prednost nad prirodnim sušenjem. Sušenje se obavlja na željeni sadržaj vlage uz minimalnu udeo grešaka (Krpan, 1965).



Slika 58: Struktura sistema za automatizaciju procesa u uređajima

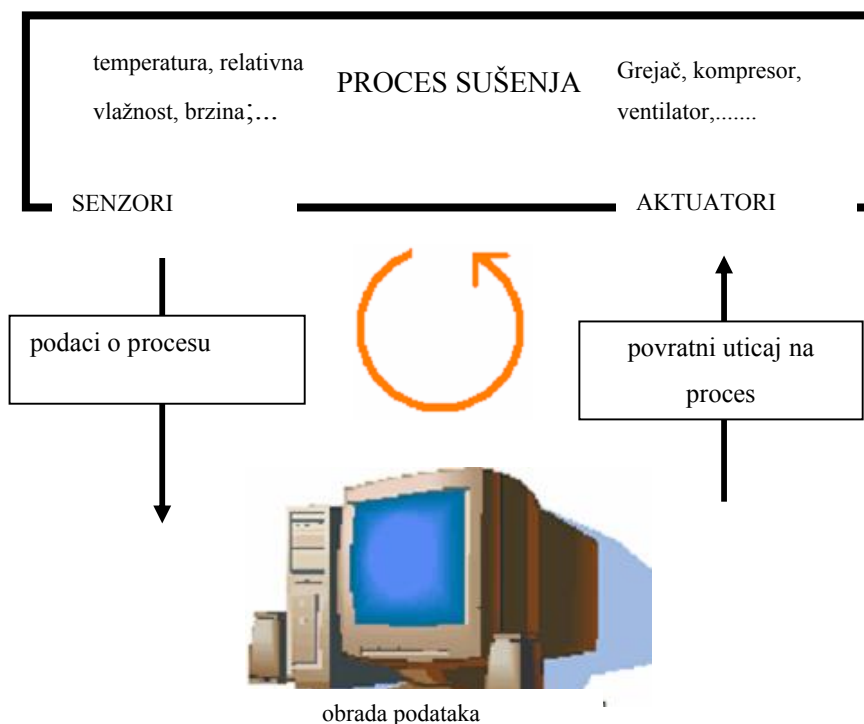
Upotreba merne opreme i ostali uređaji u sušionici doprinose postizanju željenih rezultata, koji daju proizvod visokog kvaliteta (Pervan, 1996). Za proces sušenja u

kontrolisanim laboratorijskim uslovima vrlo su važni priprema i kontrola sirovine za sušenje, kao i same sušare. Pripremom se postiže odgovarajući kvalitet suvog proizvoda, a kontrolom ekonomičnost procesa sušenja i tačnost dobijenih rezultata.

Najkompleksnija metoda ispitivanja jeste merenje instrumentima (Simpson, 1991a; Simpson, 1991b). Za ispitivanje se upotrebljavaju različiti merni instrumenti koji moraju biti baždareni radi tačnosti izmerenih rezultata. Za merenje tokom ispitivanja upotrebljena je sledeća oprema: termometar, higrometar, termoanemometar, digitalna vaga.

U cilju identifikacije objekta upravljanja, njemu se pridružuju odgovarajući senzori i merni pretvarači veličina stanja i smetnji i biraju se odgovarajući izvršni organi i aktuatori za promenu upravljačkih veličina.

Na odgovarajućem mestu u sušari instalira se sonda za merenje temperature i vlage, povezana s regulatorom, na čijem se displeju očitavaju temperatura i vlaga vazduha pri sušenju kako bi se preko toplotne pumpe i grejača moglo regulisati njihovo stanje za potrebe procesa sušenja (slika 59).



Slika 59: Veza senzora s računarom i aktuatorima u procesu sušenja

Procesni računar je povezan s tehničkim procesom, tako da na osnovu merenja fizičkih veličina upravlja tim procesom. Prihvata informacije o toku procesnih veličina (temperatura, pritisak, brzina, relativna vlažnost i td.) preko ulaznih jedinica (senzora) i deluje na odvijanje tehničkog procesa preko izlaznih jedinica (aktuatora). Pri tome je potrebno prilagoditi i pretvoriti kako ulazne tako i izlazne signale. Bitno svojstvo procesnog računara je da u

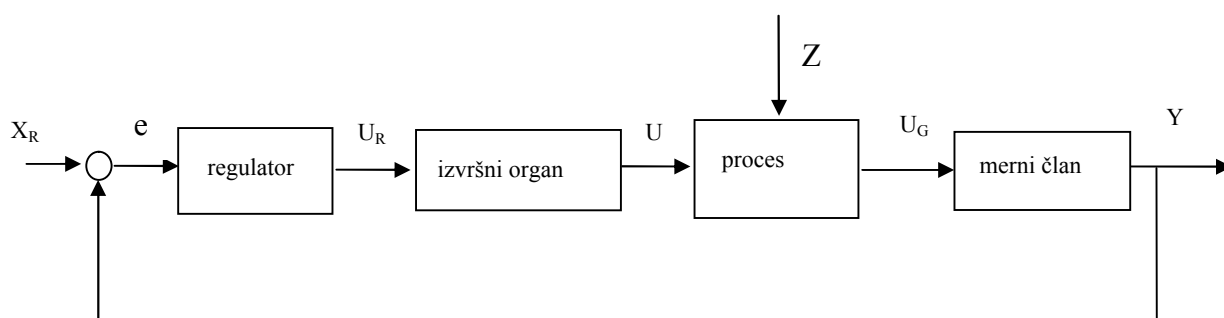
određenom vremenskom intervalu prikupi i obradi merne signale i stvori upravljačke signale koji deluju na proces.

Sva elektro-oprema za napajanje, komandovanje, regulaciju i zaštitu smeštena je u komandni orman koji je postavljen u neposrednoj blizini radne komore. Na komandnom ormanu, se između ostalog zadaje radna temperatura agensa za sušenje i prikazuje trenutna vrednost, merena termometrom koji je smešten u radnom prostoru. Na osnovu zadate i izmerene vrednosti temperature, termostat upravlja radom grejača od 600W, tj. održava zadata vrednost temperature vazduha. Higrometar smešten u radnom prostoru sušare meri relativnu vlažnost pa na osnovu te i zadate vrednosti, higrostat upravlja radom rashladnog kompresora (toplotnom pumpom), održavajući na taj način zadata vrednost relativne vlažnosti vazduha u prostoru za sušenje

Sistem za vođenje čine dva regulaciona kruga koji istovremeno deluju.

Svaki regulacijski krug sadrži 4 glavna sastavna dela (slika 60):

- proces
- merni član
- regulator
- izvršni član



Slika 60: Osnovna struktura regulacijskog kruga (blok-šema)

Y – regulisana veličina (stvarna vrednost)

X_R - referentna veličina (željena veličina)

e – regulacijsko odstupanje

U – upravljačka veličina

Z – spoljni poremećaj

Pod regulacijom se podrazumeva regulisanje jedne veličine uz upotrebu zatvorene petlje. Za veličinu koja se reguliše postoji određena „željena vrednost“ te veličine. Stvarna vrednost iz procesa upoređuje se sa tom željenom vrednošću. Razlika između tih veličina se pojačava i povratnom vezom u zatvorenoj petlji nastoji se svesti na što manju vrednost. To se postiže putem promene regulisane veličine tako da ona bude što bliža željenoj vrednosti.

Vođenje procesa vrši se na osnovu merenja temperature i relativne vlage u komori. Regulacija temperature postavlja se kao najvažniji zadatak bilo kakvog toplotnog procesa. Bolja regulacija temperature znači veću sigurnost, veću delotvornost i kvalitet finalnog proizvoda. Regulacija i vlage i temperature je tipa ON/OFF.

U ovoj laboratorijskoj sušari mogu se sušiti materijali koji zahtevaju precizne tehnološke režime sušenja kako bi proizvodi bili u fizičkom, hemijskom i organoleptičkom smislu maksimalno očuvani uz minimalnu potrošnju energije, vremena i prostora za sušenje određene količine proizvoda.

Proces sušenja praćen je smanjenjem mase, a merenje je rađeno na vagi, a detekcija stanja vazduha merena je senzorima. Za potrebe sprovođenja eksperimenta, polica sa lesama postavljena je na vagu, što je omogućilo kontinualno merenje mase sušenog materijala, tj. praćenje promene mase i vlažnosti materijala tokom sušenja. Korišćena je digitalna elektronska vaga (RADVAG) za merno područje 6/12 kg, tačnost očitavanja 0,1/0,2 gr., proizvođača „Libela“ Celje. Vaga ima svoju kontrolnu jedinicu (displej) na kojoj je očitavana izmerena masa u tačno određenim vremenskim intervalima.

Za merenje stanja vazduha (relativne vlažnosti i temperature) u sušari korišćen je digitalni senzor vlage i temperature (termo-higrometar) proizvođača NIGOS ELEKTRONIK – Niš, koji daje informaciju o temperaturi i relativnoj vlazi u komori u svakom trenutku. Odlikuje ga visoka tačnost i pouzdanost, nije potrebna kalibracija a s obzirom da je u jednom senzorskom elementu integrisana sonda za merenje vlage i temperature, te cenom su prihvatljiviji od klasičnih senzora. Raspon merenja temperature je od 40 do 125⁰C a vlage od 0 do 100% (slika 61).



Slika 61: Senzor stanja vazduha **SVT-01P**



Slika 62: Regulator relativne vlažnosti i temperature **DRV-913P**

Mikroprocesorski regulator **DRV-913P** je namenski uređaj koji se koristi za regulaciju relativne vlažnosti vazduha i temperature sa ON/OFF regulacijom. (slika 62).

Regulator je opremljen sa dva ulaza i tri izlaza. Na ulaze se dovode signali za temperaturu i vlagu vazduha, iz odgovarajućih transmitera.

Krilni digitalni termoanemometar „PCE – TA 30“ sa fleksibilnom eksternom sondom, meri temperaturu i brzinu strujanja vazduha preko materijala koji se suši. Radno merno područje instrumenta je od 0,3 do 30 m/s, s tačnošću očitavanja od 1,5%. Očitavanje brzine vazduha je na velikom LCD displeju sa pozadinskim osvetljenjem (slika 63).



Slika 63: Termoanemometar

4.3. METOD RADA

4.3.1. METODOLOGIJA KORIŠĆENA ZA IZRADU I VREDNOVANJE MATEMATIČKOG MODELA

U svrhu ostvarivanja postavljenog cilja i sprovođenja kvalitetnog nivoa istraživanja u radu će se primeniti niz metoda i tehnika. Primeniće se eksperimentalni metod istraživanja procesa sušenja u kombinaciji sa statističkom teorijom regresione i disperzione analize.

Eksperimentalni metod istraživanja je jedan od najsavremenijih i najvažnijih naučnih metoda. Pojava (proces) se posmatra pod tačno određenim uslovima koji omogućavaju praćenje toka i njeno ponavljanje uz iste uslove. Ova metoda ima značajnu ulogu u:

- proveravanju činjenica koje su ranije utvrđene, a koje nisu potpuno pouzdane
- proveravanju hipoteza naučnih zakona, stavova i teorije
- postavljanju novih, konkretnijih i adekvatnijih hipoteza
- otkrivanju novih naučnih činjenica o pojavama koje se istražuju

Statistička naučna metoda, je jedna od najvažnijih naučnih metoda, vrlo često se koristi u naučne svrhe u svim naučnim disciplinama. Razvija se veoma brzo – pojavljuju se nove statističke metode koje korišćenjem savremene računarske opreme i programa omogućavaju rešavanje kompleksnih problema naučnog istraživanja. Statistika će se u ovom istraživanju koristiti za obradu rezultata prikupljenih eksperimentom, objašnjenja i analize tih

rezultata – izradu matematičkih modela, u konkretnom slučaju za opisivanje uticaja procesnih parametara na kvalitet sušenog proizvoda.

4.3.1.1. Eksperimentalno istraživanje procesa sušenja

U predhodnom poglavlju smo govorili uopšteno o eksperimentalnom modeliranju a sada ćemo ga primeniti na konkretni primer – proces sušenja. Ovo poglavlje sastoji se od opisa postupka sušenja i plana eksperimenta prema kojem su sprovedeni.

Pri istraživanju procesa sušenja, njegovom modeliranju i optimiranju, u najvećem broju slučajeva se koriste eksperimenti obzirom da je analitički pristup zbog složenosti procesa nepodesan. Sušenje voća obavlja se u za to posebno izgrađenoj sušari na topli vazduh. U sušari postoji mogućnost regulisanja temperature i relativne vlage vazduha koja se nagomilava isparavanjem vode iz voća. Toj svrsi služi toplotna pumpa ugrađena u konstrukciju sušare. Na odgovarajućem mestu u sušari instalirana je sonda za merenje vlage povezana sa regulatorom na čijem se displeju očitavaju temperatura i relativna vlažnost vazduha pri sušenju, kako bi se preko toplotne pumpe i grejača moglo regulisati njihovo stanje za potrebe pojedinih tretmana.

Proces sušenja je jedan od najvažnijih procesa u prehrambenoj industriji i jedan od najviše proučavanih u prehrambenom inženjerstvu. Možemo ga posmatrati kao nelinearan dinamički sistem u koji su uključeni prenos materije, energije i informacije. Takav sistem u suštini predstavlja integrisanu celinu koji čine dva osnovna podsistema: procesni i kontrolni, koji su međusobno povezani ulaznim i izlaznim veličinama. Integrisanje procesa i kontrole zasniva se na primeni matematičkih modela. Matematički model je skup matematičkih odnosa između ulaznih i izlaznih veličina koje definišu taj sistem. Matematički modeli bazirani na uzročnim odnosima ulaznih i izlaznih veličina definisanih u potpunosti temeljnim zakonima fizike (elektrotehnike, termodinamike, mehanike, mehanike fluida), hemije i biologije i opisanih diferencijalnim (integralnim) jednačinama nazivaju se analitički modeli. Osnovu tih modela čine principi održanja mase, energije i količine kretanja, povezanih kinetičkim reakcijama. Takvi modeli podrazumevaju poznavanje brojnih varijabli, a zbog svoje složenosti i različitih područja nauke i tehnike i provođenje određenih eksperimenata. Iz navedenih razloga i zbog česte upotrebe brzih rešenja koje nameće praksa razvijeni su i neki drugi modeli – empirijski modeli (identifikacija procesa). Empirijski modeli ne zahtevaju uvid u fizikalnost pojave koja se modelira nego samo skup ulazno-izlaznih merljivih podataka na osnovu kojih se dobija prikladna struktura modela sistema i parametri modela.

Za dobijanje matematičkog modela procesa sušenja primenjena je eksperimentalna analiza (identifikacija procesa), gde se proces modelira na osnovu merenja ulazno / izlaznih signala procesa. Pri identifikaciji procesa polazi se od a-priori znanja o procesu dobijenih:

- teorijskom analizom
- predhodnim merenjima

Na osnovu dosadašnjih saznanja iz literature, proces sušenja spada u višefaktorske procese, koji ima poseban značaj u prehrambenoj industriji i koji se zbog svoje kompleksnosti ne može modelirati numeričkim metodama. To znači da se iz opštepoznatih teorijskih saznanja koja se odnose na posmatrani proces ne može na zadovoljavajući način definisati sam proces, pa je potrebno u najvećem broju slučajeva provesti eksperimente.

U ovom radu za modeliranje procesa sušenja je primenjena „off-line“ metoda identifikacije tj. ulazno-izlazni podaci dobijeni iz eksperimenta su registrovani i zapisani pa tek onda obrađeni.

Obzirom da je unutrašnja struktura procesa sušenja kompleksna, proces posmatramo kao „crnu kutiju“ u čiju unutrašnju strukturu ne želimo da ulazimo, jer su pojave u procesu veoma složene, a predznanje o procesu je veoma površno, ali znamo ulazne i izlazne veličine. Zaključke o funkcionisanju i svojstvima procesa donosimo na osnovu posmatranja njegovih ulaza tj. uzroka i izlaza tj. posledica. Kada ulaze u sistem menjamo našom voljom i pratimo reakcije sistema na njih govorimo o eksperimentisanju primenom metode „crne kutije“.

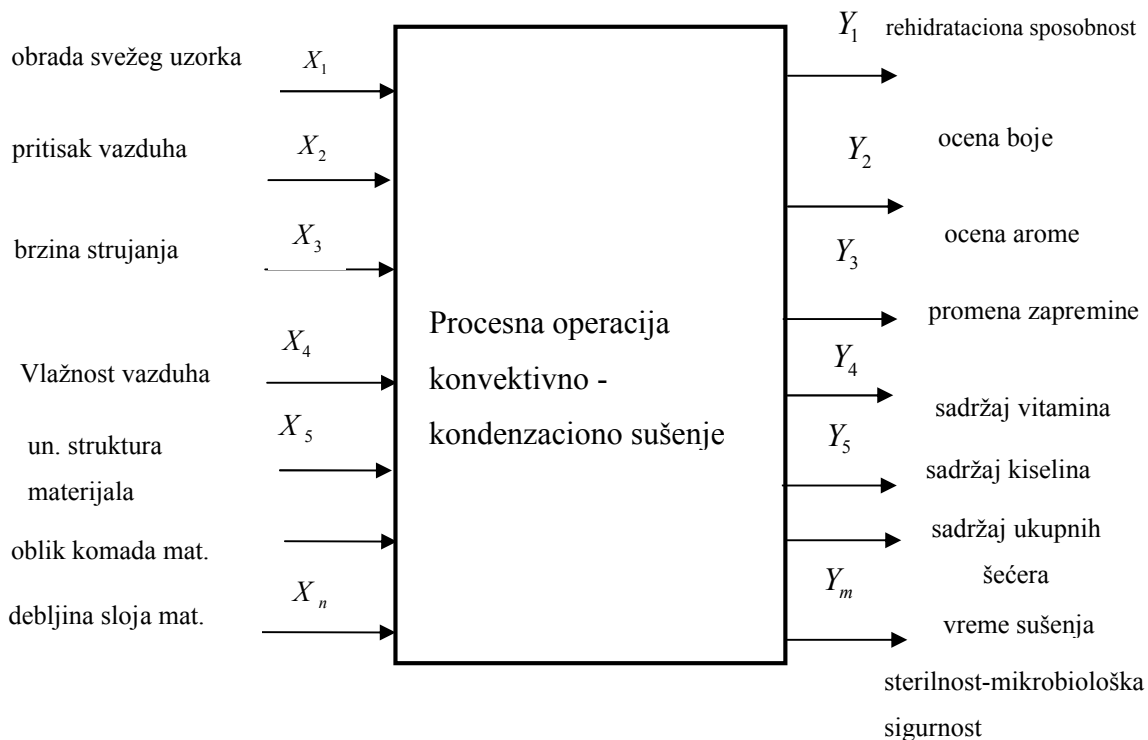
Cilj systemske analize je da sistem koji se na početku istraživanja posmatra kao crna kutija tokom istraživanja postane bela kutija ili barem siva. Proces je identifikovan kada su odstupanja između realnog sistema i modela svedena na prihvatljiv nivo.

Veoma je vazno za sušenje prehrambenih proizvoda:

- utvrditi sve uticajne parametre i pažljivo ih analizirati
- definisati režim sušenja prilagođen određenoj vrsti prehrambenog proizvoda koji će omogućiti sušenje u što kraćem vremenu bez umanjenja kvaliteta.

Svi bitni uticaji se uzimaju kao ulazne veličine, dok se sve bitne reakcije sistema na ulazne veličine registruju kao izlazne veličine. Posebno je važno istaći faktore koji dominantno utiču na proces koji se modelira.

Na slici 64 prikazan je simulacijski blok procesa sušenja.



Slika 64: Simulacijski blok procesa sušenja

U radu je primenjen naučni metod, koji posmatrano istraživanje tretira kao višefaktorni eksperiment pošto na proces sušenja voća utiče veliki broj faktora, između kojih postoji visok stepen interakcije (međuzavisnosti). U nizu kvantitativnih i kvalitativnih faktora među najuticajnije se mogu svrstati:

- uslovi sušenja (temperatura, pritisak, brzina strujanja, relativna vlažnost, itd)
- geometrijske karakteristike materijala (oblik komada, debljina materijala, unutrašnja struktura materijala, itd)
- fizička svojstva materijala (oblik, zapremina, sferičnost, gustina, poroznost, nasipna gustina, itd).

4.3.1.2. Postupak sušenja

Pri istraživanju procesa sušenja, njegovom modeliranju i optimiranju, u najvećem broju slučajeva se koriste eksperimenti obzirom da je analitički pristup zbog složenosti procesa nepodesan. Sušenje voća obavlja se u za to posebno izgrađenoj sušari na topli vazduh. U sušari postoji mogućnost regulisanja temperature i relativne vlage vazduha koja se nagomilava isparavanjem vode iz voća. Toj svrsi služi toplotna pumpa ugrađena u konstrukciju sušare. Na odgovarajućem mestu u sušari instalirana je sonda za merenje vlage povezana sa regulatorom na čijem se displeju očitavaju temperatura i relativna vlažnost vazduha pri sušenju, kako bi se preko toplotne pumpe i grejača moglo regulisati njihovo stanje za potrebe pojedinih tretmana.

Eksperimentalna sušenja sprovedena su tokom novembra i decembra 2013. godine u laboratoriji za procesnu tehniku Visoke mašinsko tehničke škole u Trsteniku. Materijal za sušenje su jabuke sorte „crveni delišes“. Sveži materijal, rezan na kolutove debljine 4mm, postavljen je na 6 komada lesa postavljene u policu, tako da kompletno strujanje vazduha isključivo ide preko materijala. Polica sa lesama postavljena je na vagu što je omogućilo kontinuirano merenje mase sušenog materijala tj. praćenje njene promene tokom sušenja. Vaga je tarirana čime je eliminisana masa prazne police i lesa. Polazna masa plodova jabuke (svakog uzorka) ista je za sve eksperimente i iznosi 1270 grama. Pre početka sušenja, uzet je uzorak svežeg voća tj. vlažnog materijala za hemijsku analizu. Uzorci svežih jabuka, namenjeni sušenju, sadrže oko 87% vode, sušeni su u laboratoriskoj sušari u tankom sloju pri:

- temperaturi radnog medija (vazduha) od 40, 49 i 60⁰C,
- brzini vazduha 1; 1,4 i 2 m/s i
- relativnoj vlažnosti vazduha 55, 64, 75%

Proces sušenja počeo je postizanjem željene ulazne temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vazduha preko uzorka. Sušenje se završavalo sa postignutom suvom materijom od oko 92%, tj. konačna masa materijala iznosila je 180 gr.

Plan eksperimenta prilagođen je mogućnostima uređaja. U skladu sa planom eksperimenta, pre početka svakog testa, podešavani su parametri agensa sušenja (temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja) tj. željeni režim sušenja na komandnom ormaru sušare i započet rad. Na komandnom ormaru se zadaje radna temperatura agensa za sušenje i prikazuje trenutna vrednost merena termometrom. Na osnovu zadate i izmerene vrednosti temperature upravlja se radom grejača, tj održava se zadata vrednost u opsegu od 0,5⁰C ($\pm 0,25^0 C$). Ako temperatura poraste iznad zadate za 0,25⁰C, merena termometrom, isključi se grejač a ponovo se startuje kada je temperatura niža od zadate za 0,25⁰C. Relativna vlažnost vazduha se održava u opsegu od 5% ($\pm 2,5\%$), radom toplotne pumpe. Ako relativna vlažnost u radnom prostoru poraste za 2,5% iznad zadate, merena pomoću higrometra, uključi se rashladni kompresor (odnosno toplotna pumpa) a isključi kada relativna vlažnost opadne za 2,5% ispod zadate. Anemomtom je merena brzina strujanja agensa, te ventilator podešavao dok se ne dostigne potrebna vrednost.

Proces sušenja počeo je postizanjem željene temperature i brzine strujanja vazduha kroz sloj materijala. Kada je u komori postignuta radna temperatura, polica sa uzorkom postavlja se na vagu i započinje merenje. Sušenje je sprovedeno prema planu eksperimenta. Konstantno su mereni i beleženi podaci sledećih parametara: masa i temperatura sušenog materijala u preciznim vremenskim intervalima od sat vremena. Temperatura materijala bila je

niža za 5-10⁰C od temperature vazduha sve do faze padajuće brzine sušenja, kada se sa vremenom trajanja procesa sušenja asimptotski približavala temperaturi agensa sušenja. Vlažnost materijala je određena na početku i po završetku procesa sušenja. Unutar tih graničnih tačaka trenutna vlažnost uzorka, je određivana indirektno, merenjem mase sušenog materijala i uvrštavanjem poznatih veličina u sledeći izraz:

$$w = 100 - \frac{M_1}{M}(100 - w_1) \quad (100)$$

odnosno masa suvog materijala:

$$M_2 = M_1 \frac{(100 - w_1)}{(100 - w_2)} \quad (101)$$

gde su: w_1 - početna vlažnost materijala (%)

w_2 - konačna vlažnost materijala (%)

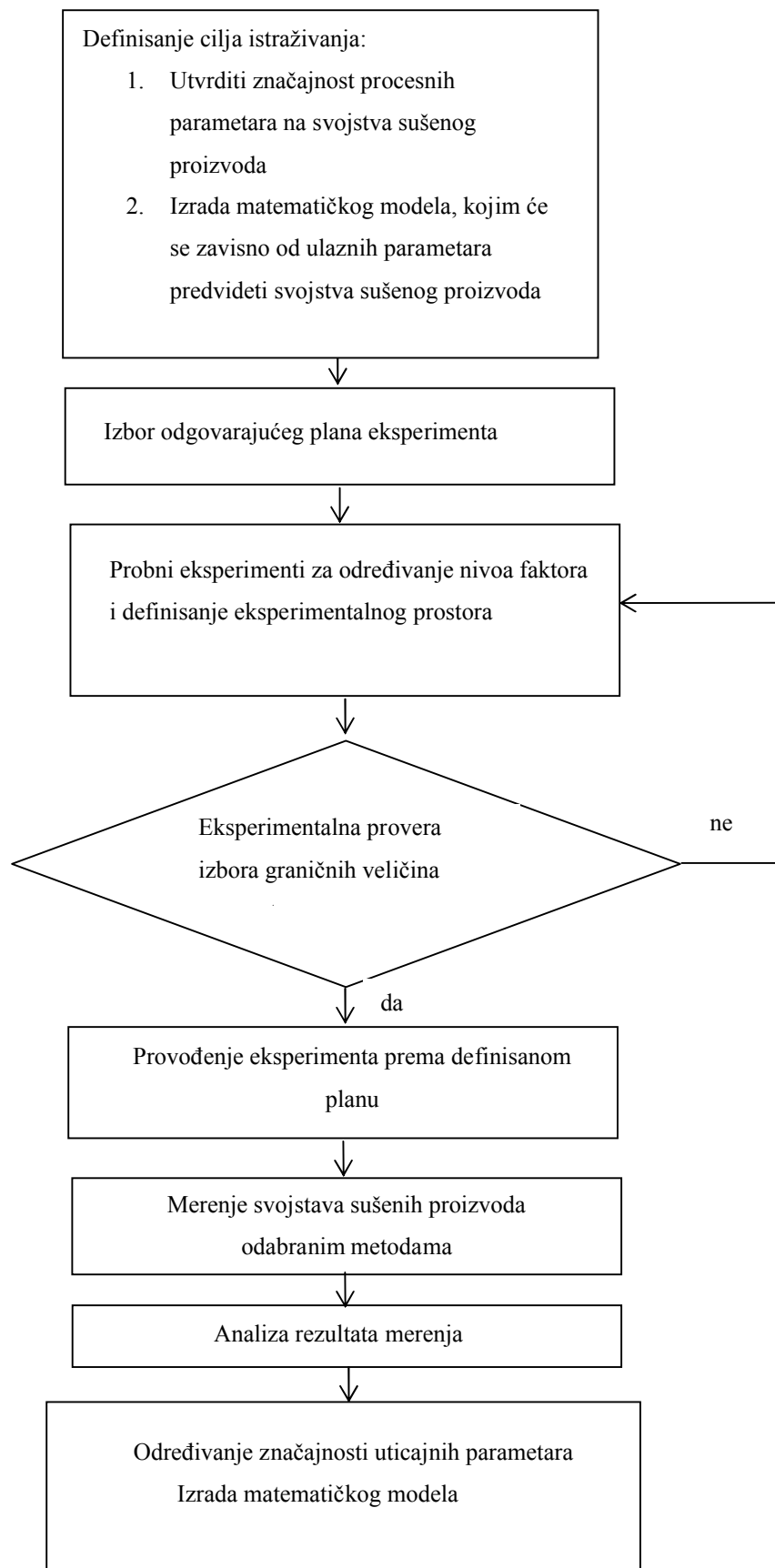
M_1 - početna masa materijala (kg)

M_2 - konačna masa materijala (kg).

Prema izrazu (100) računa se trenutna vlažnost uzorka za sve tačke tokom procesa sušenja, koji su ujedno i temeljni parametri za grafičko i matematičko prikazivanje kinetičkih krivih procesa sušenja svih uzoraka, tj. rezultata istraživanja.

Nakon završetka sušenja uzimani su uzorci za dodatne analize opisane u pod poglavlju 4.3.2.3. Probnim (skrining) eksperimentima, koji nisu obuhvaćeni planom eksperimenta, provereno je funkcionisanje eksperimentalnog laboratorijskog postrojenja i njegovo uhodavanje. Pored toga ovim eksperimentom određene su vrednosti (nivoi) faktora koji su korišćeni za glavni eksperiment i definisan eksperimentalni prostor.

Na slici 65 dat je dijagram toka eksperimentalnog rada (algoritam).



Slika 65: Dijagram toka eksperimentalnog rada (algoritam)

4.3.2. UTICAJNI FAKTORI, FAKTORSKI NIVOI I PLAN IZVOĐENJA EKSPERIMENTA

U eksperimentalnom delu rada postavljen je cilj: sveobuhvatno ispitati uticaj procesnih parametara (režima sušenja) na parametre kvaliteta sušenih proizvoda (sadržaj ukupnih kiselina i vreme trajanja procesa). Prvi korak u analizi je izbor varijabli koje će biti uključene u model i izbor oblika modela. Kako broj tretmana eksponencijalno raste s brojem faktora (jedn. 48), eksperimenti sa više faktora nepovoljni su kako s gledišta preciznosti, tako s gledišta troškova istraživanja. Zato je u radu primenjen potpuni faktorski eksperiment 2^3 kojim će se odrediti uticaji tri osnovna faktora i njihove pojedine (dvostruke) interakcije. Dodavanje novih faktora u potpunim faktorskim eksperimentima teorijski ne predstavlja problem, međutim s praktičnog gledišta postoje određena ograničenja. Predpostavljeno je da trostruke interakcije ne utiču na odziv - parametre kvaliteta suvih jabuka.

U eksperimentalnom delu je primenom potpunog faktorskog plana eksperimenta analiziran uticaj parametara agensa sušenja (temperature, brzine strujanja i relativne vlažnosti) na dužinu trajanja procesa i parametre kvaliteta sušenog proizvoda. U cilju dobijanja željenih podataka sproveden je eksperiment sušenja pri različitim kombinacijama uticajnih parametara. Svrha plana eksperimenta je generisanje matematičkog modela, odnosno jednačine koja opisuje proces. U analizi procesa sušenja koristi se model višestruke linearne regresije koji uključuje varijablu odziva i više nezavisnih varijabli.

Cilj eksperimentalnog istraživanja je utvrđivanje uticaja procesnih parameta (t , p , v) na: vreme trajanja procesa i parametre kvaliteta proizvoda (sadržaj kiselina, sadržaj šećera). Proces sušenja se odvija u eksperimentalnom laboratorijskom postrojenju sa ispitnim uzorcima voća na kome je moguće precizno meriti temperaturu sušenja, relativnu vlažnost, brzinu strujanja agensa sušenja te će ove veličine biti nezavisne varijable odnosno uticajni faktori. Ovi parametri su održavani konstantnim tokom sušenja merno regulacionom opremom. U opisanom eksperimentalnom istraživanju definisana su tri faktora čiji se uticaj na dve izlazne veličine ispituje.

Može se uočiti da se kod ovakvih eksperimenata predpostavljeno zasnivanje rezultata od samo 3 faktora idealizacija. Svakako moguće je navesti još niz faktora od kojih bi rezultat mogao zavisiti. Ovakva idealizacija opravdana je pod određenim uslovima :

- ako se faktori koji nisu uzeti u obzir zadržavaju na konstantnom nivou,
- ako je uticaj neobuhvaćenih faktora mali,

- ako je uticaj neobuhvaćenih faktora slučajan pa se metodama matematičke statistike njihovo delovanje može odvojiti od delovanja kontrolisanih faktora u vidu greške eksperimenta.

U razmatranom slučaju sa velikom sigurnošću može se pretpostaviti kako je zadovoljen prvi i/ili treći uslov kod svih eventualno neobuhvaćenih faktora. Pri tome se misli na faktore kao što su (uticaj istraživača, uređaja u kome se provodi eksperiment, itd)

Predhodno je potrebno odrediti veličine koje mogu uticati na proces, odnosno na veličinu(e) koja(e) će se pratiti i koja će označavati stanje procesa. Tek tada se pristupa eksperimentu menjajući vrednosti ulaznih veličina i prateći kakav je njihov uticaj na posmatrani proces. Primenom neke od metoda eksperimentalnog određivanja optimuma procesa moguće je odrediti uticaj pojedine ulazne veličine na sam proces, odnosno odrediti da li je uticaj značajan ili se može zanemariti. Takođe je moguće na osnovu prethodnog merenja, a primenom neke od metoda, odrediti korak za koji će se menjati svaka varijabla koja utiče na proces, tokom samog provođenja optimiranja.

Uticajni faktori konvektivnog sušenja podeljeni su u dve grupe. Prva grupa faktora odnosi se na uslove sušenja: temperatura (t), relativna vlažnost (φ), pritisak (p) i brzina strujanja vazduha (v). Faktori druge grupe odnose se na geometrijske karakteristike materijala: oblik komada, debljina materijala i unutrašnja struktura materijala. Povezivanjem uslova sušenja sa faktorima II grupe (materijal sušenja) formira se režim sušenja prilagođen određenoj materiji koja se suši. Obzirom da su faktori II grupe u planiranom istraživanju zadate veličine, menjajući pojedine faktore I grupe (t, φ, v) menja se režim sušenja, sprovodi se brže ili sporije oduzimanje vlage materijalu prilagođavajući se svojstvima, stanju i dimenzijama sušenog materijala. Međusobno zavisnom promenom parametara I grupe utiče se na brzinu i kvalitet u svim fazama sušenja. Analizom tehničkih podataka opreme i pregledom brojnih istraživanja, izdvojeni su uticajni procesni parametri koje je moguće kontrolisano varirati na više nivoa (tabela 8).

Tabela 8: Uticajni procesni parametri sušenja voća

R. br.	Uticajni parametar	Oznaka	Merna jedinica
1.	temperatura vazduha	t	$^{\circ}\text{C}$
2.	brzina strujanja	v	m/s
3.	relativna vlažnost vazduha	φ	%

U tabeli 9 date su oznake faktora planiranog eksperimenta.

Tabela 9: Oznake faktora planiranog eksperimenta

Faktor	Oznaka
Temperatura vazduha	X_1
Brzina strujanja vazduha	X_2
Relativna vlažnost vazduha	X_3
Interakcija između temperature i brzine strujanja	X_1X_2
Interakcija između temperature i relativne vlažnosti	X_1X_3
Interakcija između brzine strujanja i relativne vlažnosti	X_2X_3

4.3.2.1. Promenljivi parametri

Na osnovu stečenog znanja, podataka dobijenih pregledom literature i tehničkih karakteristika opreme provedena su prethodna istraživanja procesa sušenja. Istraživanje je vršeno na nekoliko nivoa procesnih parametara. Na osnovu tih istraživanja izdvojeni su uticajni procesni parametri koje je moguće kontrolisano varirati i određeni su rasponi parametara za izvođenje eksperimenta tj. definisan je eksperimentalni prostor. Temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja vazduha održavaju se na programiranoj – zadatoj vrednosti prema utvrđenom režimu sušenja voća sa malim odstupanjima.

Da bi se mogla pratiti veličina uticaja faktorski nivoi se kodiraju, tj. da bi procenjeni parametri regresije (matematičkog modela) b_i bili međusobno usporedljivi uticajni faktori (nezavisne varijable) X_i , linearno se transformišu u raspon vrednosti od -1 (minimalna) do $+1$ (maksimalna) za potrebe statističke analize uticaja. Kodirane koordinate određene su jednačinama transformacije:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (102)$$

gde su:

X_i - fizičke vrednosti uticajnih faktora („ prirodne koordinate“)

X_{i0} - vrednost faktora na osnovnom nivou, tj. u centralnoj tački eksperimentalnog prostora,

ΔX_i - interval variranja faktora.

Kodiranjem izabranih parametara pojednostavljuje se rešavanje sistema jednačina (80) jer se matrica koeficijenata svodi na jediničnu matricu.

Nivo vrednosti faktora i uslovi izvođenja eksperimenta su dati u tabeli 10.

Izbor vrednosti nezavisnih varijabli ima veliki uticaj na procenu uticaja faktora.

Tabela 10: Nivoi vrednosti faktora procesa ili uslovi izvođenja eksperimenta

Ulazna veličina (parametar)	Nivo		
	(kodirane vrednosti)		
	-1	0	+1
$X_1: t, ^\circ\text{C}$	40	49	60
$X_2: v, \text{m/s}$	1	1,4	2
$X_3: \varphi, \%$	55	64	75

4.3.2.2. Konstantni parametri

Tabela 11 prikazuje parametre sušenja koji su držani konstantnim tokom provođenja eksperimenta.

Tabela 11: Parametri koji su držani konstantnim tokom eksperimenta

Oznaka:	Parametar:	Merna jedinica:	Vrednost:
p	pritisak vazduha	bar	1
δ	debljina sloja	mm	4
ΔW	količina odstranjene vode	gr	1090
w_1	početna vlažnost	%	87
o	oblik komada		
d	dimenzije sečenih delova		
s	struktura materijala (sorta)		

4.3.2.3. Opis kriterijskih varijabli

Za ocenu uspešnosti procesa sušenja jabuke mogu se uzeti najvažnija svojstva:

- sadržaj ukupnih kiselina (izražen kao jabučna)
- sadržaj ukupnih šećera
- vreme trajanja procesa
- stepen rehidracije (% vode u rehidratiranoj hrani)

prisutnost arome – lako isparljivih sasto

Modernim metodama sušenja u industriji nastoje se sačuvati prirodna svojstva namirnice, nakon dehidriranja uz istovremeno povećanje trajnosti i tržišne vrednosti. Prema opštim karakteristikama sušeni proizvodi moraju imati boju, miris i ukus svojstven sirovinama od kojih su dobijeni koji podseća na zdrav i svež plod, potapanjem u vrelu vodu moraju dobro bubriti i rehidrirati se približno do oblika i konzistencije pre sušenja, moraju biti

bez mrlja nastalih fiziološkim oštećenjem plodova, zagorelosti i sl., ne smeju imati miris i ukus presušenih sirovina ili bilo kakav strani miris ili ukus. Osim toga ne smeju biti plesnivi ni zagađeni mehaničkim ili biološkim onečišćenjima (Lambaša Belak, Ž., 2005).

Danas se posebna pažnja posvećuje kvalitetu sušenog voća. Bez obzira na sve probleme vezane za plasman, ne treba zaboraviti da je osnovni cilj postupka konzervisanja očuvanje nutritivnih vrednosti i organoleptičke prihvatljivosti (Zlatković, 2003).

Kvalitet sušenih proizvoda određuje se na osnovu dobijenih rezultata organoleptičkih i hemijskih analiza i propisanih vrednosti pojedinih svojstava. Hemijskim analizama utvrđuju se sledeći parametri kvaliteta:

- sadržaj vode u suvom proizvodu
- sadržaj šećera
- sadržaj ukupnih kiselina, izražene kao jabučna
- sadržaj pepela

U osušenim proizvodima znatno je usporena mikrobiološka aktivnost i ostali biološki procesi, koji uzrokuju njihovo kvarenje.

Za ocenu uspešnosti procesa sušenja obično se uzimaju najvažnija svojstva a to su:

a) kvalitet sušenog proizvoda:

- **rehidracija** - sposobnost sušenog proizvoda da veže količinu vode jednaku onoj početka sušenja, tj. da vrati prvobitni udeo vode i oblik postupkom potapanja u vodu. Rehidracija (instant svojstvo) jedan je od kriterijuma za ocenjivanje uspešnosti dehidracije, a odnosi se na otvorenost strukture odnosno sposobnost ponovnog upijanja vlage. Sposobnost rehidracije osušenih prehrambenih proizvoda predstavlja jednu od njegovih najbitnijih osobina. Rehidracija se izvodi potapanjem proizvoda u određenu količinu vode. Promene koje se ispoljavaju tokom ovog procesa rezultat su prodiranja vode u strukturu proizvoda, ali i istovremenog prelaska rastvorljivih komponenti iz proizvoda u vodu. Oba pomenuta procesa zasnivaju se na difuziji, tako da su veoma zavisna od temperature, ali i od primenjenog postupka sušenja.

$$IR = \frac{\text{masa nabubrelog voća}}{\text{masa suvog voća}} \quad (103)$$

IR – indeks rehidracije

Uzorci koji imaju veću snagu bubrenja kvalitetniji su, indeks rehidracije je jedan od važnijih indikatora kvaliteta suvog voća.

- **senzorska ocena** – spada u važnije analize a podrazumeva određivanje boje, ukusa, arome i vizuelnog izgleda proizvoda, svojstva teksture. Za potrošača je često izgled

najvažniji. Namirnicu koja ima izrazito promenjena senzorna svojstva ljudi neće konzumirati. Senzorne promene posledica su prisutnosti mikroorganizama, hemijskih i fizičkih reakcija. Navedena svojstva se u okviru senzorne analize vrednuju korišćenjem čula. Organoleptička svojstva određuje skup specijalizovanih ocenjivača, na čelu s vođom. Oni pojedinačno, probanjem, ocenjuju svojstva mirisa i ukusa, a svoja zapažanja i ocenu vrednosti, unose u tablicu bodovanja. Dobijeni rezultati statistički se preračunavaju, i u konačnoj oceni uzorka sušenog proizvoda uzimaju se proseci.

- **laboratorijska testiranja kvaliteta** – održivanje uticaja sušenja i toplote na pojedine vitamine A, C i druge. Drugi faktori koji se mogu meriti su udeo minerala, suve materije, vode ukupnih šećera i kiselina kao i dokazivanje veštačkih boja i drugih aditiva.

b) **toplotni učinak** – vreme sušenja unutar maksimalne dopuštene temperature (tako da ne dođe do gubitka boje, ukusa, arome, vitamina itd.) od punjenja svežeg materijala do sušenja na zadovoljavajući nivo udela vlage u satima.

Za istraživanje (modeliranje) procesa sušenja potrebno je provesti ispitivanje kvaliteta dobivenog sušenog proizvoda pri različitim režimima sušenja. Istraživanja su urađena u laboratorijskim uslovima kod malih uzoraka i pokazalo se da parametri kvaliteta variraju zavisno od režima sušenja.

4.3.2.4. Izbor strukture modela

Metodom regresione i korelacione analize istraživan je uticaj procesnih parametara na kvalitet sušenog proizvoda. Kod svih modela regresije radi se o statističkoj međuzavisnosti pojava pa modeli imaju funkcionalni deo i slučajnu promenljivu.

Upotrebljen je nelinearni multiplikativni model višestruke regresije (D.C. Montgomery i G.C. Runger, 2006), koji se linearizuje, sledećeg oblika:

$$Y = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_j^{\beta_j} \dots X_k^{\beta_k} e^{\varepsilon} \quad (104)$$

gde je:

Y - zavisna varijabla

X_1, X_2, \dots, X_k - nezavisne varijable

ε - varijabla koja izražava odstupanje od funkcionalnog odnosa

e - baza prirodnog logaritma

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ - nepoznati parametri modela

Konkretna analiza temelji se na nalaženju funkcije odziva (Y) za tri nezavisno promenljive (X_1, X_2, X_3):

- regresijska funkcija (matematički model) sa linijskim efektima faktora ima oblik:

$$\hat{Y} = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} \quad (105)$$

Transformacijom odabranog tipa matematičkog modela nelinearnog tipa u matematički model linearnog tipa - logaritamski oblik funkcije (metoda linearizacije) s ocenjenim parametrima izgleda:

$$\ln \hat{Y} = \ln \alpha + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \beta_3 \ln X_3 \quad (106)$$

ili u kodiranim koordinatama:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i \quad (107)$$

- regresijska funkcija (matematički model) sa međudejstvom (interakcijom) prvog reda (dvofaktorna međudejstva) ima oblik:

$$\hat{Y} = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} e^{(\beta_{12} \ln X_1 \ln X_2 + \beta_{13} \ln X_1 \ln X_3 + \beta_{23} \ln X_2 \ln X_3)} \quad (108)$$

Metodom linearizacije (logaritmovanjem) dobija se transformisani model:

$$\ln Y' = \ln \alpha + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \beta_3 \ln X_3 + \beta_{12} \ln X_1 \ln X_2 + \beta_{13} \ln X_1 \ln X_3 + \beta_{23} \ln X_2 \ln X_3 \quad (109)$$

ili u kodiranim koordinatama:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} x_i x_j \quad (110)$$

gde je:

$$\begin{aligned} y &= \ln Y'; & b_0 &= \ln \alpha; & b_1 &= \beta_1; & b_2 &= \beta_2; & b_3 &= \beta_3; & x_1 &= \ln X_1; \\ x_2 &= \ln X_2; & x_3 &= \ln X_3; & b_{12} &= \beta_{12}; & b_{13} &= \beta_{13}; & b_{23} &= \beta_{23}. \end{aligned}$$

Analiza transformiranog modela provodi se na isti način kao i kod linearnih modela, uz napomenu da kod interpretacije rezultata treba voditi računa koje su varijable ili parametri transformisani. Parametri u regresijskom modelu i koeficijent korelacije (odnosno koeficijent determinacije) određuju se metodom najmanjih kvadrata odstupanja na osnovu N empirijskih vrednosti varijabli. Prema jednačini 80 za slučaj ponavljanja eksperimenta u centru plana koeficijenti modela se određuju na osnovu sledećih izraza:

- slobodni član polinoma b_0 u kodiranim matematičkim modelima izračunava se na osnovu jednačine:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{0j} \cdot y_{ij} = \frac{1}{10} \cdot (y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + y_{i4} + y_{i5} + y_{i6} + y_{i7} + y_{i8} + y_{i9} + y_{i10}) \quad (111)$$

- koeficijenti linearnih efekata faktora b_i u kodiranim matematičkim modelima na osnovu jednačina:

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{I}{N-n_0} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + y_{i4} - y_{i5} - y_{i6} - y_{i7} - y_{i8}) \\
b_2 &= \frac{I}{N-n_0} \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} \cdot y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} + y_{i2} - y_{i3} - y_{i4} + y_{i5} + y_{i6} - y_{i7} - y_{i8}) \\
b_3 &= \frac{I}{N-n_0} \cdot \sum_{j=1}^n x_{3j} \cdot y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} - y_{i2} + y_{i3} - y_{i4} + y_{i5} - y_{i6} + y_{i7} - y_{i8})
\end{aligned} \tag{112}$$

Koeficijenti dvofaktornog međudejstva b_{ij} u kodiranim matematičkim modelima na osnovu jednačina:

$$\begin{aligned}
b_{12} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{1j} x_{2j} y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} + y_{i2} - y_{i3} - y_{i4} - y_{i5} - y_{i6} + y_{i7} + y_{i8}) \\
b_{13} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{1j} x_{3j} y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} - y_{i2} + y_{i3} - y_{i4} - y_{i5} + y_{i6} - y_{i7} + y_{i8}) \\
b_{23} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{2j} x_{3j} y_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (y_{i1} - y_{i2} - y_{i3} + y_{i4} + y_{i5} - y_{i6} - y_{i7} + y_{i8})
\end{aligned} \tag{113}$$

Pogodnim oblicima transformacije vrlo efikasno se uspostavlja odnos između funkcije nelinearnog tipa u prirodnim koordinatama i funkcija linearnog tipa u kodiranim koordinatama. Zahvaljujući tome kompletna procedura matematičkog modeliranja funkcije odziva provodi se u kodiranim koordinatama i tek na kraju izvrši prevođenje u prirodne koordinate funkcije odziva.

Za pojednostavljenje izračunavanja koeficijenata α , β_i i β_{ij} u dekodiranim matematičkim modelima uvode se konstante:

$$A_i = \frac{2}{\ln \frac{X_{i\max}}{X_{i\min}}} \tag{114}$$

$$a_i = 1 - A_i \ln X_{i\max} \quad \text{za } i = 1, 2, 3$$

Slobodni član α regresionih jednačina određuje se:

$$\alpha = \exp(b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i a_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} a_i a_j) \tag{115}$$

a parametri β_i istraživanog procesa:

$$\beta_i = A_i \left(b_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} a_j \right) \tag{116}$$

i parametri dvofaktornog međudejstva:

$$\beta_{ij} = A_i \cdot A_j \cdot b_{ij} \tag{117}$$

Sprovode se dve regresijske analize odnosno formiraju se dva modela za dve zavisne varijable:

u prvom modelu Y_1 je vreme trajanja procesa sušenja

a u drugom Y_2 je sadržaj ukupnih kiselina (izražen kao jabučna)

Nezavisne varijable su iste za oba modela i to su:

X_1 je temperatura vazduha

X_2 je brzina strujanja vazduha

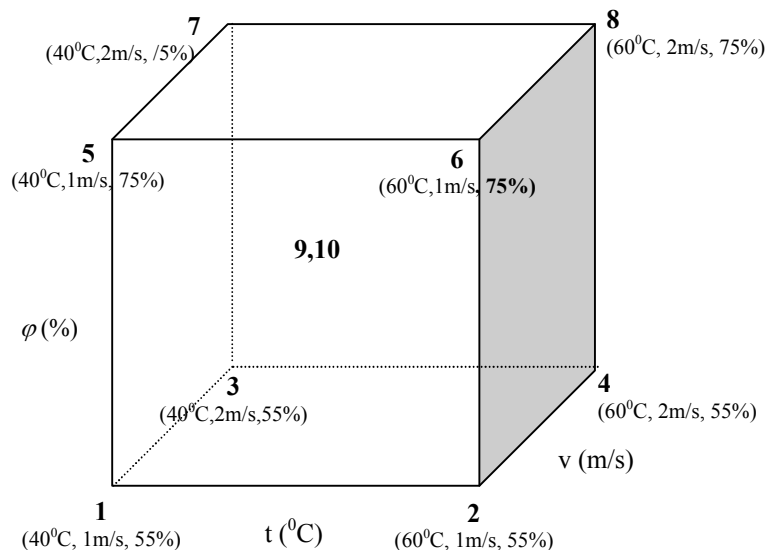
X_3 je relativna vlažnost vazduha

4.3.2.5. Plan izvođenja eksperimenta

Proučavan je uticaj parametara procesa: temperature, relativne vlažnosti vazduha i brzine strujanja na parametre kvaliteta procesa sušenja (vreme trajanja procesa, sadržaj ukupnih kiselina, sadržaj ukupnih šećera). Na osnovu predhodnih saznanja o procesu sušenja kreiran je plan eksperimenta sa tri faktora i dva nivoa s centralnom tačkom. Za centralnu tačku plana eksperimenta uzete su sledeće vrednosti izučavanih parametara: temperatura 50°C , relativna vlažnost 65% i brzina strujanja 1,5 m/s. Kao vrednosti parametara na gornjem nivou uzete su: temperatura 60°C , relativna vlažnost 75% i brzina strujanja 2 m/s dok su vrednosti parametara na donjem nivou bili temperatura 40°C , relativna vlažnost 55% i brzina strujanja 1 m/s. (tabela 12, slika 66).

Tabela 12. Plan eksperimenta

Tretman	Faktori		
	$t (^{\circ}\text{C})$	$v (\text{m/s})$	$\varphi (\%)$
1	40	1	55
2	60	1	55
3	40	2	55
4	60	2	55
5	40	1	75
6	60	1	75
7	40	2	75
8	60	2	75
9	49	1,4	64
10	49	1,4	64



Slika 66: Prostorni prikaz plana eksperimenta

Modeliranje procesa sušenja je vrlo složen zadatak, jer je potrebno poznavati veliki broj parametara. Isto tako, vrlo je važno obratiti pažnju na količinu energije koja se troši tokom procesa, s ciljem da se na što ekonomičniji način dobije što kvalitetniji proizvod. Zato je bitno pravilno odabrati parametre procesa, jer oni mogu uveliko pojednostaviti modeliranje i smanjiti proizvodne zahteve, a samim tim i potrošnju energije potrebne za sam proces.

U cilju određivanja uticaja pojedinih parametara na kvalitet sušenog proizvoda provedeno je eksperimentalno istraživanje, odnosno planirani eksperiment. U skladu sa teorijskim razmatranjima procesa sušenja može se zaključiti da na kvalitet sušenog proizvoda uticaj imaju brojni faktori, a pretpostavlja se da najveći uticaj imaju: temperatura, relativna vlažnost, pritisak i brzina agensa sušenja, kao i pojedine interakcije između nabrojanih faktora. S obzirom na broj faktora u radu će se primeniti kodirani plan eksperimenta 2³ u kojem će se odrediti uticaj tri osnovna faktora i njihove pojedinačne interakcije. Ukoliko se analizom eksperimenta pokaže da predloženi faktori ne utiču na rezultate, a variranje rezultata je značajno, planirani eksperiment bi trebalo ponoviti s novim relevantnim faktorima.

Modeliranje procesa kondenzacionog sušenja provedeno je primenom 2³ faktorskog plana. Tokom eksperimentisanja istovremeno su varirana tri faktora procesa: temperatura (t , °C), brzina strujanja vazduha (v , m/s) i relativna vlažnost vazduha (φ , %) koji utiču na kvalitet proizvoda. Nivoi faktora (tabela 12, jednačina 102) određeni su prema matrici stanja eksperimenta za potpuni 2³ plan eksperimenta sa 3 faktora. Primenjenom 2³ faktorskom planu tokom kojeg su faktori procesa varirani na dva nivoa (+1 i -1) na kojima pojedini uređaj radi

ili dve vrednosti bilo kog faktora, dodato je 2 centralne tačke (0), što znači da su ti eksperimenti provedeni faktorima procesa čije su vrednosti sračunate prema jednačini:

$$X_s = \sqrt{X_{\max} \cdot X_{\min}} \quad (118)$$

i uvrštene u tabelu 10 i 12.

Na ovaj način ispitan je uticaj svakog faktora i njihovo međudelovanje na odziv procesa. U primeru kojim se ilustruje postupak planiranja eksperimenta i analiza rezultata nakon obavljenih testova za zavisne varijable izabrane su: Y_2 – sadržaj ukupnih kiselina (izražene kao jabučna) i Y_3 - sadržaj ukupnih šećera. Urađeno je 10 merenja sadržaja ukupnih šećera i ukupnih kiselina prema (2^3+2) faktorskom planu.

Planiranje eksperimenta i kasnije statistička obrada podataka provedena je pomoću programskog paketa CoREMED (P. Dašić, 2010) koji stoji na raspolaganju na VTMŠSS u Trsteniku.

4.3.2.6. Generisanje matrice eksperimenta sušenja

U cilju prikupljanja empirijskih podataka potrebnih za statističku analizu (modeliranje) sproveden je eksperiment na postrojenju opisanom u predhodnom poglavlju.

Eksperiment se sastoji od $n=10$ ponavljanja tretmana s različitim vrednostima ulaznih veličina. Bitna je pretpostavka da se tretmani ponavljaju u stacionarnim uslovima, tako da za vreme eksperimenta ne postoji promena funkcionalne zavisnosti $Y(X)$.

Bilo je potrebno provesti 10 stanja eksperimenta (stanje u središu ponavljalo se 2 puta). Temperatura okoline bila je $18 - 20^0\text{C}$. Eksperiment se izvodio statistički slučajno, prema tablici slučajnih brojeva.

Statistička obrada se provodi u kodiranim vrednostima faktora pri čemu procenjeni koeficijenti predstavljaju promenu odziva kada se nivo pripadajućeg faktora promeni za jedan nivo.

Kodiranjem izabranih parametara eksperimenta pojednostavljuje se rešavanje sistema jednačina (80) jer se matrica koeficijenata svodi na jediničnu matricu.

U tom slučaju parametar b_i se interpretira kao promena očekivane vrednosti zavisne varijable za jedinični porast nezavisne varijable x_i uz pretpostavku da su ostale $k-1$ regresijske varijable nepromenjene. Parametar b_0 je procenjena vrednost zavisne varijable kada su vrednosti svih nezavisnih varijabli jednake nuli. Najveći uticaj na odziv ima faktor čiji je procenjeni koeficijent najveći.

Nakon izvođenja eksperimenta prikupljeni su podaci o parametrima kvaliteta i nivou uticajnih faktora. Prikupljeni podaci i kodirani plan 2^3 faktornog eksperimenta prikazani su u

sledećoj tabeli. Uticajnost pojedinih faktora po tretmanima utvrđena je laboratorijskim ispitivanjem tj. analizom hemijskog sastava sušenog materijala. Izveštaji o ispitivanju tj. rezultati hemijske analize Zavoda za javno zdravlje – Kruševac, nalaze u Prilogu rada (Poglavlje 8.3. Prilog 3). Na osnovu tih rezultata popunjena je tabela 13. (vrednosti Y_2 i Y_3 uzete su iz tih izveštaja zavisno od uslova izvođenja eksperimenta).

Tabela 13: Kodirani plan 2^3 faktorskog eksperimenta s 2 centralne tačke i dobijeni rezultati eksperimenta

Tretman	Faktori			Rezultati eksperimenta		
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	-1	-1	-1	12	0,90	67,0
2	1	-1	-1	6,5	0,96	68,6
3	-1	1	-1	10,33	0,54	71,1
4	1	1	-1	6	0,84	69,6
5	-1	-1	1	16,8	1,15	67,9
6	1	-1	1	8,2	1,06	73
7	-1	1	1	16	0,68	72,5
8	1	1	1	7,66	1,09	64,3
9	0	0	0	9,25	0,96	68,7
10	0	0	0	9,16	0,94	67,8

Y_1 – Vreme trajanja procesa u satima

Y_2 – Sadržaj ukupnih kiselina (izražene kao jabučna) u %

Y_3 – Sadržaj ukupnih šećera u %

Plan matrica se može proširiti kombinacijom faktora: x_1x_2 , x_1x_3 i x_2x_3 koji omogućavaju ocenu efekata dvofaktornih međudejstava. U matrici se dodaje i kolona x_0 , čija je vrednost u svim redovima jednaka jedinici (+1), a služi za ocenu slobodnog člana b_0 .

U tabeli 13 navedene su izmerene vrednosti najvažnijih parametara hemijskog sastava (sadržaja ukupnih kiselina i ukupnih šećera u %) u sušenom plodu ispitivane sorte jabuke, pri određenom stanju eksperimenta. Zbog isparavanja vode pri sušenju u voću se koncentrišu topive i netopive materije, npr. kiseline, minerali i vitamini. Na osnovu rezultata laboratorijskih analiza može se zaključiti da u toku sušenja, kao metode konzervisanja, dolazi do promena u sadržaju najvažnijih parametara hemijskog sastava ploda jabuke. Mereno je trajanje sušenja pri različitim uslovima sušenja i dobijene vrednosti od 6 - 16,8 h. Rezultati ispitivanja trajanja procesa pokazali su se statistički značajno različitim za pojedine tretmane. Sadržaj ukupnih kiselina (izražene u jabučnoj kiselini) suvih kolutova istraživane sorte je 0,54 – 1,15% zavisno od uslova sušenja.

U tabeli 13 zapaža se:

- variranje u vremenu trajanja procesa sušenja zavisno od uslova eksperimenta, tako da je minimalna vrednost od 6 h dobijena pri uslovima definisanim u eksperimentu 4, a maksimalna vrednost od 16,8 h u eksperimentu 5 .

- variranje u vrednostima sadržaja ukupnih kiselina zavisno od uslova eksperimenta, tako da je minimalna vrednost od 0,54% dobijena pri uslovima definisanim u eksperimentu 3, a maksimalna vrednost od 1,15% u eksperimentu 5. U sušenim plodovima jabuke sorte „crveni delišes“ gubitak ukupnih kiselina iznosi 4,16 do 55% u odnosu na polaznu sirovinu.

- variranje u vrednostima sadržaja ukupnih šećera, statistički nije značajno u zavisnosti od uslova sušenja (temperature, brzine strujanja i relativne vlažnosti agensa sušenja), na osnovu čega se može zaključiti da sušenje kao metoda konzervisanja ne utiče na smanjenje ukupnih šećera, kod ispitivane sorte jabuke.

Senzorsko ocenjivanje kvaliteta proizvoda pokazalo je zadovoljavajuće ocene za izgled, miris i ukus svih uzoraka (tabela 14). Miris i ukus suvog proizvoda podseća na zdrav i svež plod jabuke. Sušeni proizvodi su bez stranih primesa.

Tabela 14. Senzorska ispitivanja

Izgled uzorka	svojtven
Strane primese	bez
Miris	svojtven
Ukus	svojtven

Osušeni plodovi po svojim senzornim karakteristikama treba da se malo razlikuju od svežih.

Rezultati eksperimenta upućuju na zaključak da razlike u vremenu trajanja procesa i sadržaju ukupnih kiselina proizilaze iz različitih uslova sušenja. Efekat promene nivoa nezavisno promenljive dovodi do promene u odgovoru sistema. Rezultati eksperimenta dobijeni u pilot postrojenju za kondenzaciono sušenje koristiće se za razvoj i validaciju razvijenog modela primenom regresione analize. Regresione jednačine predstavljaju matematičke izraze, koji pokazuju kako na vrednost zavisne varijable utiču nezavisne varijable. Matematičkim modelima će se prognozirati vrednosti parametara kvaliteta sušenih proizvoda, pri slučajno zadatim vrednostima nezavisno promenljivih.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Završnu fazu svakog eksperimenta predstavlja obrada, analiza i prikazivanje rezultata. U navedenom istraživanju pripremi i izvođenju eksperimenta je posvećeno mnogo pažnje. Kod uspešno okončanog eksperimenta obrada rezultata ne predstavlja teškoću.

Prikupljeni statistički podaci merenjem ulazno/izlaznih veličina procesa predstavljaju „sirovu“ statističku građu koju je potrebno na odgovarajući način urediti i pripremiti za regresionu analizu. Danas se statistički podaci obrađuju prikladnim savremenim programskim paketima koji omogućavaju, uz vrlo jednostavno rukovanje, unos, pripremu i obradu prikupljenih statističkih podataka.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju u kojoj meri različiti uslovi procesa sušenja (svojstva agensa sušenja) utiču na kinetiku sušenja, trajanje procesa sušenja i kvalitet sušenog proizvoda jabuke sorte „crveni delišes“. Empirijski modeli dobijeni su u potpunosti jednostavnom ili multiplom regresijom.

5.1. MODELI KRIVIH KINETIKE SUŠENJA ANALIZIRANE SORTE JABUKA

Kinetika sušenja bavi se problematikom izučavanja promene vlage sa vremenom, temperature sušenog materijala sa vremenom i brzine sušenja. U radu se istražuje kinetika sušenja, u određenom rasponu merenih veličina, u cilju izbora matematičkog modela koji uspešno opisuje kinetiku sušenja i najpovoljnijeg režima sušenja. Krive kinetike sušenja definisane su na osnovu eksperimentalnih podataka, dobijenih ispitivanjem na laboratorijskoj sušari vlastite konstrukcije. Eksperiment je izveden tako da se prati promena udela vlage (w^s, τ) i brzina promene udela vlage ($\Delta w^s / \Delta \tau, \tau$) na suhu osnovu u zavisnosti od vremena.

Istraživanja kinetike sušenja, ispitivane sorte jabuke, su obavljena:

- sušenjem na dve konstantne temperature vazduha 40⁰C i 60⁰C,
- sušenjem na dve konstantne brzine strujanja vazduha: minimalna - 1m/s i maksimalna koja se mogla ostvariti na laboratorijskom uređaju - 2m/s
- sušenjem na dve konstantne relativne vlažnosti vazduha 55% i 75%
- sušenje je obavljeno na atmosferskom pritisku u svim tretmanima

u cilju utvrđivanja uticaja određenog parametra sušenja na brzinu sušenja, odnosno na smanjenje vlažnosti materijala tokom vremena.

Kinetika sušenja se može predstaviti različitim krivama koje predstavljaju promene po vremenu različitih veličina koje opisuju stanje plodova ispitivane sorte jabuke.

Kinetika sušenja se prikazuje kao kriva sušenja i kriva brzine sušenja. Kriva sušenja opisuje promenu sadržaja vlage materijala tokom sušenja (vremena) a kriva brzine sušenja opisuje promenu brzine sušenja od vremena. Brzina sušenja posmatra se pod stalnim uslovima i definiše se količinom vode koja ispari s njegove površine u jedinici vremena, pri čemu se pod stalnim uslovima podrazumeva: temperatura t , relativna vlaga φ i brzina strujanja vazduha ν .

Kinetika sušenja praćena je gravimetrijskom (direktnom) metodom, tj. merenjem promene mase vlažnog materijala tokom sušenja. Tok sušenja definisan je vrstom i svojstvima materijala, vrstom prisutne vlage (slobodna, vezana) načinom sušenja i uslovima sušenja. Kada su u komori postignuti radni uslovi definisani stanjem eksperimenta, uzorak na nosaču postavlja se na vagu i započinje merenje. U definisanim vremenskim intervalima (od 1h) očitava se masa vlažnog uzorka. Za svaki vremenski interval može se izračunati sadržaj vlage uzorka pod uslovom da je poznata polazna vlažnost za sve eksperimente definisane planom eksperimenta i da se nacrtava zavisnost sadržaja vlage od vremena - grafički prikaz krive sušenja, i krivih brzine sušenja. Podaci sa grafika poslužili su kao osnova za aproksimaciju krivih sušenja, jabuke sorte „crveni delišes“ matematičkim modelom – polinomnom regresijom. Regresioni model koji sadrži jednu zavisnu (w^s ili $dw^s/d\tau$) i jednu nezavisnu varijablu (τ) je model jednostavne regresije.

Primenjujući opisanu proceduru merenja u poglavlju MATERIJAL I METOD RADA određene su kinetike krive sušenja plodova jabuke. Proces sušenja praćen je smanjenjem mase, a merenje je rađeno na elektronskoj vagi. Merenjem mase materijala za vreme sušenja u određenim vremenskim razmacima može se dobiti linija zavisnosti vlažnosti materijala od vremena sušenja-kriva sušenja. Rezultati eksperimenta sušenja ispitivane sorte jabuke prikazani su u tabelama i grafički. U tabelama se nalaze izmereni i izračunati podaci koji su neophodni za određivanje kinetike sušenja (krive sušenja i brzine sušenja). Na osnovu početne vlažnosti uzorka (w_l) kao i promene mase uzorka u posmatranim vremenskim intervalima pristupilo se izračunavanju trenutnih vrednosti relativne vlažnosti uzorka (w), prema opisanom izrazu (100) i apsolutne vlažnosti uzorka (w^s) (izraz 5), koje su poslužile za definisanje kinetičkih krivih – grafičko i matematičko. Pošto se vlažnost materijala smanji na kritičnu w_k , ista se počinje sporije smanjivati i postepeno se približava ravnotežnoj vlažnosti. Na dijagramu (w^s, τ) jasno se mogu uočiti II i III period sušenja.

Sušenje se prikazuje krivama koje daju zavisnost dinamike gubitka vode i brzine sušenja od vremena. Brzina sušenja posmatra se pod stalnim uslovima pritiska, temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vazduha.

5.1.1. UTICAJ TEMPERATURE SUŠENJA NA KINETIKU SUŠENJA

Uticaj temperature agensa sušenja (vazduha) na kinetiku sušenja jabuke sorte „crveni delišes“, rezane na kolutove, ispitan je pri temperaturama 40 i 60°C uz relativnu vlažnost vazduha 55% pri brzini strujanja od 2m/s. Rezultati merenja i određivanja sadržaja vlage u jabuci (relativne i apsolutne) tokom sušenja prikazani su u tabelama 15 i 16.

Tabela 15: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:

$$t = 40^{\circ}\text{C}, v = 2\text{m/s}, \varphi = 55\%$$

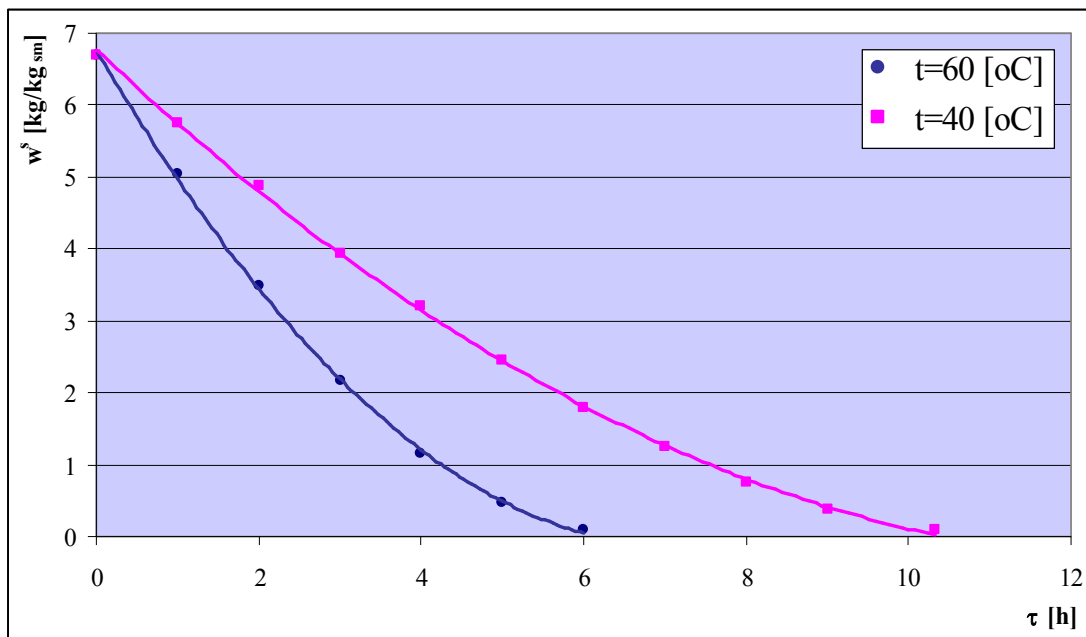
$\tau [h]$	$M_m [g]$	$SM [kg/kg]$	$w [kg/kg]$	$M_w [g]$	$w^s [kg/kg_{sm}]$
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	1119	0,148	0,852	953,4	5,76
2	968	0,17	0,83	803,44	4,88
3	813	0,203	0,797	648	3,926
4	693	0,238	0,762	528	3,2
5	569	0,29	0,71	404	2,45
6	461	0,358	0,642	296	1,79
7	370	0,446	0,554	205	1,24
8	288	0,573	0,423	123	0,745
9	228	0,724	0,276	63	0,38
10,33	180	0,917	0,083	15	0,09

Tabela 16: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:

$$t = 60^{\circ}\text{C}, v = 2\text{m/s}, \varphi = 55\%$$

$\tau [h]$	$M_m [g]$	$SM [kg/kg]$	$w [kg/kg]$	$M_w [g]$	$w^s [kg/kg_{sm}]$
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	997	0,165	0,834	831	5,05
2	745	0,222	0,778	579	3,5
3	522	0,316	0,684	357	2,16
4	355	0,465	0,535	190	1,15
5	242	0,682	0,318	77	0,466
6	180	0,917	0,083	15	0,09

Prvi korak u analizi odnosa među dvema varijablama $w^s [kg/kg_{sm}]$ i $\tau [h]$ sastoji se u crtanju dijagrama rasipanja. Prema rasporedu tačaka donosi se prvi sud o obliku, smeru i jačini veze među varijablama. Slika 67 pokazuje dinamiku gubljenja vode pri sušenju jabuke ispitivane sorte, na dve temperature sušenja: 40°C i 60°C, na bazi n parova vrednosti w^s i τ . Pošto masa suve materije u plodu ostaje nepromenjena tokom sušenja, korišćenjem sadržaja vlage na suhu osnovu, moguće je bolje uočiti dinamiku gubljenja vode ispitivane sorte.



Slika 67: Krive sušenja w^s [kg/kg_{sm}] ispitivane sorte jabuke na temperaturi 40°C i 60°C

Na osnovu dijagrama rasipanja (slika 67) varijabli w^s i τ jasno se vidi:

- da je odnos među njima nelinearan i da su varijable veoma usko povezane,
- da u početnom periodu zavisnost promene vlage i vremena sušenja sušenja ima približno linearan karakter (period konstantne brzine sušenja), a u drugom periodu ta zavisnost više nema linearan karakter (period opadajuće brzine sušenja)
- da temperatura agensa sušenja ima značajan uticaj na trajanje procesa sušenja
- da proces sušenja kolutova ispitivane sorte jabuke duže traje pri nižoj temperaturi temperaturi agensa sušenja.

Pri višim temperaturama vazduha veća je pokretačka sila procesa prenosa toplote, a time i brzina isparavanja i zagrevanja materijala koji se suši. Više su i vrednosti koeficijenta prenosa materije, koeficijenta prelaza toplote i koeficijenta toplotne provodljivosti, sto utiče na skraćenje vremena trajanja sušenja.

Potrebno je pronaći regresionu liniju koja dobro aproksimira posmatrani skup tačaka.

Jednostavna krivolinijska regresiona analiza sprovodi se na osnovu n parova vrednosti varijabli w^s i τ . Krive sušenja aproksimirane su polinomom drugog stepena. Pri temperaturi od 40°C, eksperimentalni podaci (tabele 15 i 16) sušenja mogu se najbolje opisati kvadratnom regresionom jednačinom, koja daje zavisnost vlažnosti materijala od vremena sušenja:

$$w^s = f_1(\tau) = 0,0398\tau^2 - 1,0646\tau + 6,7701 \quad (119)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9995$

Gubitak vlage tokom sušenja najizraženiji je prvih 180 min

Sušenje na višoj temperaturi od 60°C odvijalo se brže prema, takođe, kvadratnoj regresionoj jednačini:

$$w^s = f_1(\tau) = 0,1352\tau^2 - 1,931\tau + 6,7658 \quad (120)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9994$

Vreme sušenja ispitivane sorte jabuke na temperaturi sušenja 60°C kraće je za 38,72 % u odnosu na vreme sušenja na temperaturi 40°C.

Da bi se definisala kinetika sušenja ispitivane sorte jabuke, pored krive sušenja, koristi se i kriva brzine sušenja. Izračunati podaci (na osnovu merenih) za grafičko prikazivanje i modeliranje brzine sušenja u funkciji od vremena dati su u tabelama 17 i 18 pri temperaturama 40°C i 60°C.

Tabela 17: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha

$$t = 60^\circ\text{C}, \quad v = 2\text{m/s}, \quad \varphi = 55\%$$

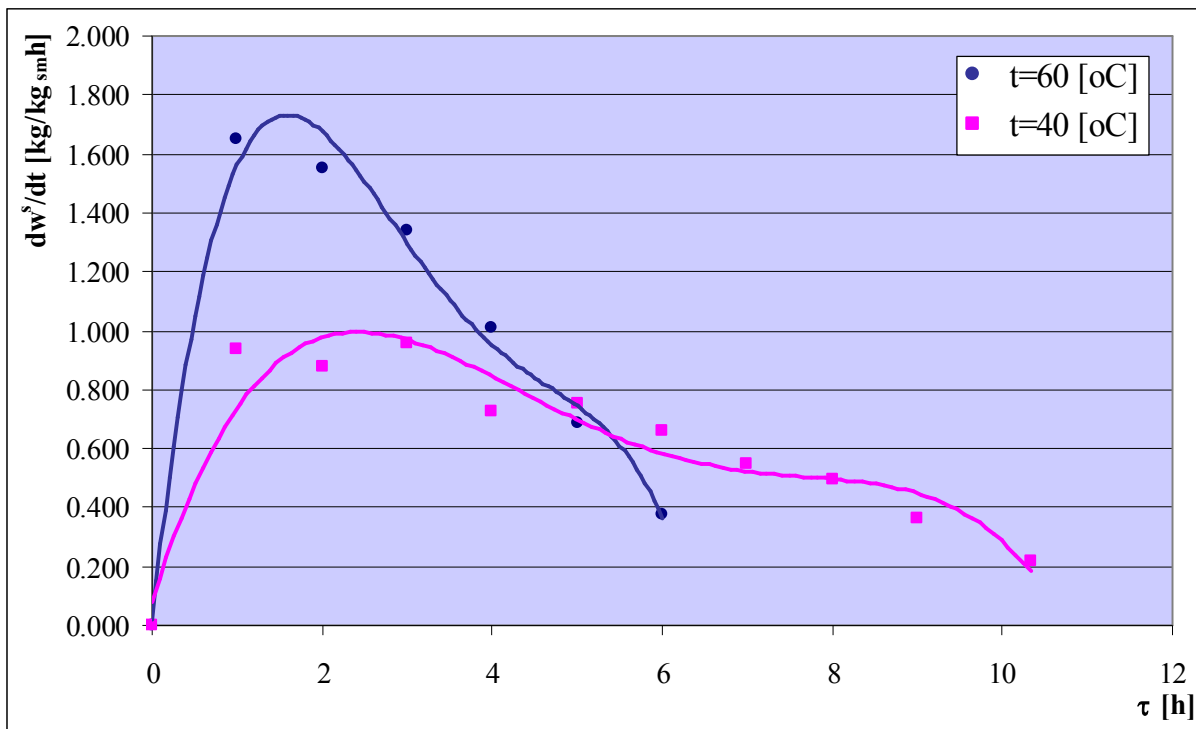
τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	273	0,035	1,65
2	252	0,057	1,55
3	223	0,094	1,34
4	167	0,149	1,01
5	113	0,217	0,684
6	62	0,235	0,376

Tabela 18: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha

$$t = 40^\circ\text{C}, \quad v = 2\text{m/s}, \quad \varphi = 55\%$$

τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	151	0,018	0,94
2	151	0,022	0,88
3	155	0,033	0,954
4	120	0,035	0,726
5	124	0,052	0,75
6	108	0,068	0,66
7	91	0,088	0,55
8	82	0,127	0,495
9	60	0,151	0,365
10,33	36	0,372	0,218

Na slici 68 dat je grafički prikaz zavisnosti brzine sušenja od vremena ispitivane sorte jabuke, na dve temperature sušenja 40°C i 60°C, na bazi n parova vrednosti $\Delta w^s / \Delta \tau$ i τ .



Slika 68: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/kg_{sm}h] ispitivane sorte jabuke na temperaturi sušenja 40 i 60°C

Na osnovu dijagrama rasipanja, primenom jednostavne krivolinijske regresione analize (metode najmanjih kvadrata), pri obradi eksperimentalnih podataka, dobijene su regresione linije koje dobro aproksimiraju posmatrani skup tačaka. Krive brzine sušenja aproksimirane su polinomom četvrtog stepena. Pri temperaturi od 40°C brzina sušenja menjala se prema empirijskom izrazu:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2(\tau) = -0,0016\tau^4 + 0,0375\tau^3 - 0,3096\tau^2 + 0,9295\tau + 0,0808 \quad (121)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9052$

Brzina sušenja na višoj temperaturi od 60°C je veća i aproksimira se pomoću polinoma četvrtog stepena:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2'(\tau) = -0,0175\tau^4 + 0,2618\tau^3 - 1,3792\tau^2 + 2,6778\tau + 0,0205 \quad (122)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9858$

Karakteristika grafika na kome je prikazana brzina sušenja je da krive polaze iz koordinatnog početka odnosno od nulte vrednosti, tj. na početku procesa sušenja brzina je jednaka nuli. Sa grafika se uočava da se krive brzine sušenja ispitivane sorte jabuke na različitim temperaturama razlikuju. Analizirajući krive brzine sušenja zaključuje se da za ispitivanu sortu jabuke brzina sušenja raste :

- pri temperaturi od 60⁰C, dostiže maksimum posle prvog sata sušenja
- pri temperaturi od 40⁰C, dostiže maksimum posle drugog sata sušenja

nakon čega brzina sušenja opada. Smanjenje brzine sušenja, nakon postizanja maksimalne vrednosti, umerenije je pri temperaturi od 40⁰C

Maksimalna brzina sušenja je oko 1,75 puta veća na temperaturi od 60⁰C u odnosu na temperaturu od 40⁰C.

5.1.2. UTICAJ BRZINE STRUJANJA NA KINETIKU SUŠENJA

Uticao brzine strujanja agensa sušenja (vazduha) na kinetiku sušenja jabuke sorte „crveni delišes“, rezane na kolutove, ispitivan je pri brzinama strujanja 1 i 2 m/s agensa sušenja uz temperaturu vazduha 60⁰C pri relativnoj vlažnosti vazduha od 55%. Rezultati eksperimenata sušenja prikazani su u tabelama 19. i 20.

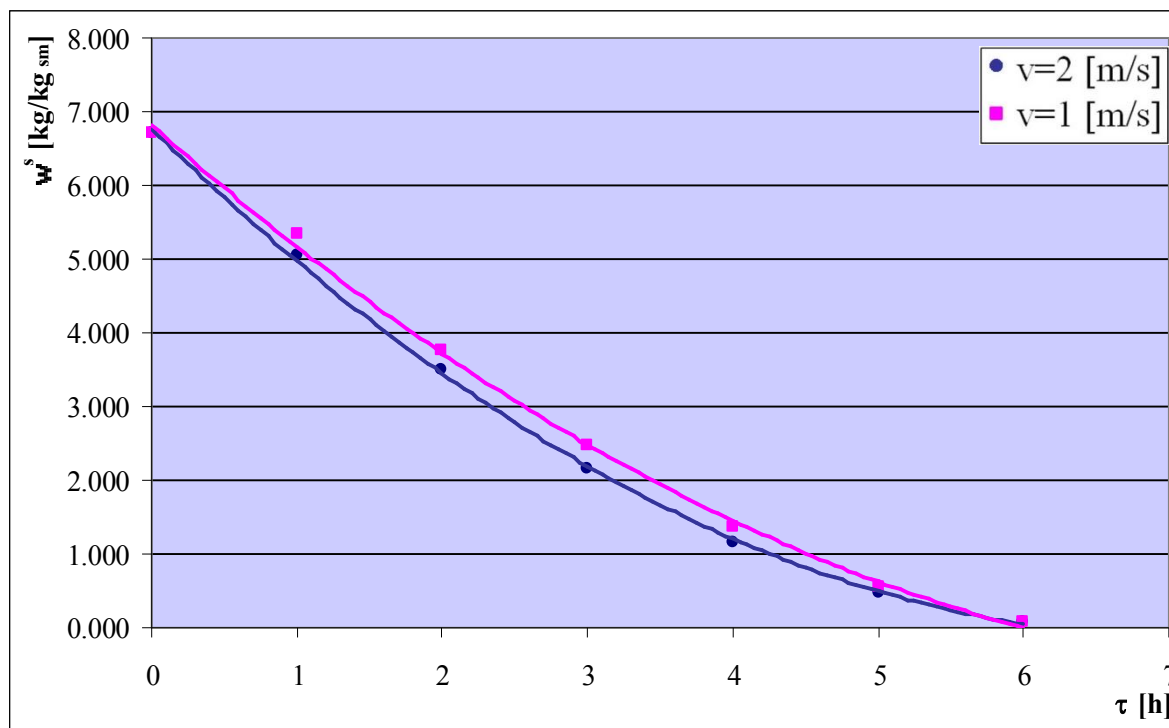
Tabela 19: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:
t = 60⁰C, v = 2m/s, φ = 55%

τ [h]	M_m [g]	SM [kg/kg]	w [kg/kg]	M_w [g]	w^s [kg/kg _{sm}]
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	997	0,165	0,834	831	5,05
2	745	0,222	0,778	579	3,5
3	522	0,316	0,684	357	2,16
4	355	0,465	0,535	190	1,15
5	242	0,682	0,318	77	0,466
6	180	0,917	0,083	15	0,09

Tabela 20: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:
t = 40⁰C, v = 1m/s, φ = 55%

τ [h]	M_m [g]	SM [kg/kg]	w [kg/kg]	M_w [g]	w^s [kg/kg _{sm}]
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	1043	0,158	0,842	878,2	5,33
2	784	0,21	0,79	619,36	3,76
3	574	0,287	0,713	409,26	2,48
4	390	0,423	0,577	225	1,36
5	255	0,647	0,353	90	0,545
6	180	0,917	0,083	15	0,09

Provođenjem jednostavne regresione analize na osnovu n parova vrednosti varijabli w^s i τ dolazi se do regresionih linija – polinoma drugog stepena, koji dobro aproksimiraju posmatrani skup tačaka. Slika 69 pokazuje dinamiku gubljenja vode pri sušenju jabuke ispitivane sorte na dve brzine strujanja vazduha: 1m/s i 2m/s.



Slika 69: Krive sušenja w^s [kg/kg_{sm}] ispitivane sorte jabuke pri brzini strujanja vazduha od 1m/s i 2m/s

Pri brzini agensa sušenja od 1 i 2m/s nema značajne razlike u trajanju procesa sušenja, kod temperature vazduha za sušenje od 60⁰C i relativnoj vlažnosti od 55%.

Krive sušenja aproksimirane su, primenom jednostavne krivolinijske regresione analize, polinom drugog stepena. Pri brzini strujanja od 1m/s eksperimentalni podaci (tabele 19 i 20) sušenja mogu se najbolje opisati kvadratnom regresionom jednačinom oblika:

$$w^s = f_1(\tau) = 0,1032\tau^2 - 1,755\tau + 6,8182 \quad (123)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9983$

Sušenje pri većoj brzini strujanja ($v = 2 m/s$), takođe, se aproksimira kvadratnom regresionom jednačini:

$$w^s = f_1'(\tau) = 0,1352\tau^2 - 1,931\tau + 6,7658 \quad (124)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9994$

Da bi se definisala kinetika sušenja ispitivane sorte jabuke pored krive sušenja koristi se i kriva brzine sušenja. Izračunati podaci (na osnovu merenih) za grafičko prikazivanje i modeliranje brzine sušenja u funkciji od vremena dati su u tabelama 21 i 22 pri brzinama strujanja vazduha 1m/s i 2m/s.

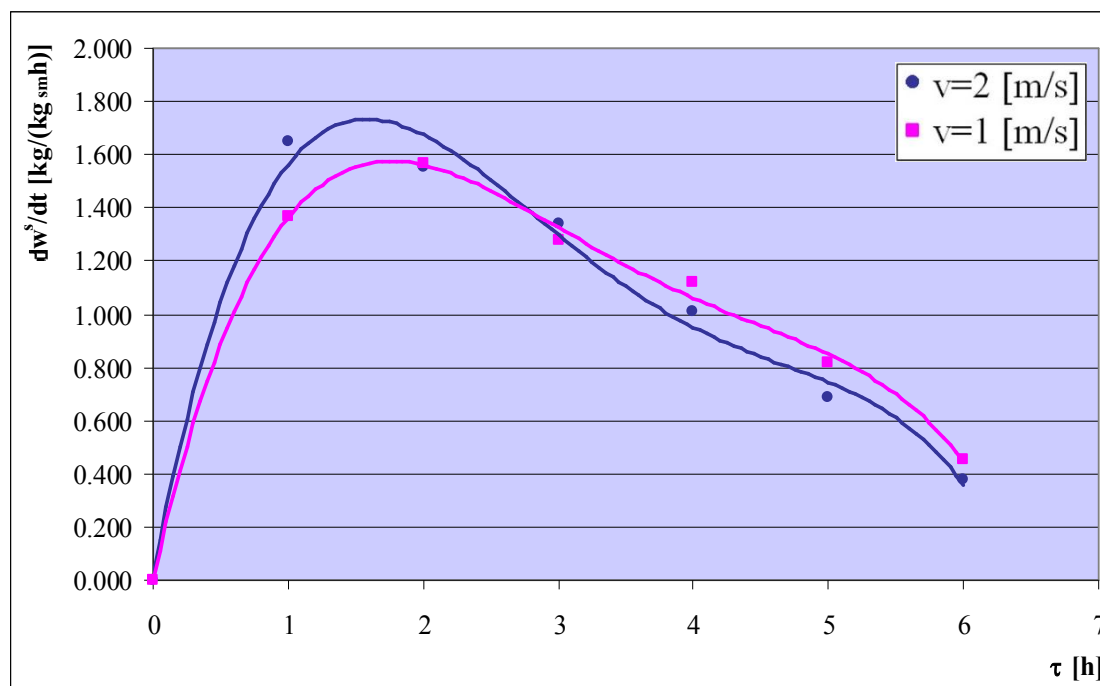
Tabela 21: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha
 $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 1\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$

τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	227	0,028	1,37
2	259	0,052	1,57
3	210	0,077	1,28
4	184	0,136	1,12
5	135	0,224	0,815
6	75	0,27	0,455

Tabela 22: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha
 $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$

τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	273	0,035	1,65
2	252	0,057	1,55
3	223	0,094	1,34
4	167	0,149	1,01
5	113	0,217	0,684
6	62	0,235	0,376

Na slici 70 dat je grafički prikaz zavisnosti brzine sušenja od vremena ispitivane sorte jabuke na dve brzine strujanja vazduha: 1m/s i 2m/s, na bazi n parova vrednosti $\Delta w^s / \Delta \tau$ i τ .



Slika 70: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/kg_{sm}h] ispitivane sorte jabuke pri brzini strujanja vazduha od 1m/s i 2m/s

Krive brzine sušenja aproksimirane su, primenom jednostavne krivolinijske regresije, regresionim linijama - polinomima četvrtog stepena. Pri brzini strujanja vazduha od 2m/s , empirijska jednačina zavisnosti brzine sušenja od vremena glasi:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2(\tau) = -0,0175\tau^4 + 0,2618\tau^3 - 1,3792\tau^2 + 2,6778\tau + 0,0205 \quad (125)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9858$

Brzina sušenja pri nižoj brzini strujanja vazduha od 1m/s, manja je u prvoj polovini trajanja procesa i aproksimira se, takođe, pomoću polinoma četvrtog stepena:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2'(\tau) = -0,0135\tau^4 + 0,2024\tau^3 - 1,0941\tau^2 + 2,2657\tau + 0,0028 \quad (126)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9963$

Nešto veća maksimalna brzina sušenja ostvaruje se pri većoj brzini strujanja vazduha. Pri većim brzinama strujanja povoljniji su hidrodinamički uslovi (manji otpori) što za posledicu ima veće brzine prenosa toplote i materije.

5.1.3. UTICAJ RELATIVNE VLAŽNOSTI VAZDUHA NA KINETIKU SUŠENJA

Uticao relativne vlažnosti agensa sušenja (vazduha) na kinetiku sušenja jabuke sorte „crveni delišes“, rezane na kolutove, ispitivan je pri relativnim vlažnostima agensa sušenja 55 i 75% uz temperaturu vazduha 60⁰C pri brzini strujanja od 2 m/s. Rezultati eksperimenata sušenja prikazani su u tabelama 23 i 24.

Tabela 23: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:
t = 60⁰C, v = 2m/s, φ = 55%

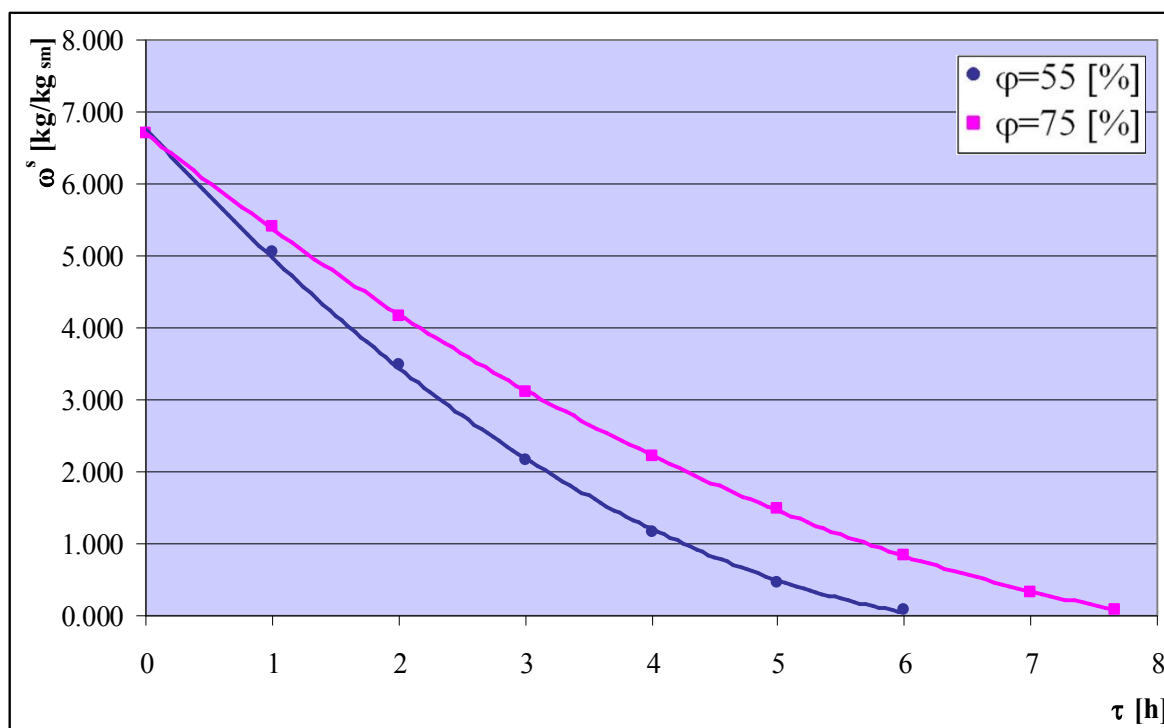
τ [h]	M_m [g]	SM [kg / kg]	w [kg / kg]	M_w [g]	w^s [kg / kg _{sm}]
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	997	0,165	0,834	831	5,05
2	745	0,222	0,778	579	3,5
3	522	0,316	0,684	357	2,16
4	355	0,465	0,535	190	1,15
5	242	0,682	0,318	77	0,466
6	180	0,917	0,083	15	0,09

Tabela 24: Rezultati za krivu sušenja pri parametrima vazduha:

$$t = 60^{\circ}\text{C}, \quad v = 2\text{m/s}, \quad \varphi = 75\%$$

τ [h]	M_m [g]	SM [kg/kg]	w [kg/kg]	M_w [g]	w^s [kg/kg _{sm}]
0	1270	0,13	0,87	1105	6,7
1	1060	0,156	0,844	895	5,41
2	850	0,194	0,806	685	4,15
3	680	0,243	0,757	515	3,11
4	530	0,31	0,69	365	2,22
5	410	0,40	0,6	246	1,5
6	305	0,54	0,46	140,3	0,85
7	217	0,76	0,24	52,1	0,315
7,66	180	0,917	0,083	15	0,09

Provođenjem jednostavne regresione analize na osnovu n parova vrednosti varijabli w^s i τ dolazi se do regresionih linija – polinoma drugog stepena, koji dobro aproksimiraju posmatrani skup tačaka. Slika 71 pokazuje dinamiku gubljenja vode pri sušenju jabuke ispitivane sorte na dve relativne vlažnosti vazduha: 55% i 75%.



Slika 71: Krive sušenja w^s [kg/kg_{sm}] ispitivane sorte jabuke pri relativnoj vlažnosti vazduha od 55% i 75%

Relativna vlažnost vazduha za sušenje ima značajnog uticaja na dužinu trajanja procesa sušenja. Krive sušenja aproksimirane su polinom drugog stepena.

Pri relativnoj vlažnosti od 75% eksperimentalni podaci (tabele 23 i 24) sušenja, mogu se najbolje opisati kvadratnom regresionom jednačinom oblika:

$$w^s = f_1(\tau) = 0,0699\tau^2 - 1,398\tau + 6,702 \quad (127)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9999$

Sušenje pri nižoj relativnoj vlažnosti ($\varphi = 55\%$) aproksimira se, takođe, kvadratnom regresionom jednačinom oblika:

$$w^s = f_1'(\tau) = 0,1352\tau^2 - 1,931\tau + 6,7658 \quad (128)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9994$

Vreme sušenja ispitivane sorte jabuke pri relativnoj vlažnosti od 55% kraće je za 21,67% u odnosu na vreme sušenja pri relativnoj vlažnosti od 75%.

Da bi se definisala kinetika sušenja ispitivane sorte jabuke pored krive sušenja koristi se i kriva brzine sušenja. Izračunati podaci (na osnovu merenih) za grafičko prikazivanje i modeliranje brzine sušenja u funkciji od vremena dati su u tabelama 25 i 26 pri relativnim vlažnostima vazduha 55% i 75%.

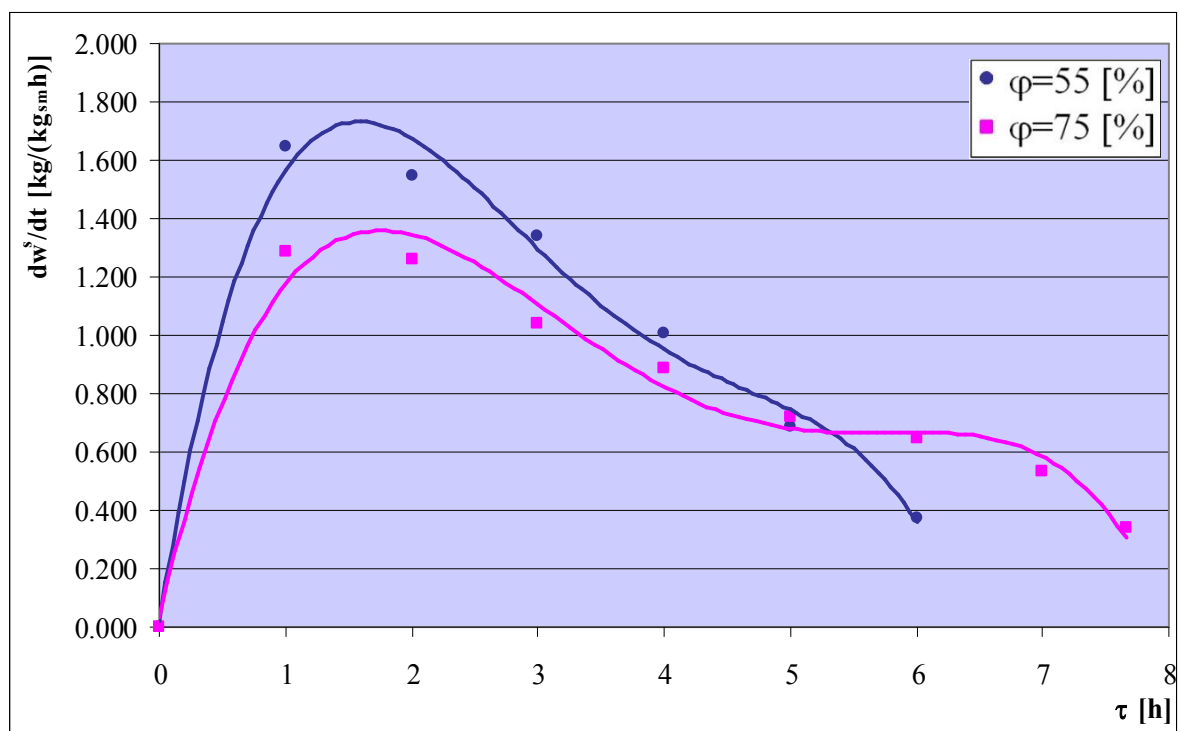
Tabela 25: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha
 $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 55\%$

τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	273	0,035	1,65
2	252	0,057	1,55
3	223	0,094	1,34
4	167	0,149	1,01
5	113	0,217	0,684
6	62	0,235	0,376

Tabela 26: Rezultati za krivu brzine sušenja pri parametrima vazduha
 $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{m/s}$, $\varphi = 75\%$

τ [h]	$\Delta M_m / \Delta \tau$ [g/h]	$\Delta SM / \Delta \tau$ [kg/(kgh)]	$\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/(kg _{sm} h)]
0	0	0	0
1	210	0,026	1,29
2	210	0,038	1,26
3	170	0,049	1,04
4	150	0,067	0,89
5	120	0,09	0,72
6	105	0,14	0,65
7	88	0,22	0,535
7,66	56	0,238	0,34

Na slici 72 dat je grafički prikaz zavisnosti brzine sušenja od vremena ispitivane sorte jabuke pri relativnim vlažnostima vazduha 55% i 75%, na bazi n parova vrednosti $\Delta w^s / \Delta \tau$ i τ .



Slika 72: Krive brzine sušenja $\Delta w^s / \Delta \tau$ [kg/kg_{sm}h] ispitivane sorte jabuke pri relativnoj vlažnosti vazduha od 55% i 75%

Krive brzine sušenja aproksimirane su, primenom jednostavne krivolinijske regresije, polinomom četvrtog stepena. Pri relativnoj vlažnosti vazduha od 55%, empirijska jednačina zavisnosti brzine sušenja od vremena glasi:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2(\tau) = -0,0175\tau^4 + 0,2618\tau^3 - 1,3792\tau^2 + 2,6778\tau + 0,0205 \quad (129)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9858$

Brzina sušenja pri višoj relativnoj vlažnosti od 75%, manja je i menja se prema jednačini četvrtog stepena, zavisno od vremena:

$$\frac{dw^s}{d\tau} = f_2'(\tau) = -0,0079\tau^4 + 0,1403\tau^3 - 0,8498\tau^2 + 1,8557\tau + 0,036 \quad (130)$$

uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9754$

Veća maksimalna brzina sušenja ostvaruje se pri nižim relativnim vlažnostima. Maksimalna brzina sušenja je oko 1,28 puta veća pri relativnoj vlažnosti od 55% u odnosu na

relativnu vlažnost od 75%. Ukoliko je manja relativna vlažnost vazduha veća je pokretačka sila za proces prenosa materije. Brzina kojom će se materijal sušiti znatno zavisi od brzine kojom se odvija taj proces.

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja, određene su jednačine kinetike sušenja jabuke, sorte „crveni delišes“, modeli jednostavne regresije - polinomne linije n-tog reda, i to:

- jednačine krivih sušenja, pri različitim režimima, u obliku $w^s = f_1(\tau)$
- jednačine krivih brzine sušenja, pri različitim režimima, u obliku $\frac{dw^s}{d\tau} = f_2(\tau)$

Jednačine kinetike sušenja definišu karakter odvijanja procesa sušenja pri definisanom režimu sušenja. Njihovo poznavanje omogućava da se u svakom trenutku odredi srednja vlažnost, srednja brzine sušenja vlažnog materijala, zatim količina isparele vlage, dovedena količina toplote i vreme sušenja.

Rezultati prikazanog vlastitog istraživanja kinetike sušenja pokazali su da brzina sušenja i dinamika gubljenja vode zavise od temperature, relativne vlažnosti i brzine vazdušne struje. Veće brzine odnosno kraća vremena trajanja procesa sušenja postižu se pri višim temperaturama, nižim relativnim vlažnostima i većim brzinama strujanja vazduha.

Do sličnih konstatacija došli su drugi istraživači analizirajući kinetiku sušenja voća na osnovu rezultata eksperimenata, što je prikazano u pod poglavlju 2.2.

5.2. RAZVOJ I PROVERA MODELA VIŠESTRUKRE REGRESIJE

Nakon uspešno okončanih eksperimenata pristupilo se obradi rezultata. Prikupljene statističke podatke („sirove“, neobrađene) dobijene merenjem na laboratorijskom postrojenju (opisanom u prethodnom poglavlju) treba podvrgnuti statističkoj analizi a zatim interpretaciji rezultata provedene analize u svrhu ostvarivanja postavljenih istraživačkih ciljeva.

Razvoj modela je pri modeliranju obično najjednostavniji korak jer se možemo služiti standardnim rešenjima ili standardnim matematičkim aparatom primenom računara i softverskih paketa, to ne znači da samo matematičko rešenje mora biti jednostavno. Provera modela obavlja se poređenjem sa stvarnim sistemom. Budući da se radi o slučajnim procesima, jedine metode poređenja su one koje nudi statistička analiza.

Podaci dobijeni istraživanjem su obrađeni deskriptivnim i komparativnim statističkim procedurama. Njihovo matematičko procesuiranje realizovano je na PC računaru Pentijum 4 uz upotrebu softverskog paketa CoREMED (Choice of Regression Equation of Multifactor

Experiment Design with and without Repeating) (P. Dašić, 2010) koji stoji na raspolaganju na Visokoj tehničkoj mašinskoj školi u Testeniku.

Realizacija eksperimenta i analiza eksperimentalnih podataka izvedeni su na osnovu metodologije odziva površine (response surface methodology - RSM), uz korišćenje planiranja eksperimenata (Design of experiments – DOE) (L.B. Barrentine, 1999; G.E.P. Box i sar., 2005; J.N. Cawse, 2013; A.M. Dean i D. Voss, 2001; A.B. Eldin, 2011; K.-T. Fang, R. Li i A. Sudjianto, 2005; V.V. Fedorov i P. Hackl, 1997; J.J. Flaig, 2006; C.R. Hicks i K.V. Turner, 1999; K. Hinkelmann i O. Kempthorne, 2008; P.W.M. John, 1998; J. Kiefer i J. Wolfowitz, 1959; J.P.C. Kleijnen, 2008; R.L. Mason, 2003; R. Mead, 1990; R. Mead i sar., 2012; G.K. Robinson, 2000) u ovom slučaju potpuni faktorni plan (Full factors design – FFD).

Programski paket CoREMED namenjen je relativno jednostavnom rešavanju vrlo složenih problema statističke obrade podataka. Prikupljene podatke i parametre potrebne za analizu programski paket primenom odgovarajuće statističke i inženjerske makro funkcije prevodi u rezultate (informacije) date u izlaznoj tabeli. Program osim izlaznih tabela generiše i grafikone. Tablice s rezultatima i grafikoni ostavljeni su u obliku u kojem ih daje taj program. To je učinjeno s namerom da se mogućim korisnicima tog programa što bolje objasne izlazni rezultati. Za izbor faktora modela primenjena je metoda selekcije i rangiranja faktora na bazi totalnog efekta u modelu (Dašić, 2013).

Za analizu adekvatnosti matematičkog modela primenjena je statistička metoda analize varijanse (ANOVA) (J. Lee i A.I. Khuri, 2001; D.C. Montgomery, 2012), kojom je ispitan efekat više nezavisnih promenljivih na jednu zavisnu promenljivu. ANOVA je tehnika za procenu parametara modela kada su nezavisne varijable nominalne. Nezavisno promenljive su uticajni faktori i one su varirane na više nivoa, a njihov efekat se odražava na vrednost zavisno promenljive. U navedenom istraživanju primenjena je trofaktorska analiza varijance (ispituje se uticaj tri faktora od kojih svaki ima više nivoa na jednu zavisnu varijablu).

Programi u određenim koracima složenih statističkih i inženjerskih analiza mogu da uštede trud i vreme.

Rezultati merenja – dužine trajanja procesa i hemijske analize kvaliteta sušenih proizvoda obrađeni su pomoću navedenog programskog paketa. Iz statističke analize izmerenih podataka u svih 10 tačaka eksperimenta dobijen je odgovarajući model – stepena regresiona jednačina 3-faktornog potpunog plana eksperimenta.

5.2.1. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA OPISIVANJE UTICAJA PROCESNIH PARAMETARA NA VREME TRAJANJA PROCESA SUŠENJA

U toku ispitivanja praćeno je vreme trajanja procesa Y_I u [h] u zavisnosti od temperature vazduha t u [°C], brzine strujanja v u [m/s] i relativne vlažnosti vazduha φ u [%] u uslovima koji su dati u okviru uslova ispitivanja. Ispitivanja su sprovedena u Laboratoriji za procesnu tehniku na Visokoj tehničkoj mašinskoj školi strukovnih studija u Trsteniku. Izmerene vrednosti vremena trajanja procesa Y_I u [h] za različite kombinacije t , v i φ kod potpunog trofaktornog plana eksperimenta prikazane su u tabeli 27.

Tabela 27: Plan matrica potpunog trofaktornog eksperimenta i izmerene vrednosti vremena trajanja procesa Y_I u [h]

Red. br.	Kodirane vrednosti				Prirodne vrednosti			Izmerene vrednosti	
	x_0	x_1	x_2	x_3	t	v	φ	Y_{1j}	$y_{1j} = \ln Y_{1j}$
1.	+1	+1	+1	+1	60	2	75	7,66	2,03601198
2.	+1	+1	+1	-1	60	2	55	6,00	1,79175947
3.	+1	+1	-1	+1	60	1	75	8,20	2,10413415
4.	+1	+1	-1	-1	60	1	55	6,50	1,87180218
5.	+1	-1	+1	+1	40	2	75	16,00	2,77258872
6.	+1	-1	+1	-1	40	2	55	10,33	2,33505228
7.	+1	-1	-1	+1	40	1	75	16,80	2,82137889
8.	+1	-1	-1	-1	40	1	55	12,00	2,48490665
9.	+1	0	0	0	49	1,4	64	9,50	2,25129180
10.	+1	0	0	0	49	1,4	64	9,80	2,28238239

Statističkom obradom rezultata dobijenih praćenjem vremena trajanja procesa sušenja, programskim paketom CoREMED – modul ANOVA, pristupilo se izradi matematičkog modela za opisivanje uticaja parametara sušenja na vreme trajanja procesa, odnosno modela kojim će se moći zavisno od ulaznih procesnih parametara predvideti vreme trajanja procesa. Dakle, osnovu modela čini utvrđivanje hijerarhije značajnosti uticajnih faktora na vreme trajanja procesa, tj. dati odgovor na pitanje koji od predočenih faktora i njihovih interakcija ima najveći uticaj na vreme trajanja procesa. Ta hijerarhija određiće se višestrukoum regresijskom analizom.

Prema jednačini (111) slobodni član polinoma b_0 izračunava se na osnovu podataka iz tabele 27:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{0j} \cdot y_{1j} = 2,27513$$

Prema jednačini (112) koeficijenti linijskih efekata faktora b_i ($i=1,2,3$) izračunavaju se na osnovu podataka iz tabele 27:

$$b_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot y_{1j} = -0,3263$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} \cdot y_{1j} = -0,0434$$

$$b_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{3j} \cdot y_{1j} = 0,1563$$

Prema jednačini (113) koeficijenti dvofaktornog međudejstva b_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3$) izračunavaju se na osnovu podataka iz tabele 27:

$$b_{12} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot x_{2j} \cdot y_{1j} = 0,0063$$

$$b_{13} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot x_{3j} \cdot y_{1j} = -0,0372$$

$$b_{23} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} \cdot x_{3j} \cdot y_{1j} = 0,0141$$

Uključujući jedan po jedan faktor, redosledno po rang, odn. značajnosti, iz skupa od $2^k-1=7$ regresionih jednačina izdvaja se $(k+m)=(3+3)=6$ različitih regresionih jednačina za vreme trajanja procesa $Y_I=f(t, v, \varphi)$, bez i sa međudejstvom faktora. Na osnovu izračunatih parametara regresije b_0, b_i i b_{ij} i na osnovu razlika koeficijenata determinacije (R^2) za svaku novo-uključenu regresionu jednačinu može se, prema metodologiji datoj u radovima (P. Dašić, 1987, 2001, 2003 i 2013), izračunati procentualni udeo svih parametara regresije b_i i b_{ij} u [%] (tabela 28).

Tabela 28: Tabelarni prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_I=f(t, v, \varphi)$

No.	Faktori reg. b_0, b_i, b_{ij}	Rang fakt.	SS	$F_{\text{rač}}$	Značaj an	Koef.det R^2	Koef.k. R	TE faktora	Procenat b_i, b_{ij} [%]
1.	$b_0 = 2,27513$	-	51,76220			-	-	-	-
2.	$b_1 = -0,3263$	1	0,85166	3154,30	Znač	0,79091	0,88933	0,79091	79,091
3.	$b_2 = -0,0434$	3	0,01503	55,67	Znač	0,98642	0,99319	0,01396	1,396
4.	$b_3 = 0,1563$	2	0,19550	724,07	Znač	0,97246	0,98613	0,18155	18,155
5.	$b_{12} = 0,0063$	6	0,00032	1,19	Nezn	0,99847	0,9992	0,00030	0,030
6.	$b_{13} = -0,0372$	4	0,01106	40,96	Znač	0,99669	0,99834	0,01027	1,027
7.	$b_{23} = 0,0141$	5	0,00160	5,93	Nezn	0,99817	0,99909	0,00148	0,148
8.	Greška (ostatak varijacije)					-	-	0,00153	0,153

Provedeni su pojedinačni testovi o značajnosti regresorskih varijabli u modelu.

Statističko testiranje provedeno je na nivou značajnosti 99% ($p=0,01$ – nivo signifikantnosti)

Testiranje hipoteza o značajnosti regresorskih varijabli u modelu provodi se F- testom. Odluka se donosi poređenjem računске vrednosti sa tabličnom za nivo signifikantnosti α i broj stepeni slobode (1, n-(k+1)). Ako je empirijski F-odnos veći od tablične vrednosti, H_0 se ne prihvata tj. ne prihvata se pretpostavka da je regresorska varijabla suvišna u modelu. Za broj stepeni slobode 1 u brojiocu i 3 u imeniocu, i za usvojeni nivo značajnosti $\alpha=1\%$ biće tablična vrednost $F_t = 34,1$ pa prema uslovu signifikantnosti $F_{rač} > F_t$, sledi da su koeficijenti b_1 , b_2 , b_3 i b_{13} signifikantni - faktori x_1 , x_2 , x_3 i interakcija x_{13} utiču na rezultate vremena trajanja procesa. Od istraživanih varijabli u regresijskom modelu, kao statistički značajne pokazale su se sledeće nezavisne varijable: temperatura vazduha, relativna vlažnost, brzina strujanja i međudelovanje temperature i relativne vlažnosti.

Ocenjeni regresijski koeficijenti ispred nezavisnih varijabli pokazuju kako se menja vreme trajanja procesa za promenu nezavisne varijable za jedinicu mere, a da pri tome ne dolazi do promene ostalih varijabli.

Na osnovu tabele 28 i slika 73 i 74 može se zaključiti da daleko najveći uticaj na funkciju vremena trajanja procesa (y_1) ima faktor x_1 (čak 79,091 %), pa zatim faktor x_3 (18,155 %), faktor x_2 (1,396 %) itd. U ovom slučaju uticaj međudejstva faktora x_1x_3 (1,027 %), x_2x_3 (0,148 %) i x_1x_2 (0,030 %) je neznatan (ukupno iznosi 1,205 %), pa se zbog toga ovi faktori mogu isključiti iz modela. Ostatak varijacije ili greška modela za matematički model sa linijskim efektima faktora iznosi 1,358 %, a za matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvima faktora iznosi 0,153 %. Bez obzira što je b_{13} po F testu značajan, zbog niskog procentualnog učešća (1,027%) proglašava se suvišnim u modelu. Tako se za funkciju vremena trajanja procesa (y_1) može, sa dovoljnom tačnošću, izabrati matematički model sa linijskim efektima faktora.

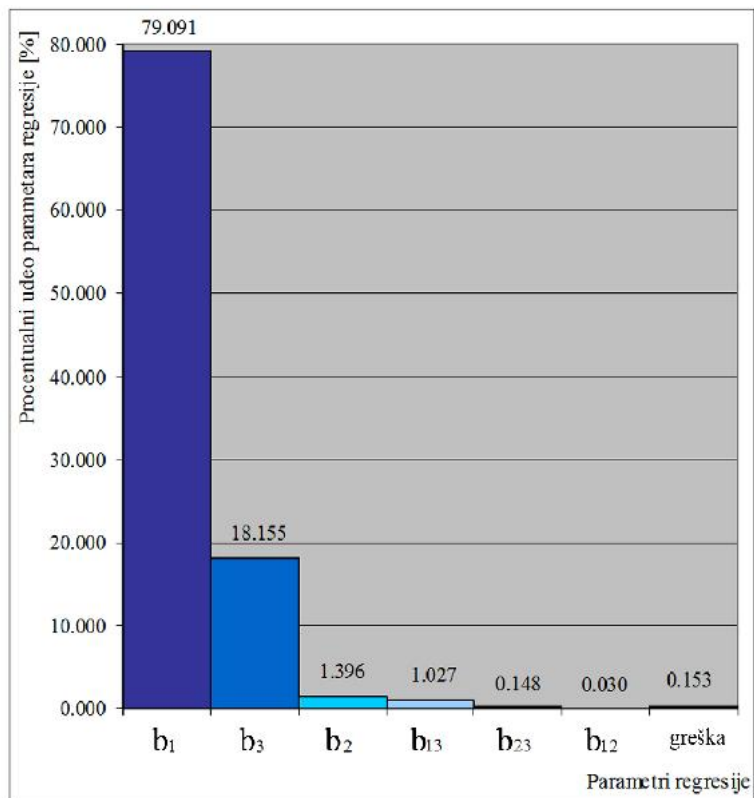
Na osnovu izračunatih vrednosti slobodnog člana polinoma b_0 i linijskih efekata faktora b_i ($i=1,2,3$), korišćenjem programa u višestrukoj regresijskoj analizi izrađen je regresijski model s procenjenim parametrima za vreme trajanja procesa, opisan sledećom jednačinom:

$$\hat{y}_1 = 2,27513 - 0,3263 \cdot x_1 - 0,0434 \cdot x_2 + 0,1563 \cdot x_3 \quad (131)$$

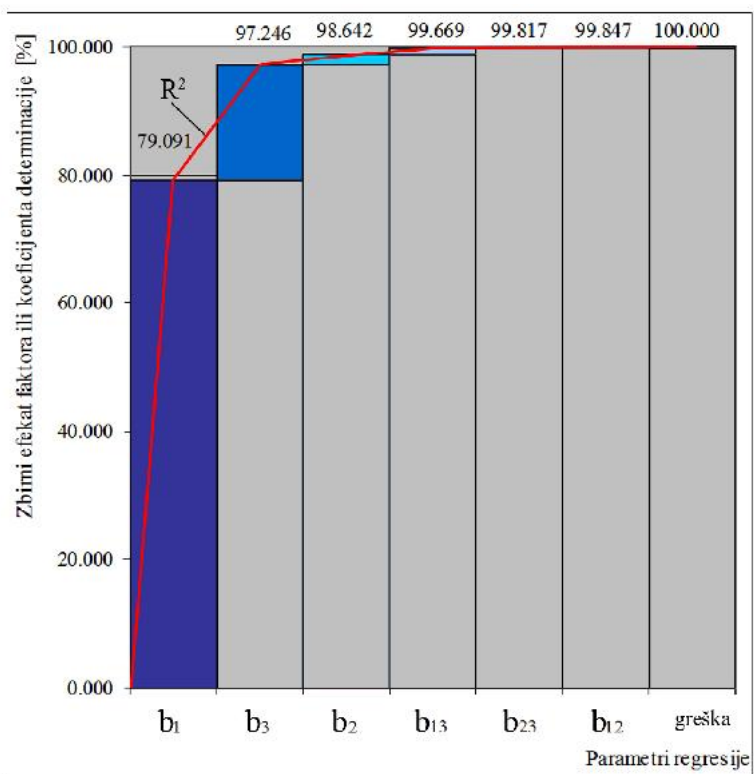
pri čemu je:

- x_1 - kodirana vrednost temperature vazduha
- x_2 - kodirana vrednost brzine strujanja vazduha
- x_3 - kodirana vrednost relativne vlažnosti vazduha

Na slici 73 dat je grafički prikaz relativnog procentualnog učešća svakog faktora na vrednost zavisno promenljive $y_1=f(t, v, \varphi)$ u obliku histograma, a na slici 74 u obliku poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2).



Slika 73: Grafički prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_I=f(t, v, \varphi)$



Slika 74: Grafički prikaz poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2) funkcije vremena trajanja procesa $y_I=f(t, v, \varphi)$

Na osnovu podataka iz jednačina (114) i (115) može se odrediti slobodan član regresionih jednačina:

$$\alpha = \exp(b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot a_i) = \exp(b_0 + b_1 \cdot a_1 + b_2 \cdot a_2 + b_3 \cdot a_3) = \exp(4,385761535) = 80,29935$$

Na osnovu podataka iz jednačina (114) i (116) mogu se odrediti parametri dekodiranog modela sa linijskim efektima faktora β_i ($i=1,2,3$) putem jednačine:

$$\beta_1 = A_1 \cdot b_1 = -1,60940$$

$$\beta_2 = A_2 \cdot b_2 = -0,12509$$

$$\beta_3 = A_3 \cdot b_3 = 1,00804$$

Jednačina regresije u prirodnim koordinatama bez međudejstava, odn. matematička zavisnost trajanja procesa Y_I od temperature vazduha t u [°C], brzine strujanja v u [m/s] i relativne vlažnosti vazduha φ u [%] može se opisati jednačinom:

$$\hat{Y}_I = 80,29935 t^{-1,60940} \cdot v^{-0,12509} \cdot \varphi^{1,00804} = 80,29935 \frac{\varphi^{1,00804}}{t^{1,60940} \cdot v^{0,12509}} \quad (132)$$

Koeficijent korelacije višestruke regresione analize, prema jednačini (90), vremena trajanja procesa bez međudejstava iznosi:

$$R = 0,98613$$

Visoka vrednost koeficijenta R znači da skup nezavisnih varijabli značajno objašnjava zavisnu varijablu, odnosno tačnije su procene vremena trajanja procesa što je R bliže jedinici. Kompletna analiza varijanse (ANOVA) za matematički model sa linijskim efektima faktora i za matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvima faktora prikazana je u tabeli 29.

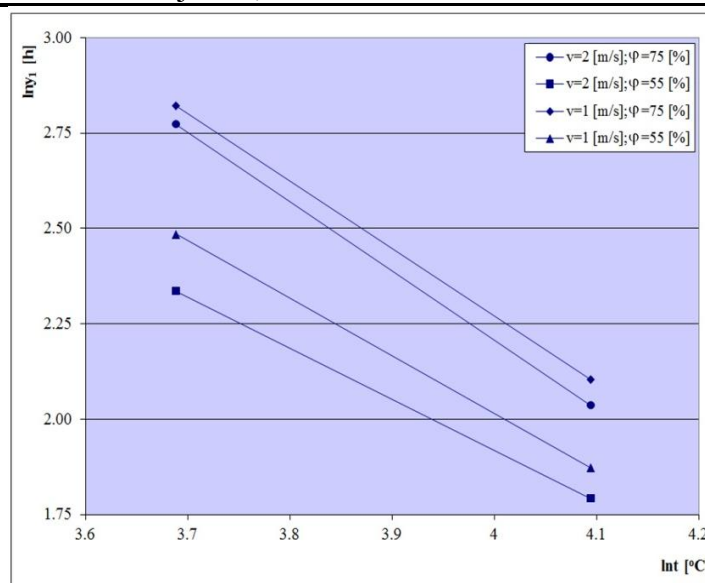
Iz tabele 29 može se zaključiti da je razlika statističkih pokazatelja (R , R^2 , $\text{adj}R^2$, MSE, RMSE, MAD, MAPE, MaxAPE) za ove dve jednačine neznatna, pa je opravdano prethodno usvojen matematički model sa linijskim efektima faktora (jednačina 131).

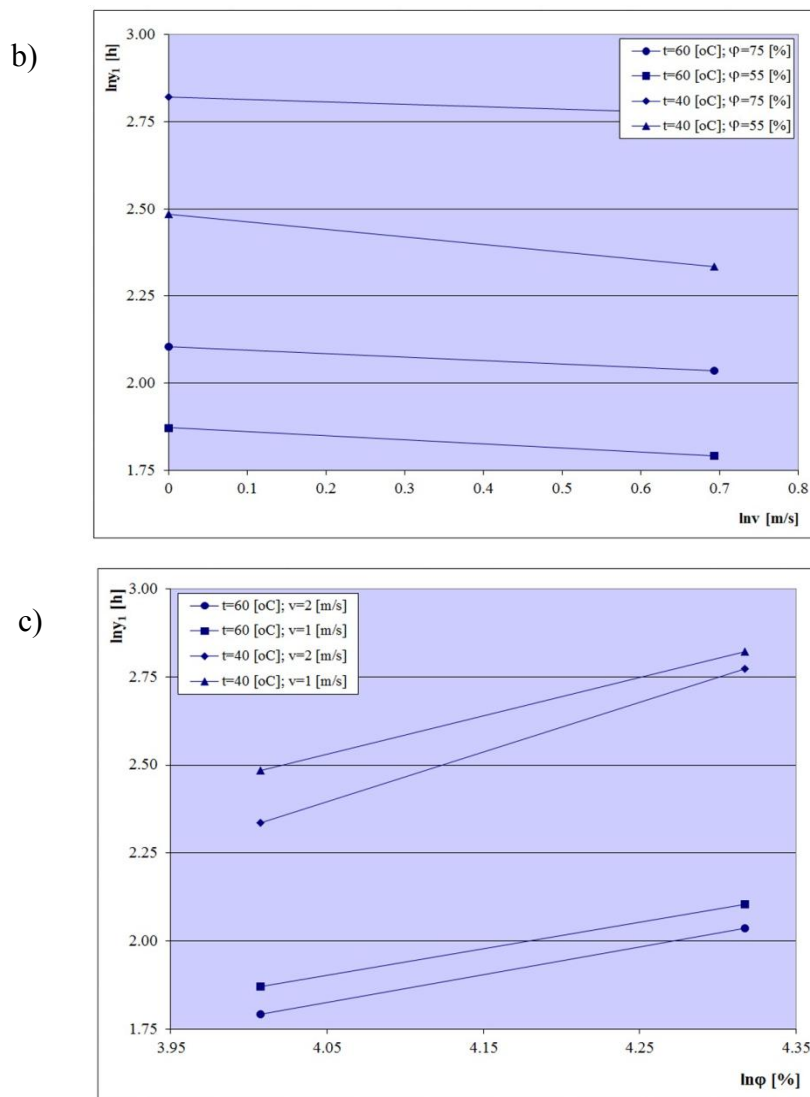
Tabela 29: Analiza varijanse (ANOVA) za funkciju vremena trajanja procesa

$$y_l = f(t, v, \varphi)$$

Izvor varijacije	DF	SS	MS	F _{rač}	Procenat [%]
Glavni uticaji	3	1,06219	0,35406	1311,33	98,642
t	1	0,85166	0,85166	3154,30	79,091
v	1	0,01503	0,01503	55,67	1,396
φ	1	0,19550	0,19550	724,07	18,155
Model	6	1,06219	0,17770	655,67	98,642
Greška	3	0,01462	0,00487		1,358
MSE=0,00146		MAPE=1,48664 %		MaxAPE=2,85564 %	
RMSE=0,03824		R=0,98613		R ² =0,97246	
MAD=0,03285		adjR ² =0,97963			
Dvostruke int.	3	0,01298	0,00433	16,03	1,205
t*v	1	0,00032	0,00032	1,19	0,030
t*φ	1	0,01106	0,01106	40,96	1,027
v*φ	1	0,00160	0,00160	5,93	0,148
Model	3	1,07517	0,35839	1327,37	99,847
Greška	6	0,00164	0,00027		0,153
Ukupno	10	1,07681			100
MSE=0,00016		MAPE=0,12023 %		MaxAPE=1,05891 %	
RMSE=0,01284		R=0,99909		R ² =0,99817	
MAD=0,01202		adjR ² =0,99451			

a)





Slika 75: Grafički prikaz uticaja faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

Na slici 75 prikazane su eksperimentalne tačke efekata faktora t, v i φ i njihov trend na vreme trajanja procesa y_1 :

- sa slike 75a može se uočiti da temperatura (t) značajno i negativno utiče na vreme trajanja procesa y_1 ,
- sa slike 75b može se uočiti da brzina strujanja (v) neznatno i negativno utiče na vreme trajanja procesa y_1 ,
- a sa slike 75c može se uočiti da relativna vlažnost (φ) značajno i pozitivno utiče na vreme trajanja procesa.

5.2.2. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA OPISIVANJE UTICAJA PROCESNIH PARAMETARA NA SADRŽAJ UKUPNIH KISELINA

Nakon ispitivanja meren je sadržaj ukupnih kiselina Y_2 u [%] u zavisnosti od temperature vazduha t u [°C], brzine strujanja v u [m/s] i relativne vlažnosti vazduha φ u [%] u uslovima koji su dati u okviru uslova ispitivanja. Ispitivanja su sprovedena u Laboratoriji za procesnu tehniku na Visokoj mašinskoj tehničkoj školi strukovnih studija u Trsteniku. Izmerene vrednosti sadržaja ukupnih kiselina Y_2 u [%] za različite kombinacije t , v i φ kod potpunog trofaktornog plana eksperimenta prikazane su u tabeli 30. Podaci o sadržaju ukupnih kiselina osušenih uzoraka jabuke „crveni delišes“ dobijeni su iz laboratorije Zavoda za javno zdravlje iz Kruševca (Poglavlje 8.2. Prilog 2).

Tabela 30: Plan matrica potpunog trofaktornog eksperimenta i izmerene vrednosti sadržaja ukupnih kiselina Y_2 u [%]

Red. br.	Kodirane vrednosti				Prirodne vrednosti			Izmerene vrednosti	
	x_0	x_1	x_2	x_3	t	v	φ	Y_{2j}	$y_{2j} = \ln Y_{2j}$
1.	+1	+1	+1	+1	60	2	75	1,09	0,08617770
2.	+1	+1	+1	-1	60	2	55	0,84	-0,17435339
3.	+1	+1	-1	+1	60	1	75	1,06	0,05826891
4.	+1	+1	-1	-1	60	1	55	0,96	-0,04082199
5.	+1	-1	+1	+1	40	2	75	0,68	-0,38566248
6.	+1	-1	+1	-1	40	2	55	0,54	-0,61618614
7.	+1	-1	-1	+1	40	1	75	1,15	0,13976194
8.	+1	-1	-1	-1	40	1	55	0,90	-0,10536052
9.	+1	0	0	0	49	1,4	64	0,96	-0,04082199
10.	+1	0	0	0	49	1,4	64	0,94	-0,06187540

Statističkom obradom rezultata dobijenih merenjem sadržaja ukupnih kiselina programskim paketom CoREMED – modul ANOVA, pristupilo se izradi matematičkog modela za opisivanje uticaja parametara sušenja nasadržaj ukupnih kiselina, odnosno modela kojim će se moći zavisno od ulaznih procesnih parametara predvideti sadržaj kiselina. Dakle, osnovu modela čini utvrđivanje hijerarhije značajnosti uticajnih faktora na sadržaj ukupnih kiselina tj. dati odgovor na pitanje koji od predloženih faktora i njihovih interakcija ima najveći uticaj na sadržaj kiselina. Ta hijerarhija određiće se multiplom regresijskom analizom.

Prema jednačini (111) slobodni član polinoma b_0 izračunava se na osnovu jednačine:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_{0j} \cdot y_{2j} = -0,11409$$

Koeficijenti linijskih efekata faktora b_i ($i=1,2,3$) izračunavaju se na osnovu jednačina (112) i podataka iz tabele 30:

$$b_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot y_{2j} = 0,1121$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} \cdot y_{2j} = -0,1427$$

$$b_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{3j} \cdot y_{2j} = 0,1044$$

Prema jednačini (113) koeficijenti dvofaktornog međudejstva b_{ij} ($i=1,2,3$; $j=1,2,3$) izračunavaju se na osnovu podataka iz tabele 30:

$$b_{12} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot x_{2j} \cdot y_{2j} = 0,1163$$

$$b_{13} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} \cdot x_{3j} \cdot y_{2j} = -0,0145$$

$$b_{23} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} \cdot x_{3j} \cdot y_{2j} = 0,0184$$

Uključujući jedan po jedan faktor, redosledno po rang, odn. značajnosti, iz skupa od $2^k - 1 = 7$ regresionih jednačina izdvaja se $(k+m) = (3+3) = 6$ različitih regresionih jednačina za sadržaj ukupnih kiselina y_2 , bez i sa međudejstvom faktora. Na osnovu izračunatih parametara regresije b_0 , b_i i b_{ij} i na osnovu razlika koeficijena determinacije (R^2) za svaku novo-uključenu regresionu jednačinu može se, prema metodologiji datoj u radovima (P. Dašić, 1987, 2001, 2003 i 2013), izračunati procentualni udeo svih parametara regresije b_i i b_{ij} u [%] (tabela 31).

Tabela 31: Tabelarni prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju sadržaja ukupnih kiselina y_2

No.	Faktori reg. b_0, b_i, b_{ij}	Rang fakt.	SS	$F_{\text{rač}}$	Značaj an	Koef.det R^2	Koef.k. R	TE faktora	Procentat b_i, b_{ij} [%]
1.	$b_0 = -0,11409$	-	0,13016			-	-	-	-
2.	$b_1 = -0,1121$	3	0,10051	43,323	Znač	0,77891	0,88256	0,21060	21,060
3.	$b_2 = -0,1427$	1	0,16298	70,250	Znač	0,34149	0,58437	0,34149	34,149
4.	$b_3 = 0,1044$	4	0,08721	37,591	Znač	0,96163	0,98063	0,18272	18,272
5.	$b_{12} = 0,1163$	2	0,10826	46,664	Znač	0,56831	0,75386	0,22682	22,682
6.	$b_{13} = -0,0145$	6	0,00168	0,724	Nezn	0,96728	0,98350	0,00353	0,353
7.	$b_{23} = 0,0184$	5	0,00270	1,164	Nezn	0,97080	0,98529	0,00565	0,565
8.	Greška (ostatak varijacije)					-	-	0,02920	2,920

Provedeni su pojedinačni testovi o značajnosti regresorskih varijabli u modelu. Statističko testiranje provedeno je na nivou značajnosti 99% ($p=0,01$ – nivo signifikantnosti)

Za broj stepene slobode 1 u brojiocu i 3 u imeniocu, i za usvojeni nivo značajnosti $\alpha=1\%$, biće tablična vrednost $F_t=34,1$ pa prema uslovu signifikantnosti $F_{rac} > F_t$ sledi da su koeficijenti b_2 , b_{12} , b_1 i b_3 signifikantni - faktori x_2 , x_1 , x_3 i interakcija x_{12} utiču na rezultate sadržaja ukupnih kiselina u suvom proizvodu. Od istraživanih varijabli u regresijskom modelu, kao statistički značajne (po rangu) pokazale su se sledeće nezavisne varijable: brzina strujanja vazduha, međudelovanje temperature i brzine strujanja, temperatura vazduha i relativna vlažnost vazduha.

Na osnovu tabele 31 i slika 76 i 77 može se zaključiti da daleko najveći uticaj na funkciju sadržaja ukupnih kiselina (y_2) ima faktor x_2 (34,149 %), pa zatim faktor međudejstva x_1x_2 (22,682%), faktor x_1 (21,060 %), faktor x_3 (18,272 %) itd. U ovom slučaju uticaj ostala dva međudejstva faktora x_2x_3 (0,565 %) i x_1x_3 (0,353 %) je neznatan (ukupno iznosi 0,918 %), pa se zbog toga ovi faktori mogu isključiti iz modela. Ostatak varijacije ili greška modela za matematički model sa linijskim efektima faktora iznosi 26,519 %, a za matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvima faktora iznosi 2,920 %.

Tako se za funkciju sadržaja ukupnih kiselina (y_2) može, sa dovoljnom tačnošću, izabrati matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvom faktora x_1x_2 .

Na osnovu izračunatih vrednosti slobodnog člana polinoma b_0 , linijskih efekata faktora b_i ($i=1,2,3$) i međudejstva b_{12} , matematički model u kodiranom obliku za sadržaj ukupnih kiselina:

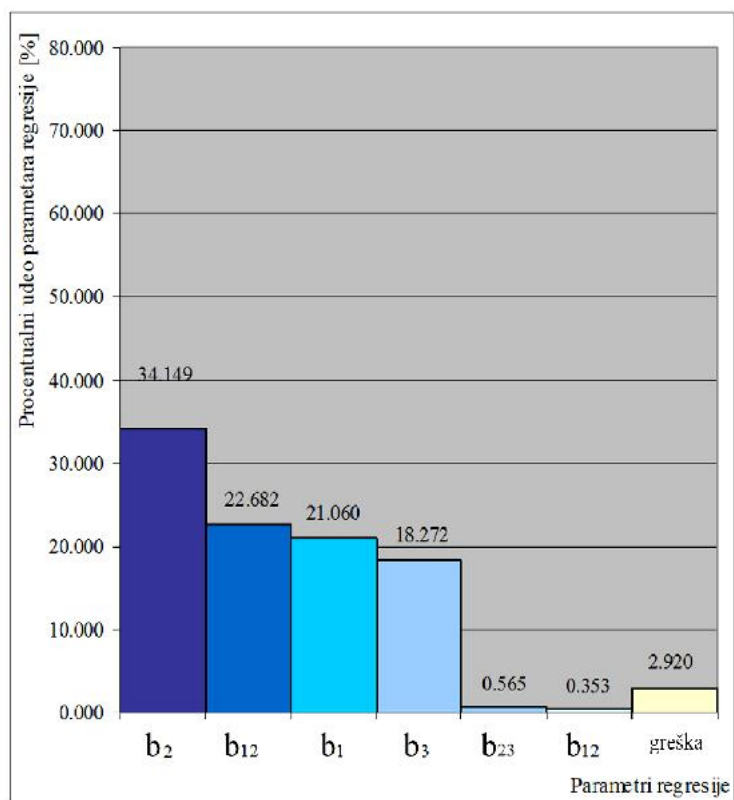
$$\hat{y}_2 = -0,11409 - 0,1121 \cdot x_1 - 0,1427 \cdot x_2 + 0,1044 \cdot x_3 + 0,1163 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (133)$$

pri čemu je: x_1 - kodirana vrednost temperature vazduha

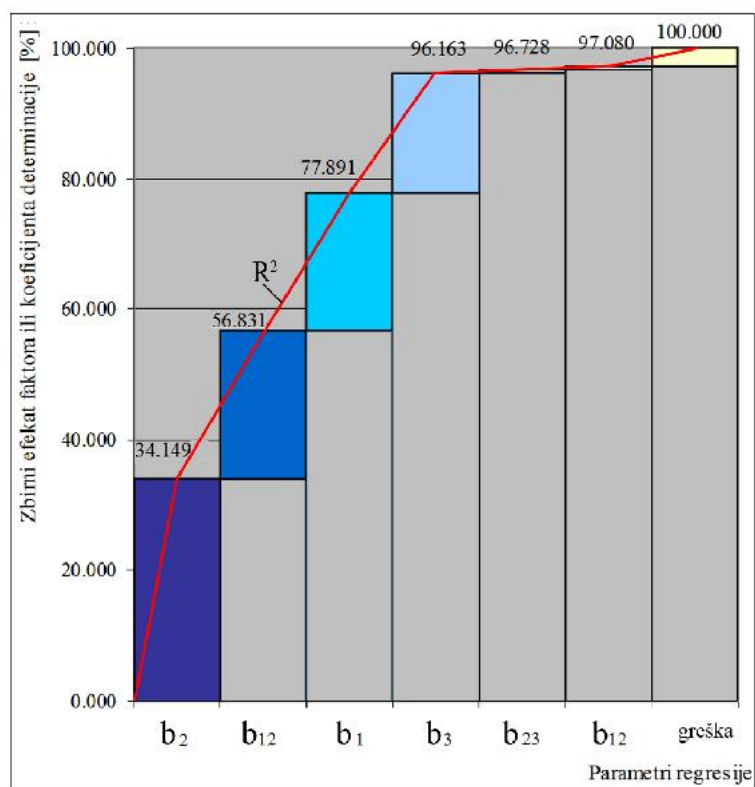
x_2 - kodirana vrednost brzine strujanja vazduha

x_3 - kodirana vrednost relativne vlažnosti vazduha

Na slici 76 dat je grafički prikaz relativnog procentualnog učešća svakog faktora na vrednost zavisno promenljive $y_2=f(t, v, \varphi)$ u obliku histograma, a na slici 77 u obliku poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2).



Slika 76: Grafički prikaz rangiranja i selekcije faktora na funkciju sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$



Slika 77: Grafički prikaz poligona zbirnog efekta faktora ili koeficijenta determinacije (R^2) funkcije sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$

Na osnovu podataka jednačina (114) i (115) može se odrediti slobodan član regresionih jednačina:

$$\alpha = \exp(b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot a_i + b_{12} \cdot a_1 a_2) = \exp(b_0 + b_1 \cdot a_1 + b_2 \cdot a_2 + b_3 \cdot a_3 + b_{12} \cdot a_1 a_2) = \exp(8,15843524) = 0,000286$$

Na osnovu podataka jednačina (114), (116) i (117) mogu se odrediti parametri dekodiranog modela sa linijskim efektima faktora β_i ($i=1,2,3$) i parametar dvofaktornog međudejstva β_{12} putem jednačina:

$$\beta_1 = A_1 \cdot (b_1 + b_{12} \cdot a_2) = 0,02091$$

$$\beta_2 = A_2 \cdot (b_2 + b_{12} \cdot a_1) = 6,85497$$

$$\beta_3 = A_3 \cdot b_3 = 0,67327$$

$$\beta_{12} = A_1 \cdot A_2 \cdot b_{12} = 1,65564$$

Jednačina regresije u prirodnim koordinatama linijskim efektima i međudejstvom β_{12} , odn. matematička zavisnost sadržaja ukupnih kiselina Y_2 od temperature vazduha t u [°C], brzine strujanja v u [m/s] i relativne vlažnosti vazduha φ u [%], može se opisati jednačinom:

$$\hat{Y}_2 = 0,000286 \cdot t^{0,02091} \cdot v^{6,85497} \cdot \varphi^{0,67327} \cdot e^{1,65564 \ln t \cdot \ln v} \quad (134)$$

Koeficijent korelacije, prema jednačini (90), za izabranu regresionu jednačinu sa linijskim efektima faktora i međudejstvom β_{12} iznosi: $R = 0,98063$.

Kompletna analiza varijanse (ANOVA) prikazana je u tabeli 32.

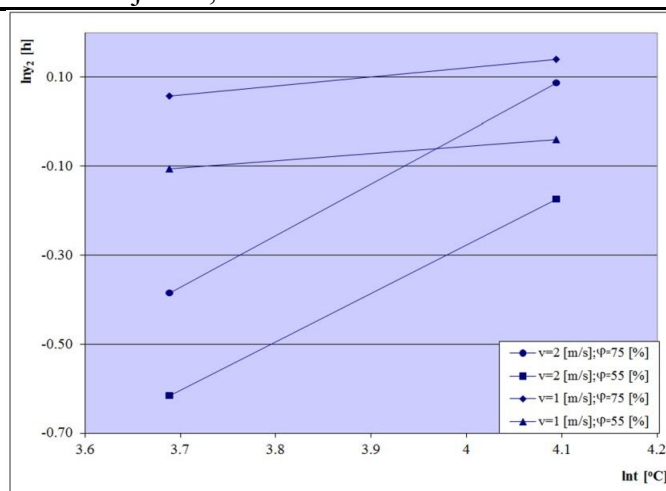
Kompletna analiza varijanse (ANOVA) za matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvom faktora $x_1 x_2$ i za matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvima faktora prikazana je u tabeli 32.

Iz tabele 32. može se zaključiti da postoji razlika statističkih pokazatelja (R , R^2 , $\text{adj}R^2$, MSE , RMSE , MAD , MAPE , MaxAPE) za ove tri jednačine, pa je opravdan prethodno usvojen matematički model sa linijskim efektima faktora i međudejstvom faktora $x_1 x_2$ (jednačina 133).

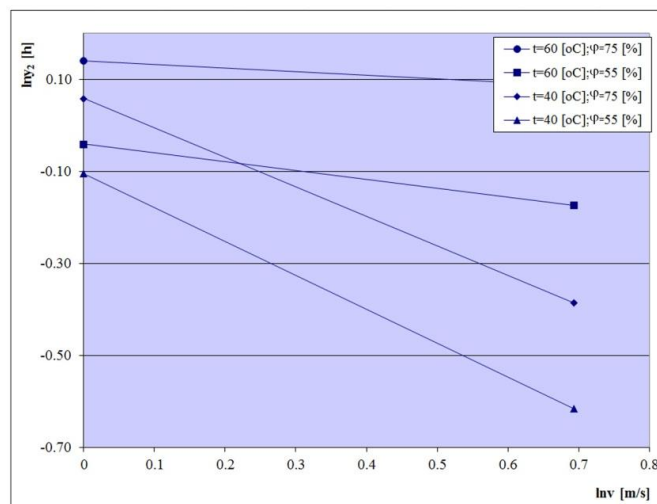
Tabela 32: Analiza varijanse (ANOVA) za funkciju sadržaja ukupnih kiselina $y_2=f(t, v, \varphi)$

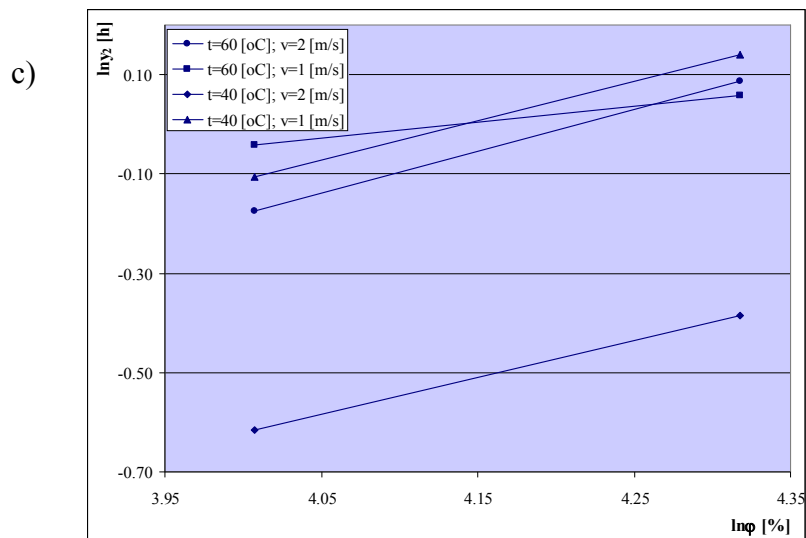
Izvor varijacije	DF	SS	MS	F _{rač}	Procenat [%]
Glavni uticaji	3	0,35071	0,11690	50,388	73,481
t	1	0,10051	0,10051	43,323	34,149
v	1	0,16298	0,16298	70,250	21,060
φ	1	0,08721	0,08721	37,591	18,272
Model	6	0,35071	0,05845	25,194	73,481
Greška	3	0,12657	0,04219		26,519
MSE=0,00142		MAPE=2,7500 %		MaxAPE=4,5500 %	
RMSE=0,03768		R=0,98063		R ² =0,96163	
MAD=0,03105		adjR ² =0,88489			
Dvostruke int.	3	0,11264	0,03755	16,185	23,600
t*v	1	0,10826	0,10826	46,664	22,682
t* φ	1	0,00168	0,00168	0,724	0,353
v* φ	1	0,00270	0,00270	1,164	0,565
Model	3	0,46334	0,15445	66,573	97,080
Greška	6	0,01394	0,00232		2,920
Ukupno	10	0,47728			100
MSE=0,00139		MAPE=0,25500 %		MaxAPE=1,2700 %	
RMSE=0,03733		R=0,98529		R ² =0,97080	
MAD=0,03015		adjR ² =0,91240			

a)



b)





Slika 78: Grafički prikaz uticaja faktora na funkciju vremena trajanja procesa $y_1=f(t, v, \varphi)$

Na slici 78 prikazane su eksperimentalne tačke efekata faktora t , v i φ i njihov trend na sadržaj ukupnih kiselina y_2 :

- sa slike 78a može se uočiti da temperatura (t) značajno i pozitivno utiče na sadržaj ukupnih kiselina y_2 ,
- sa slike 78b može se uočiti da brzina strujanja (v) značajno i negativno utiče na sadržaj ukupnih kiselina y_2 ,
- a sa slike 78c može se uočiti da relativna vlažnost vazduha (φ) značajno i pozitivno utiče na sadržaj ukupnih kiselina y_2 .

Empirijske jednačine (matematički modeli), dobijene na osnovu eksperimentalnih istraživanja imaju dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, tj. najpogodnije definišu karakter odvijanja procesa sušenja.

Rezultati celokupnog istraživanja potvrđuju mogućnost konzervisanja jabuke sorte „crveni delišes” (rezane na kolutove) sušenjem u kondenzacionoj sušari sa zadovoljavajućim kvalitetom koji je funkcija režima sušenja, te se može zaključiti da plodovi jabuke konzervisani sušenjem mogu postati značajan proizvod naše prerađivačke industrije.

6. ZAKLJUČAK

Doktorska disertacija „Istraživanje novih modela simulacije procesa konzerviranja voća sušenjem“ sadrži teorijska razmatranja i eksperimentalna istraživanja vezana za metodu konvektivno-kondenzacionog sušenja. Eksperimentalna istraživanja izvršena su u laboratorijskim uslovima na postrojenu vlastite konstrukcije. Na bazi pregleda literature, postavljenih ciljeva – hipoteza, provedenog istraživanja uticaja parametara procesa na merena svojstva sušenih proizvoda, primenjene odgovarajuće statističke procedure i provedene rasprave dobijeni su rezultati na osnovu kojih se mogu izvesti sledeći zaključci:

- Sušenje je tehnološki proces od posebnog značaja u prehrambenoj industriji,
- Još uvek je izazov u preradi hrane iako je prisutno od davnina,
- Dehidratacija u velikoj meri utiče na teksturu, boju kao i gubitak lako isparljivih komponentata, koje najčešće određuju i kvalitet i prehrambenu vrednost voća, te je veoma važan pravilan izbor opreme i pravilno određivanje uslova sušenja,
- Konvektivno-kondenzacijska sušara, služi za dobijanje suvih proizvoda vrhunskog kvaliteta, jer je temperatura sušenja programirana na 40-60⁰C, energetski je sigurna i prihvatljiva za okolinu. Kontinuirano koristi toplotu kondenzacije pa je što se tiče energetske efikasnosti povoljnija od klasične sušare, utrošak energije za kilogram osušenog voća je 3-5 puta manji,
- Ugrađena toplotna pumpa u konstrukciju sušare koristi se za odvlaživanje vazduha i za rekuperaciju toplote. Ovom se metodom ostvaruje ušteda energije i do 60%, poboljšava kvalitet sušenog proizvoda, a proces je povoljniji i sa ekološkog aspekta,
- Konvektivno sušena jabuka u kondenzacionoj sušari može da pruži zadovoljavajući kvalitet, a on se može značajno poboljšati promenom različitih uticajnih veličina (temperature, brzine strujanja i relativne vlažnosti vazduha)
- Složenosti procesa sušenja (istovremeni prenos toplote i mase koji je praćen i promenama faze), mnogobrojnost i kompleksnost faktora (kontrolisanih i nekontrolisanih) koji utiču na proces sušenja kao i njihova međudejstva čine ovaj postupak konzerviranja hrane izuzetno složenim i teškim za proučavanje što otežava njegovu teorijsku analizu (modeliranje). Iz navedenih razloga istraživanja se zasnivaju na eksperimentalnim rezultatima, a dobijeni parametri matematičkih modela odnose na tačno određeni materijal i za eksperimentalni prostor određen graničnim vrednostima ulaznih parametara,

- Podaci dobijeni istraživanjem, obrađeni su statističkim procedurama, matematički su procesuirani na PC računaru uz upotrebu programa CoREMED i dobijeni su regresijski modeli koji služe za razvoj i poboljšanje procesa, (jedn. 132 i 134).
- Istraživanje je pokazalo da se princip identifikacije procesa sušenja primenom regresione analize može uspešno primeniti kod određivanja funkcija cilja (stanja) na osnovu koje se mogu odrediti optimalni procesni parametri. U cilju potvrđivanja postavljenih hipoteza proveden je eksperiment konvektivno-kondenzacionog sušenja. Tretmani su sprovedeni prema potpunom 2^k faktornom planu. Varirani su procesni parametri (temperatura, brzina strujanja vazduha i relativna vlažnost), pa je za sve kombinacije navedenih parametara određenim planom eksperimenta meren sadržaj ukupnih kiselina, ukupnih šećera i dužina trajanja procesa – multipla regresiona analiza. Sušenje kao metod konzerviranja ne utiče statistički značajno na smanjenje ukupnih šećera, kod ispitivane sorte jabuke. U sušenim plodovima sorte „crveni delišes“ gubitak ukupnih kiselina iznosi 4,16 do 55%, vreme trajanja procesa varira od 6 do 16,8 h zavisno od uslova eksperimenta. Dakle postoji veza između kvaliteta sušenog proizvoda i utroška energije od uslova sušenja,
- Za neke tretmane iz plana eksperimenta, kinetika sušenja je prikazana grafički i aproksimirana matematičkim modelom – jednostavna regresiona analiza.

Na osnovu eksperimentalnih podataka sa laboratorijskog postrojenja postavljen je simulacijski model procesa sušenja primenom programskog paketa CoREMED.

Na osnovu rezultata istraživanja planiranog jednofaktornog eksperimenta može se zaključiti:

- Na kinetiku sušenja pored geometrijskih i fizičkih svojstava materijala utiču uslovi sušenja. Veća brzina sušenja ostvaruje se pri višim temperaturama, nižim relativnim vlažnostima i većoj brzini strujanja vazduha. Povećanje temperature i smanjenje relativne vlažnosti vazduha su presudni faktori na promenu sadržaja vlage tokom vremena (krivu sušenja), odnosno smanjenje vremena sušenja, dok je uticaj promene brzine strujanja manje značajan.
- Obradom rezultata istraživanja dobijeni su grafički prikazi krivih sušenja (slike 67, 69 i 71). Krive sušenja aproksimirane su modelima jednostavne krivolinijske regresije, oblika $w^s = f_1(\tau)$ – polinomi drugog reda (jedn. 119, 120, 123, 124, 127 i 128). Može se uočiti da je veza između ta dva elementa (w^s, τ) , u svim uzorcima

jabuke vrlo značajna, obzirom na vrlo visoke vrednosti koeficijenta determinacije (R^2).

- Na osnovu izmernenih i izračunatih podataka i tabelarno prikazanih dobijeni su grafički prikazi krivih brzine sušenja (slike 68, 70 i 72). Krive brzine sušenja aproksimirane su modelima jednostavne krivolinijske regresije, oblika $\frac{dw^s}{d\tau} = f_2(\tau)$ - polinomi četvrtog reda (jedn. 121, 122, 125, 126, 129 i 130). Može se uočiti da je veza između ta dva elementa ($\Delta w^s / \Delta \tau, \tau$) u svim uzorcima jabuke značajna, obzirom na visoke vrednosti koeficijenta determinacije (R^2) veće od 0,9.
- Obradom rezultata istraživanja, dobivene polinomne jednačine i grafikoni, definišu kinetiku sušenja kolutova jabuke, pri različitim: temperaturama, brzinama strujanja i relativnim vlažnostima agensa sušenja (vazduha). Na osnovu ove činjenice potvrđuje se hipoteza H1.

Na osnovu rezultata istraživanja planiranog višefaktornog eksperimenta može se zaključiti:

- Promenom potpunog faktornog plana eksperimenta i statističkom obradom podataka razvijeni su regresioni modeli za procenu vrednosti sadržaja ukupnih kiselina i vremena trajanja procesa u zavisnosti od tri numerička faktora (temperatura vazduha, brzina strujanja i relativna vlažnost vazduha)
- Modeli su jednostavni obzirom na složenost procesa (više-komponentni sistem-čvrsta faza kompleksne strukture i vlage), (jedn. 132 i 134)
- Osnovnim-nezavisnim varijablama prezentiranim u ovom istraživanju zaista se mogu opisati promene zavisne varijable i to s koeficijentom determinacije (R^2) većim od 98% (opisano više od 98% kvadrata odstupanja)

Regresionom i korelacionom analizom ustanovljen je:

- Jak uticaj procesnih parametara na vreme trajanja procesa ($R^2 = 0,9864$)
- Vreme trajanja procesa, kao parametar kvaliteta procesa, u negativnoj jakoj korelaciji je sa temperaturom vazduha, a u pozitivnoj sa relativnom vlažnošću vazduha, dak se brzina strujanja u intervalu 1-2 m/s može i isključiti iz modela (slaba negativna korelacija)
- Jak uticaj procesnih parametara ispitivane sorte jabuke na sadržaj ukupnih kiselina ($R^2 = 0.96163$). Najveći uticaj na sadržaj ukupnih kiselina ima brzina strujanja vazduha, zatim interakcija temperature i brzine strujanja vazduha, pa temperatura vazduha, a najmanji ali značajan uticaj relativna vlažnost vazduh.

- Na sadržaj ukupnih šećera nema uticaja ni jedan od promatranih parametara, jer variranje u vrdnostima sadržaja ukupnih šećera ispitivane sorte jabuke, statistički nije značajno zavisno od uslova sušenja, što pokazuju rezultati hemijskih analiza suvih plodova.
- Koeficijenti determinacije izrađenih modela pokazuju da su modeli za izračunavanje vremena trajanja procesa i sadržaja ukupnih kiselina izražene kao jabučna vrlo kvalitetni i da dobro predstavljaju stvarnost.
- Visoke vrednosti koeficijenta korelacije pokazuju da su razlike između proračunatih i izmerenih vrednosti veoma male. Poređenjem modelom predviđenih vrednosti i eksperimentalno dobijenih rezultata u slučaju svih posmatranih odziva poklapanje rezultata je veće od 95% čime je dokazana valjanost predloženih modela za opisivanje procesa sušenja. Na osnovu definisanih regresionih modela i istraživanja njihovog kvaliteta, potvrđuje se hipoteza H2 i H3.
- Metode planiranja eksperimenta i njihova statistička obrada značajno ubrzavaju i poboljšavaju proces istraživanja i dovode do pouzdanih zaključaka, pa zato zaslužuju veću primenu u prehrambenoj industriji.
- Osušeni plodovi po svojim senzornim karakteristikama malo se razlikuju od svežih.

U radu je dat nov pristup u proučavanju tehnologije sušenja kao doprinos razvoju prehrambenog inženjerstva i zaštiti okoline. Kako bi se očuvao kvalitet, potrebno je unaprediti tradicionalne postojeće i istražiti primene novih tehnologija za prehrambenu industriju. Specifičnost prehrambene industrije proizilazi iz složenih svojstava polaznih sirovina, proizvodi prehrambene industrije trebaju imati ne samo prikladna fizička i hemijska, nego i biološka svojstva, a moraju zadovoljiti i stroge organoleptičke zahteve. Održavanje visoke higijene industrijskih pogona, automatsko vođenje procesa, odvijanje procesa na različitim temperaturama i sezonski karakter pojedinih preradbenih procesa takođe su specifičnosti prehrambene industrije.

Rezultati istraživanja i iskustva dobijena i prezentirana ovim radom proširuju saznanje o uticaju procesnih parametara na kvalitet proizvoda, definišu faktore koji bitno utiču na kvalitet sušenog proizvoda i proširuju dosadašnja saznanja u području procene parametara kvaliteta sušenih proizvoda. Mogu se kvalitetno primeniti na proces sušenja ispitivane sorte jabuke za predviđanje (prognozu) nivoa zavisnih varijabli. Prognostička vrednost izračunava se uvrštenjem pretpostavljenih vrednosti nezavisnih varijabli u regresijsku jednačinu. Na bazi

ovih istraživanja omogućuje se razvoj, projektovanje, dimenzionisanje, vođenje procesa i izbor uređaja u kojima će se proces industrijski voditi na ekonomičan način.

Na osnovu provedenog istraživanja i dobivenih rezultata dalja istraživanja treba usmeriti na unapređenje procesa sušenja:

- uopštavanje izrađenih modela,
- implementacija matematičkih modela u računarsku simulaciju procene rezultata procesa sušenja,
- potpuno optimizirati kombinacije procesnih parametara, tj. odrediti kombinaciju vrednosti varijabli koje će najbolje ispunjavati cilj,
- određivanje parametara sušenja kojima je moguće dobiti istovremeno što bolje vrednosti svih (ispitivanih) parametara kvaliteta (određivanje globalnog optimuma)
- istraživanje uticaja različitih predtretmana (ultrazvuka) i agensa sušenja (azot, ugljen dioksid) koje će dati pozitivne učinke na: kvalitet osušenog proizvoda, skraćanje vremena sušenja i smanjenje troškova.

Istraživanja u ovoj disertaciji mogu poslužiti kao izvor informacija i ideja za dalji razvoj ove neistražene i vrlo aktuelne teme u prehrambenom inženjerstvu.

Obrada teme „**Istraživanje novih modela simulacije procesa konzerviranja voća sušenjem**“ omogućila je autoru disertacije potpunije, opsežnije i dublje upoznavanje s problematikom naučnog područja kojim se bavi.

7. LITERATURA

- [1] Anderson, M.J. and Whitcomb, P.J. (2005): *RSM simplified: Optimizing processes using response surface methods for design of experiments*. New York (New York – USA): Productivity Press, – 292 pp. ISBN 978-1-56327-297-4.
- [2] Antonijević, D. & Voronjec, D. (1992): Kretanje vlaga unutar materijala tokom procesa sušenja sa konduktivnim dovođenjem toplote. *Procesna tehnika*, Vol. 8, br. 2-3, str. 318-321. ISSN 0352-678X.
- [3] Babić, Lj. (2010): Poglavlje 3 / Predavanje 7: Sušenje i skladištenje biomaterijala. U: *Tehnologija poljoprivrednih proizvoda*. Novi Sad: Poljoprivredni fakultet, str. 1-26.
- [4] Babić, Lj & Babić, M. (2012): *Sušenje i skladištenje*. Novi Sad: Poljoprivredni fakultet, – 306 str. ISBN 978-86-7520-235-6.
- [5] Babić, Lj., Babić, M., Sabo, A. (1996): Komparativna analiza kinetičkih krivih sušenja jabuka. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 22, No. 4, str. 185-236.
- [6] Babić, Lj. & Šerbula S. (1991): Sušenje kajsija. U: *Zborniku radova Međunarodnog savetovanja tehnologa sušenja i skladištenja*, Tuheljske Toplice.
- [7] Barrentine, L.B. (1999): *An introduction to design of experiments: A simplified approach*. Milwaukee (Wisconsin – USA): American Society for Quality (ASQ) Press,-114 pp. ISBN 978-0-87389-444-9.
- [8] Bijedić, M. & Delalić, S. (2004): *Termodinamika i termotehnika*. Tešanj: Planjax, – 404 str. ISBN 9958-734-88-5.
- [9] Blagojević, Z.; Tolmač, D. & Prvulović, S. (2010): Rezultati ispitivanja konvektivnog sušenja skroba. *Tehnika – Mašinstvo*, Vol. 59, br. 2, str. 1-4. ISSN 0461-2531.
- [10] Bogner, M. & Vasiljević, B. (1986): Osnovi teorije i tehnike sušenja. *Procesna tehnika*, Vol. 2, br. 2-4, str. 77-85, 69-78, 65-72. ISSN 0352-678X.
- [11] Bogner, M. & Vasiljević, B. (1987): Osnovi teorije i tehnike sušenja. *Procesna tehnika*, Vol. 3, br. 1-2, str. 75-90, 67-71. ISSN 0352-678X.
- [12] Bogner, M. (redaktor) (2004): *Termotehničar*. Tom 2: *Priručnik za termotehniku, termoenergetiku i procesnu tehniku*. Vrnjačka Banja: Interklima-grafika & Beograd: Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), 2004. – 856 str. ISBN 86-82685-05-1.
- [13] Box; G.E.P. and Draper, N.R. (1959): A basis for the selection of a response surface design. *Journal of the American Statistical Association (JASA)*, Vol. 54, No. 287, pp. 622-654. ISSN 0162-1459.
- [14] Box, G.E.P.; Hunter, J.S. and Hunter, W.G. (2005): *Statistics for experimenters: Design, innovation and discovery*. 2nd Edition, Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 2005. – 664 pp. ISBN 978-0-471-71813-0.
- [15] Box, G.E.P. and Wilson, K.B. (1951): On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-45. ISSN 0035-9246.
- [16] Božikov, J. (2003): Modeliranje i simulacija [Modelling and simulation]. U: J. Kern urednica. *Medicinsko-informatičke metode*. Priručnik. Zagreb: Medicinska naklada, str. 85-108.
- [17] Brkić, M, Babić, Lj., Sabo, A. (1998): Kinetika sušenja višnje u šaržnoj sušari „SETTING“. *Časopis "Letopis naučnih radova"*, br. 1-2, str. 92-100.
- [18] Brkić, M. & Janić, T. (2006): Sušenje povrća u tunelskim sušarama biomasom na malom gazdinstvu. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 32, br. 1-2, str. 71-78. ISSN 0350-2953.

- [19] Brkić, M. & Somer, D. (1996): Analiza strujnog i temperaturnog polja u šaržnoj sušari za testenine. U Monografiji: "Žito-Hleb '96", *Proizvodnja i prerada žita i brašna (domaći potencijal-svetski kvalitet)*. Novi Sad: Tehnološki fakultet, Zavod za tehnologiju žita i brašna, 1996, str. 253-263.
- [20] Brkić, M. & Somer, D. (2007): Energetska efikasnost dvo-prolaznih sušara. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 33, br. 3-4, str. 227-233. ISSN 0350-2953.
- [21] Brkić, M.; Somer, D. & Đukić, Đ. (2006): Energetska efikasnost sušenja zrna kukuruza na različitim konstrukcijama sušara. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 32, br. 3-4, str. 184-194. ISSN 0350-2953.
- [22] Burić, O. & Beki, F. (1978): *Suška plodov i ovošej*. Moskva: Pišćevaja promišljenost.
- [23] Cawse, J.N. (2013): Chapter 9 – Experimental design for combinatorial experiments. In: *Informatics for Materials Science and Engineering: Data-Driven Discovery for Accelerated Experimentation and Application*. Edited by Krishna Rajan. Oxford (United Kingdom): Elsevier Inc., 2013, pp. 189–217. ISBN 978-0-12-394399-6.
- [24] Cengel, Y.A. (2002): *Heat transfer – A practical approach*. 2nd Edition. Hightstown (New Jersey – USA): McGraw-Hill Inc. – 896 pp. ISBN 978-0-07-245893-0.
- [25] Composada, J. (1999): *Sorption Isotherms and Water Diffusivity in Muscels of Pork Ham at Different NaCl Contents*. Ph.D. Thesis. Monells (Girona): Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
- [26] Dašić, P. (1987): Analiza izbora varijante matematičkog modela u oblasti ispitivanja obradljivosti metala rezanjem (in Serbian). U: *zborniku radova 21. Savjetovanja proizvodnog strojarstva Jugoslavije*, knjiga I; Opatija, Hrvatska; 6-7. oktobar 1987. Rijeka: Tehnički fakultet, 1987, str. 137-146.
- [27] Dašić, P. (2001): Research of processed surface roughness for turning hardened steel by means of ceramic cutting tools. In: *Proceedings of the 2nd World Tribology Congress (WTC-2001)*, Vienna, Austria, 3-7 september 2001. Edited by Friedrich Franek, Wilfried J. Bartz and Andreas Pauschitz. Vienna: Österreichische Tribologische Gesellschaft – The Austrian Tribology Society (ÖTG), 2001, Article no. M-51-29-055: pp. 1-6. ISBN 978-3-901657-09-2.
- [28] Dašić, P. (2003): The choice of regression equation in fields metalworking. In: *Proceedings of the 3rd International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" (RaDMI-2003)*, Herceg Novi, Serbia and Montenegro, 19-23 September 2003. Trstenik: High Technical Mechanical School; Kruševac: Institute IMK "14. October" and Podgorica: Institute of Faculty of Mechanical Engineering, 2003, pp. 147-158. ISBN 86-83803-06-6.
- [29] Dašić, P. (2006): Analysis of wear cutting tools by complex power-exponential function for finishing turning of hardened steel 20CrMo5 by mixed ceramic tools. *The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle VIII: Tribology*, Vol. 12, pp. 54-60. ISSN 1221-4590.
- [30] Dašić, P. (2010): Software package CoREMED: Choice of Regression Equation of Multifactor Experiment Design with and without Repeating (*Softverski paket za izbor regresione jednačine višefaktornih planiranih eksperimenata sa i bez ponavljanja*). ver. 3.0. Vrnjačka Banja.
- [31] Dašić, P. (2011): Approximation of cutting tool wear function using polynomial regression equation. *Journal of Research and Development in Mechanical Industry (RaDMI)*, Vol. 3, Issue 3, pp. 171-180. ISSN 1821-3103.
- [32] Dašić, P. (2013): Comparative analysis of different regression models of the surface roughness in finishing turning of hardened steel with mixed ceramic cutting tools. *Journal of Research and Development in Mechanical Industry (RaDMI)*, Vol. 5, Issue 2, pp. 101-180. ISSN 1821-3103.

- [33] Dašić, P. & Petropoulos, G. (2002): Regresiona zavisnost parametara hrapavosti obrađene površine pri obradi struganjem reznim alatom od tvrdog metala [Dependence regression of the processed surface roughness parameters for turning of cutting tools made of coated carbides] (in Serbian). *IMK-14 Istraživanje i razvoj*, God. 8, br. 14-15 / 1-2/2002, str. 93-98. ISSN 0354-6829.
- [34] Dean, A.M. and Voss, D. (2001): *Design and analysis of experiments*. New York (New York – USA): Springer-Verlag New York Inc., 2001. – 741 pp. ISBN 978-0-387-98561-9.
- [35] Dobričević, N. (1997): Sušenje jabuka Idared rezane u kockice. U: *Zbornik radova XIII Međunarodno savetovanje tehnologa sušenja i skladištenja*, Stubičke Toplice, str. 85-97.
- [36] Dobričević, N.; Voća, S.; Pliestić, S. & Magdić, D. (2008): Utjecaj sorte jabuke na kvalitetu suhog proizvoda. *Pomologia Croatica*, Vol. 14, br. 1, str. 27-36.
- [37] Downing, D.J.; Gardner, R.H. and Hoffman, F.O. (1985): An examination of response-surface methodologies for uncertainty analysis in assessment models. *Technometrics*, Vol. 27, Issue 2, pp. 151-163. ISSN 0040-1706.
- [38] Dragović-Uzelac, V. (2008): Sirovine za prehrambenu industriju. *Voće i povrće*.
- [39] Draper, N.R. and Lin, D.K.J. (1990): Small response-surface designs. *Technometrics*, Vol. 32, Issue 2, pp. 187-194. ISSN 0040-1706.
- [40] Eldin, A.B. (2011): Chapter 2: General introduction to design of experiments (DOE). In: *Wide Spectra of Quality Control*. Edited by Isin Akyar. Rijeka (Croatia): InTech Europe, 2011, pp. 21-26. ISBN 978-953-307-683-6.
- [41] Ertekin, C, Yaldiz, O. (2004): Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering*, Vol. 63, pp. 349-359.
- [42] Fang, K.-T.; Li, R. and Sudjianto, A. (2005): *Design and modeling for computer experiments*. London (United Kingdom): Chapman and Hall / CRC Press, 2005. – 304 pp. ISBN 978-1-58488-546-7.
- [43] Fedorov V.V. and Hackl P. (1997): *Model-oriented design of experiments*. New York (New York – USA): Springer-Verlag New York Inc., 1997. – 132 pp. ISBN 978-0-387-98215-1.
- [44] Fisher, R.A. (1915): Frequency distribution of the values of the correlation coefficient in samples from an indefinitely large population. *Biometrika*, Vol. 10, Issue 4, pp. 507–521. ISSN 0006-3444.
- [45] Fisher, R.A. (1935): *The design of experiments*. Oxford (England): Oliver and Boyd Ltd., 1935. – 251 pp.
- [46] Flaig, J.J. (2006): A new classification of variables in design of experiments. *Quality Technology & Quantitative Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 103-110. ISSN 1684-3703.
- [47] Ginzburg, S.A. (1973): *Osnovi teoriji i tehniki suški piščevih produktov*. Moskva: Piščevaja promyšlennost.
- [48] Glasnović, A. (2007): *Prijenos tvari i energije*. Skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije.
- [49] Gordon, G. (1969): *System simulation*. Englewood Cliffs (New Jersey – USA): Prentice-Hall.
- [50] Hadživuković, S.; Zegnal R. & Čobanović K. (1982): *Regresiona analiza*. Beograd: Privredni pregled, 1982. – 262 str. COBISS.SR-ID 34204679.
- [51] Herceg, Z.; Režek Jambrak, A.; Rimac Brnčić, S. & Krešić, G. (2009): *Procesi konzerviranja hrane: Novi postupci*. Zagreb: Golden marketing – Tehnička knjiga, 2009. – 150 str. ISBN 978-953-212-371-5.

- [52] Hicks, C.R. and Turner, K.V. (1999): *Fundamental concepts in the design of experiments*. 5th Edition. Oxford (England): Oxford University Press (OUP), 1999. – 565 pp. ISBN 978-0-19-512273-2.
- [53] Hill, A.G. (1967): Drying system and equipment, theory and calculations. *Chemical Engineering*, Vol. 19.
- [54] Hill, W.J. and Hunter, W.G. (1966): A review of response surface methodology: A literature survey. *Technometrics*, Vol. 8, Issue 4, pp. 571-590. ISSN 0040-1706.
- [55] Hinkelmann, K. and Kempthorne, O. (2008): *Design and analysis of experiments, Volume 1: Introduction to experimental design*. 2nd Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 2008. – 631 pp. ISBN 978-0-471-72756-9.
- [56] Ibrahim, H.M. and Elkhidir, E.E. (2011): Response surface method as an efficient tool for medium optimisation. *Trends in Applied Sciences Research*, Vol. 6, Issue 2, pp. 121-129. ISSN 1819-3579.
- [57] Ivančević, S. & Mitrović, D. (2012): Specifičnosti sušenja proizvoda liofilizacijom. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 38, br. 2 (2012), str. 97-108. ISSN 0350-2953.
- [58] Jambrak, A.R.; Lelas, V.; Herceg, Z.; Badanjak, M. & Werner, Z. (2010): Primjena ultrazvuka visoke snage u sušenju voća i povrća. *Kemija u Industriji*, Vol. 59, No. 4, str. 169-177. ISSN 0022-9830.
- [59] Janković, M.; Bukvić, B.; Stevanović, S. & Vukosavljević, P. (2006): New products raspberry obtained by lyophilisation. *Economics of Agriculture*, Vol. 53, No. 2, pp. 327-335. ISSN 0352-3462.
- [60] Janković, M.; Mašović, S.; Bukvić, B. & Vukosavljević, P. (2004): Conservation freeze-drying raspberries. *Yugoslav Pomology*, Vol. 38, No. 147-148 (3-4), pp. 199-207. ISSN 0350-2155.
- [61] Janković, M. & Stevanović, S. (2010): Lyophilization raspberry sorts Willamette and Meeker. In: *Proceedings of the 40th HVAC Congress*. Belgrade: Association of Mechanical and Electrical Engineers and Technicians of Serbia, pp 98-102.
- [62] Jemrić, T. (1996): Kvaliteta plodova trešanja (*Prunus avium L.*). *Pomologia Croatica*, Vol. 2, br. 1-4, str. 63-77. ISSN 1330-6626.
- [63] John, P.W.M. (1998): *Statistical design and analysis of experiments*. Philadelphia (Pennsylvania – USA): Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), – 355 pp. ISBN 978-0-89871-427-2.
- [64] Kandić, M. (1984): *Prerada životinjskih otpadaka sušenjem u cilju proizvodnje organskih đubriva*. Magistarski rad. Beograd: Tehnološko-metalurški fakultet.
- [65] Kandić, M., Mitrović, O., Gavrilović-Damjanović, J., Popović, B. (2007): Ispitivanje kinetike procesa sušenja šljiva. *Vocárstvo*, Vol. 41, No. 160, str. 179-186. ISSN 1820-5054.
- [66] Karić, M. & Đurović, B. (2011): Energetska analiza konvekcionalnog i kondenzacionog sušenja biomaterijala. *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 37, No. 4, str. 334-438. ISSN 0350-2953.
- [67] Karić, M. (2007): Optimizacija procesa sušenja recirkulacijom izlaznog vazduha. In: *Proceedings of 7th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" (RaDMI-2007)*, Belgrade, Serbia, 14-20. September 2007. Kruševac: Institute IMK "14. October" and Trstenik: High Technical Mechanical School, 2007. ISBN 978-86-83803-22-4.
- [68] Karić, M., Blagojević, R., Ivanović, P. (2009): Ekonomski efekti sušenja šljive u konvektivnim sušarama tunelskog tipa. *Revija agronomskih saznanja*.

- [69] Karić, M., Čajetinac, S. (2008): Increase of energetic efficiency of convective dehudration of fruit by graded dehydration. In: *Proceedings of 8th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" (RaDMI-2008)*, Užice, Serbia, 14-17 September 2008. Kruševac: Institute IMK "14. October"; Trstenik: High Technical Mechanical School and Užice: High Business Technical School, 2008. ISBN-13 978-86-83803-23-1.
- [70] Katalinić, V. (2006): *Kemija mediteranskog voća i tehnologija prerade*. Skripta. Split: Kemijsko tehnološki fakultet u Splitu, 2006. – 97 str.
- [71] Khuri, A.I. (editor) (2006): *Response surface methodology and related topics*. Farrer Road (Singapore): World Scientific Publishing Co., 2006. – 472 pp. ISBN 978-981-256-458-0.
- [72] Khuri, A.I. (2011): Response surface methodology. In: *International Encyclopedia of Statistical Science*, Part 18. Edited by Miodrag Lovrić. Berlin-Heidelberg (Germany): Springer-Verlag GmbH, 2011, pp. 1229-1231. ISBN 978-3-642-04897-5.
- [73] Kiefer, J. and Wolfowitz, J. (1959): Optimum designs in regression problems. *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 30, No. 2, pp. 271-294. ISSN 0003-4851.
- [74] Kleijnen, J.P.C. (2008): *Design and analysis of simulation experiments*. New York (New York – USA): Springer Science+Business Media LLC, 2008. – 218 pp. ISBN 978-0-387-71812-5.
- [75] Kosi, F.; Milenković, R.; Raičević, D.; Ercegović, Đ.; Vukić, Đ.; Živković, M. & Radojević, R. (1996): Eksperimentalno određivanje parametara sušenja biljnih materijala. *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 21, br. 1-2, str. 1-19. ISSN 0554-5587.
- [76] Kosi, F.; Raičević, D.; Ercegović, Đ.; Vukić, Đ.; Živković, M.; Radojević, R. & Milenković, R. (1995): Stanje istraživanja i razvoja tehničko-tehnološki sistema sušenja biljnih materijala. *Poljotehnika*, br. 5-6, str. 13-16.
- [77] Krička, T.; Sito, S.; Voća, N.; Barčić, J.; Jukić, Ž.; Voća, S.; Janušević, V. (2005): Differences in water release rate of hulled and hull-less pumpkin seed. *Die Bodenkultur*, Vol. 56, No. 3, pp. 153-159.
- [78] Krpan, J. (1965): *Sušenje i parenje drva*. Udžbenik. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet.
- [79] Kudra, T. and Mujumder, A. (2002): *Advanced drying technologies*. New York (New York – USA): Marcel Dekker Inc., - 472 pp. ISBN 978-0-8247-9618-1.
- [80] Kurtanjek, Z. (1998): Principial component ANN for modeling and control of Baker's Yeast Production. *Journal of Biotechnology*, 65, 23-35.
- [81] Lambaša Belak, Ž.; Gaćina, N. & Radić, T. (2005): *Tehnologija hrane*. Skripta, Šibenik: Visoka škola za turistički menadžment u Šibeniku, 2005. – 161 str.
- [82] Lee, J. and Khuri, A.I. (2001): Modeling the probability of a negative ANOVA estimate of a variance component. *Calcutta Statistical Association Bulletin*, Vol. 51, No. 2012-202, pp. 31-45. ISSN 0008-0683.
- [83] Lenth, R.V. (2009): Response-surface methods in R, using rsm. *Journal of Statistical Software*, Vol. 32, Issue 7, pp. 1-17. ISSN 1548-7660.
- [84] Liu, Q. and Baker-Arkema, F.W. (1999): Capacity estimation of high-temperature grain dryers – A simplified calculation method. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 1, Article no. 1037/1030: pp. 1-17. ISSN 1682-1130.
- [85] Lovrić, T. (2003): *Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva*. Zagreb: HINUS, 2003. – 318 str. ISBN 987-953-6904-25-9.
- [86] Lovrić, T. & Pižota, V. (1994): *Konzerviranje i prerada voća i povrća*. Zagreb: Nakladni zavod Globus, 1994. – 247 str. ISBN 978-953-167-026-5.

- [87] Lu, X.; Lin, D.K.J. and Zhou, D. (2009): On construction of two-stage response surface designs. *Quality Technology & Quantitative Management*, Vol. 6, No. 4, pp. 493-502. ISSN 1684-3703.
- [88] Luikov, A.V. (1963): Heat and mass transfer with transpiration cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, Issue 7, pp. 559-570. ISSN 0017-9310.
- [89] Marinković, V. (2007): Racionalizacija eksperimentalnih istraživanja primenom teorije višefaktornog eksperimenta. *IMK-14- Istraživanje i razvoj*, Vol. 13, br. 1-2, str. 23-36.
- [90] Mason, R.L.; Gunst, R.F. and Hess, J.L. (2003): *Statistical design and analysis of experiments: With applications to engineering and science*. 2nd Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 2003. – 760 pp. ISBN 978-0-471-37216-5.
- [91] Mašović, S.M.; Janković, M.A. & Radulović, E.P. (2000): Ispitivanje promena kvaliteta jabuka konzerviranih sušenjem, sušenjem – smržavanjem i liofilizacijom. *Acta periodica technologica*, Vol. 4, br. 31, str. 213-219. ISSN 1450-7188.
- [92] Milić, D.; Lukač-Bulatović, M. & Kukić, Đ. (2006): Mogućnosti proizvodnje sušenog voća u Srbiji. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi (PTEP)*, Vol. 10, br. 1-2, str. 23-25. ISSN 1450-5029.
- [93] Milić, D. & Radojević, V. (2003): *Proizvodno-ekonomska i upotrebna vrednost voća i grožđa*. Novi Sad: Autorsko izdanje.
- [94] Montgomery, D.C. (2012): *Design and analysis of experiments*. 8th Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., – 752 pp. ISBN 978-1-118-14692-7.
- [95] Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2006): *Applied statistics and probability for engineers*. 4th Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., – 768 pp. ISBN 978-0-470-06721-5.
- [96] Morris, M.D. (2000): A class of three-level experimental designs for response surface modeling. *Technometrics*, Vol. 42, Issue 2, pp. 111-121. ISSN 0040-1706.
- [97] Mujić, I. & Alibabić, V. (2005): *Tehnološki procesi konzerviranja hrane*. Bihać: Grafičar, – 476 str. ISBN 978-9958-781-05-6.
- [98] Müller, J. (1992): *Trocknung von Arzneipflanzen mit Solarenergie*. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- [99] Myers, R.H. (1999): Response surface methodology – Current status and future directions. *Journal of Quality Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 30-44. ISSN 0022-4065.
- [100] Myers, R.H.; Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M. (2009): *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. 3rd Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., – 704 pp. ISBN 978-0-470-17446-3.
- [101] Myers, R.H.; Montgomery, D.C.; Vining, G.G.; Borror, C.M. and Kowalski, S.M. (2004): Response surface methodology: A retrospective and literature review. *Journal of Quality Technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 53-77. ISSN 0022-4065.
- [102] Nedeljkov, M., Stakić, M. (1994): *Osnove tehnike sušenja*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka (FTN).
- [103] Niketić-Aleksić, G. (1994): *Tehnologija voća i povrća*. III izdanje. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, str. 420.
- [104] Novak, M. (2008): *Sušenje lesa*, Višješolski učbenik. Martibor: Lesarska šola Maribor, Višja strokovna šola, – 129 str.
- [105] Pantelić, I. (1984a): *Primena statističkih metoda u istraživanjima i procesima proizvodnje*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, – 532 str. COBISS.SR-ID 38262535.
- [106] Pantelić, I. (1984b): *Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta*. Novi Sad: Radnički univerzitet "Radivoj Čirpanov", – 467 str. COBISS.SR-ID 4684549.

- [107] Park, K.J., Bin, A., & Brod, F. P. (2002): Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, Vol. 56, pp. 97-103.
- [108] Paunović, D.M.; Zlatković, B.P. & Mirković, D.D. (2010): Kinetics of drying and quality of the apple cultivars Granny Smith, Idared and Jonagold. *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 55, No. 3, pp. 261-272. ISSN 1450-8109.
- [109] Paunović, R. (2010): *Matematičko modelovanje u prehrambenom inženjerstvu*. Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- [110] Pavković, B. & Božunović, A. (2006): *Tehnika hlađenja*. Skripta. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2006.
- [111] Pavlov, K.F.; Romankov, P.G. & Noskov, A.A. (1979): *Examples and problems to the course of unit operations of chemical engineering*. Moscow: Mir.
- [112] Perić, N. & Petrović, I. (2005): *Identifikacija procesa*. Skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2005. – 150 str.
- [113] Pervan, S. (1996): *Pouzdanost računalom podržanog sušenja bukovine u klasičnoj komornoj sušionici*. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet.
- [114] Pervan, S. & Grbac, I. (1997): Uređaji za sušenje drva podržani računalom. *Drvna industrija*, Vol. 47, br. 2, str. 74-82. ISSN 0012-6772.
- [115] Petrović, M. (2009): *Sušenje*. Tuzla: Univerzitet u Tuzli, Rudarsko geološko građevinski fakultet, 2009. str. 30
- [116] Pfaff, S. & Salopek, B. (2004): Primjena planiranja eksperimenata u oplemenjivanju mineralnih sirovina. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 16, No. 1. str. 99-108. ISSN 0353-4529.
- [117] Plešić, S., Dobričević N. (2006): Sušenje lista paprene metvice (*Mentha piperita*) u elementarnom (tankom) sloju. *Sjemenarstvo*, Vol. 23, No. 2, str. 149-159. ISSN 1330-0121.
- [118] Prvulović, S. (2004): *Modelovanje mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanje numeričkih pokazatelja*. Doktorska disertacija. Zrenjanin: Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", 2004. – 112 str.
- [119] Ranđelović, D. (2009): Hemijski sastav voća. *Tehnologija hrane*, str. 47-58.
- [120] Ranjit, R.K. (2001): *Design of experiments using the Taguchi approach – 16 steps to product and process improvement*. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., – 560 pp. ISBN 0471361011.
- [121] Robinson, G.K. (2000): *Practical strategies for experimenting*. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., – 265 pp. ISBN 978-0-471-49055-5.
- [122] Rossrucker, H. (1992): Die Trocknung von Olkürbiskernen (*Cucurbita pepo* L.). *Journal for Land Management, Food and Environment*, Vol. 43, pp. 169-173.
- [123] Rothenberg, J. (1989): The nature of modeling. In: *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons, Inc., pp. 75-92.
- [124] Salemović, D.R. (1999): *Matematičko modeliranje, simulacija i identifikacija procesa sušenja prirodnih proizvoda u trakastoj sušari*. Doktorska disertacija. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, – 233 str. COBISS.SR-ID 19118351.
- [125] Salihbegović, A. (1985): *Modeliranje dinamičkih sistema*. Sarajevo: Svjetlost, 1985. – 247 str. COBISS.BH-ID 15482625.
- [126] Sander, A. (2011): *Jedinične operacije u ekoinženjerstvu. Toplinski separacijski procesi*. Skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2011.
- [127] Schlunder, E.U. (1993): Design of contact dryers for free flowing solids loaded with solvent mixtures. *Chemie Ingenier Technik, Weinheim*, Vol. 65, No. 2, pp. 174.
- [128] Seader, D.J. and Henley, J.E. (2006): *Separation process principles*. Danvers: John Wiley & Sons Inc.

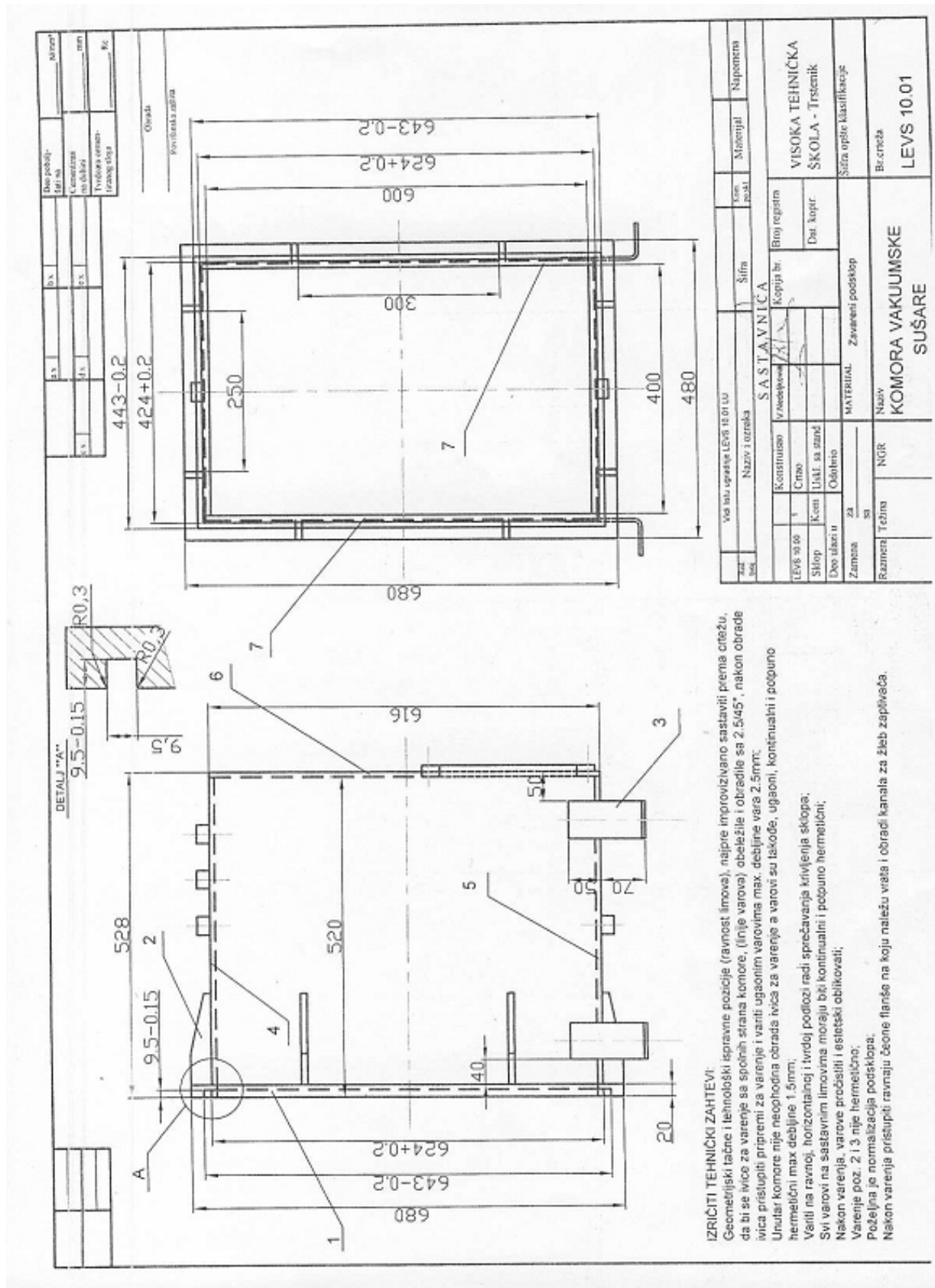
- [129] Sedlar, T. & Pervan, S. (2010): Analiza kvalitete procesa sušenja u klasičnim komornim sušionicama. *Drvena industrija*, Vol. 61, No. 2, pp. 111-118. ISSN 0012-6772.
- [130] Simpson, W.T. (1991a): *Dry kiln operator's manual*. Chapter 3: *Dry kiln auxiliary equipment*. Madison (Wisconsin – USA): United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 75-86.
- [131] Simpson, W.T. (1991b): *Dry kiln operator's manual*. Chapter 4: *Inspection and maintenance of dry kilns and equipment*. Madison (Wisconsin – USA): United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 87-102.
- [132] Sito, S.; Barčić, J. & Ivančan, S. (1998): Utjecaj različitih temperatura radnog medija na trajanje procesa sušenja visoko vlažnih sjemenki buče nakon pranja (*Cucurbita pepo* L.). *Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS)*, Vol. 63, No. 4, str. 285-290. ISSN 0370-0291.
- [133] Stanić, J. (1990): *Metod inženjerskih merenja: Osnove matematičke teorije eksperimenata*. 5. izdanje. Beograd: Mašinski fakultet, – 250 str. ISBN 86-7083-143-0.
- [134] Stankov, J. (1982): *Osnove merne tehnike: Metode planiranja eksperimenata*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, – 181 str. COBISS.SR-ID 34508551.
- [135] Taweekul, K. and Sringam, S. (2004): Present status of rural-based food processing industry. In: *Rural-Based Food Processing Industry*. Edited by Alastair Hicks. Tokyo (Japan): Asian Productivity Organization, pp. 132-140. ISBN 92-833-7026-0.
- [136] Topić, R.M. (1989): *Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara*. Beograd: Naučna knjiga, 1989. – 193 str. ISBN 86-23-43014-X.
- [137] Topić, M.R. & Bogner, M. (2002): *Tehnika sušenja*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, - 122 str. ISBN 86-17-09891-0.
- [138] Topić, R.M. & Topić, G.R. (2002): Novi pristup i tendencije pri korišćenju toplotnih pumpi u procesu sušenja. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi (PTEP)*, Vol. 6, br. 1-2, str. 17-19. ISSN 1450-5029.
- [139] Ukrainczyk, M. (2010): Planiranje pokusa u industriji. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam / Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 96-105 ISSN 1847-3423.
- [140] Valent, V.J. (2001): *Sušenje u procesnoj industriji*. Beograd: Tehnološko-metalurški fakultet, - 283. ISBN 86-7401-152-7.
- [141] Van den Bosch, P.P.J. and Van der Klauw, A.C. (1994): *Modeling, identification and simulation of dynamical systems*. Boca Ratom (Florida – USA): CRC Press Inc., 208 pp. ISBN 978-0-8493-9181-1.
- [142] Velić, D. (2008): *Projektovanje uređaja u prehrambenoj industriji – Sušenje*. Osijek: Prehrambeno-Tehnološki fakultet.
- [143] Vereš, M. (1991): *Osnovi konzervisanja namirnica*. Beograd: Naučna knjiga, – 314 str. ISBN 86-23-47044-3.
- [144] Voronjec, D. & Kozić, Đ. (2002): *Vlažan vazduh: Termodinamičke osobine i primena*. 4. prerađeno i dopunjeno izdanje. Beograd: Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), – 166 str. ISBN 86-23-43032-8.
- [145] Vrač, N. (1990): *Uticaj procesa sušenja u fluidizovanom sloju na pojedina kemijaka, fizikalna i organoleptička svojstva jabuka*. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet (PBF).
- [146] Wagner, F.S. (1998): *Wahlthema Kürbiskrönlherstellung*. Graz (Austria): TU Graz, Institut für Maschinenelemente.
- [147] Zadeh, L.A. (1973): Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decisions processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, Issue 1, pp. 28-44. ISSN 0018-9472.

- [148] Zlatanović, I.; Rudonja, N. & Gligorević, K. (2010): Kondenzaciona sušara sa potpunom recirkulacijom vazduha. *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 35, br. 3, str. 77-84. ISSN 0554-5587.
- [149] Zlatković, B. (2003): *Tehnologija prerade i čuvanje voća*. Zemun: Poljoprivredni fakultet, – 177 str. ISBN 86-80733-44-X.
- [150] Živković, M. (1998): *Određivanje optimalnih parametara tehničko-tehnoloških sistema za sušenje koštičavog voća*. Doktorska disertacija. Zemun: Poljoprivredni fakultet, – 128 str. COBISS.SR-ID 18415887.
- [151] Živković, M. (2003): Energetski aspekt i kvalitet sušenja koštičavog voća. *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 27, br. 1-2, str. 39-49. ISSN 0554-5587.
- [152] Živković, M. & Kosi, F. (2005): Kinetika sušenja koštičavog voća. *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 30, br. 3, str. 71-79. ISSN 0554-5587.
- [153] Živković, M.; Kosi, F. & Koprivica, R. (2006): Stone fruit drying parameters. *Acta Agriculturae Serbica*, Vol. 11, No.22, pp. 3-14. ISSN 0354-9542.
- [154] Živković, M.; Kosi, F.; Radojević, R. & Komnenić, V. (2006): Potrošnja toplotne energije i kvalitet sušenja koštičavog voća. *Voćarstvo*, Vol. 40, No. 155, str. 273-285. ISSN 1820-5054.
- [155] Živković, M.; Radojević, R.; Urošević, M.; Kosi, F. & Komnenić, V. (2005): Oblici i struktura angažovane energije pri sušenju biljnih materijala. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi (PTEP)*, Vol. 9, No. 1-2, str. 38-41. ISSN 1450-5029.
- [156] Živković, M.; Zarić, V. & Radojević, R. (2006): Analiza ekonomskih efekata sušenja voća korišćenjem različitih tehničkih rešenja. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi (PTEP)*, Vol. 10, br. 1-2, str. 26-28. ISSN1450-5029.
- [157] Адлер, Ю.П.; Маркова, Е.В. & Грановский, Ю.В. (1976): *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва (Россия): Наука, – 279 стр.
- [158] Налимов, В.В. & Чернова Н.А. (1965): *Статистические методы планирования экстремальных экспериментов*. Москва (Россия): Наука, – 340 стр. [Nalimov, V.V. & Chernova, N.A. (1965): *Statistical methods for planning experiments extreme* (in Russian). Moscow (Russia): Nauka / Science, – 340 pp.].
- [159] Налимов, В.В. (1969): *Новые идеи в планировании эксперимента*. Москва (Россия): Наука, – 334 стр. [Nalimov, V.V. (1969): *New ideas in the planning of the experiment* (in Russian). Moscow (Russia): Nauka / Science, – 334 pp.].
- [160] Налимов, В.В. (1971): *Теория эксперимента*. Москва (Россия): Наука, – 208 стр. [Nalimov, V.V. (1971): *Theory of experiment* (in Russian). Moscow (Russia): Nauka / Science, – 208 pp.].

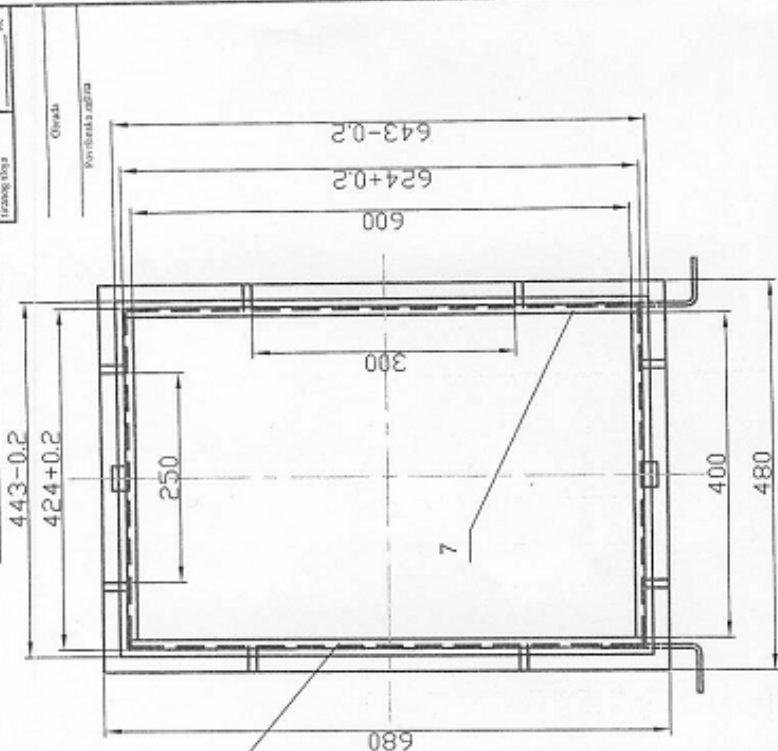
8. PRILOG

8.1. PRILOG 1. SKLOPNI CRTEŽI LABORATORIJSKE EKSPERIMENTALNE

SUŠARE



Dio pođelj- lari su	d.x	d.x	d.x	d.x	Šifra	Materijal	Napomena
Čestoća na debljini	5x	5x	5x	5x			
Trivljaka razm- traznoj deblj							
Rc							

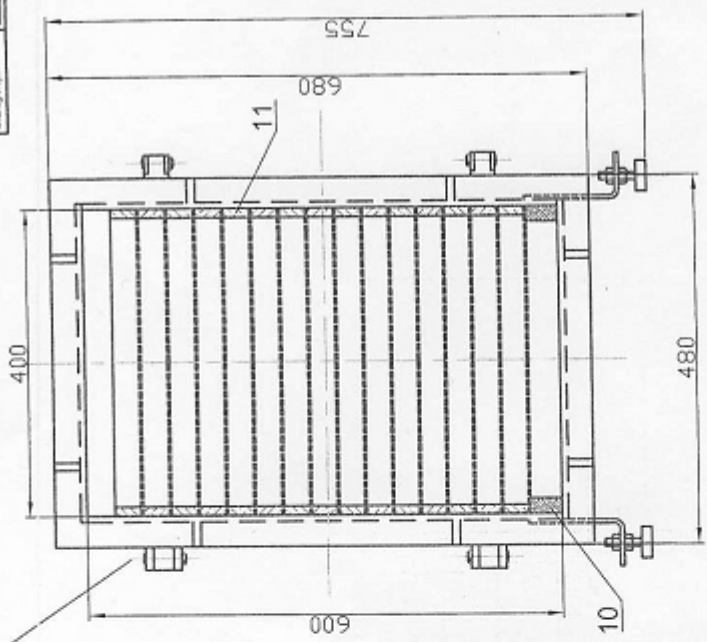
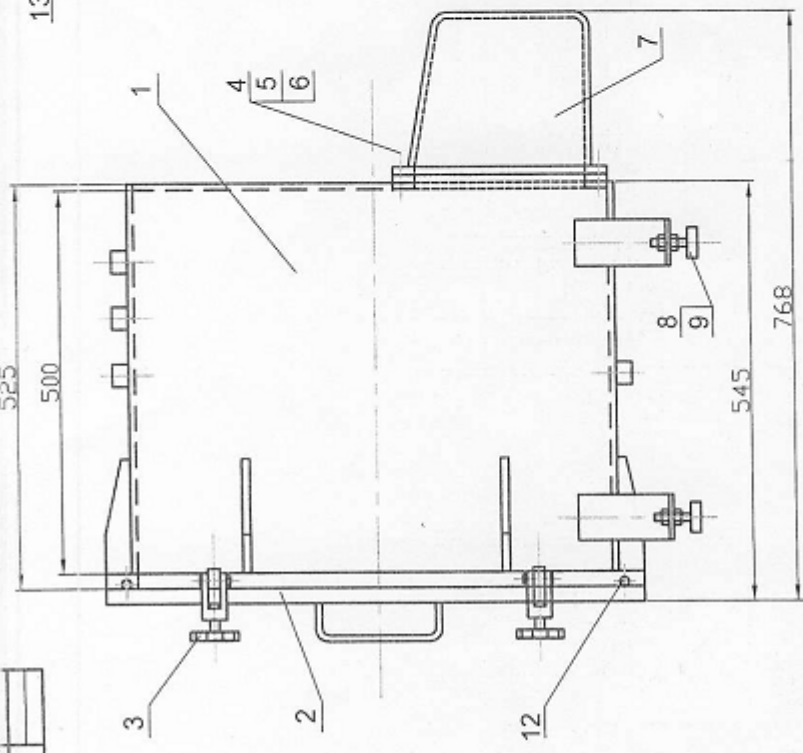


Vol' i su upravlja LEVS 10.01 LU	Šifra	Kom. broj	Materijal	Napomena
Nazov i uređaja	SASTAVNICA			
Konstruktov v. inženjer	Kopija br.	Broj registar		VISOKA TEHNIČKA SKOLA - Trstenik
1 Črtno Kom. UAKI sa zad.		Dst. kopir.		
Šloj				
Udio u delu				
Obelato				
Zamena za				
33				
MATERIJAL	Završeni podsklop			
Težina	NGR			
Nazov	KOMORA VAKUUMSKE SUŠARE			
				Be. crteža LEVS 10.01

VISOKA TEHNIČKA ŠKOLA - TRSTENIK	LISTA UGRADNJE	Opšta klasifikacija Identifikacija
----------------------------------	----------------	---------------------------------------

Naziv:					
KOMORA VAKUUM SUŠARE					
LEVS 10.01 LU					
Red. broj	Naziv i oznaka	Identifikacija	Kol.	Napomena	
1	Čeona flanša LEVS 10.02		1		
2	Rebro LEVS 10.03		8		
3	Stopa LEVS 10.04		4		
4	Gornja ploča LEVS 10.05		1	Podsklop	
5	Donja ploča LEVS 10.08		1	Podsklop	
6	Zadnja ploča LEVS 10.09		1	Podsklop	
7	Bočni lim 616 x 500 x 8, Č. 4574		2	Bez crteža	
Projektovao	V. Nedeljković		i 1	List broj	1
Uskl. sa stand.			i 2	Listova broj	1
Odobrio			i 3		

Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra



IZRIČITI TEHNIČKI ZAHTJEVI:
 Pri zavarivanju šarki vrata poz 13 na ram komore, ram vrata mora postupati i bez dodatnih pritovanja da nalegne na ram komore.
 Obezbediti tako i nesmetano otvaranje i zatvaranje vrata sa potpunim nateganjem na ram komore kada su vrata u zatvorenom položaju.
 Zavariti nosač sigurnosne uzengije poz 3 na ram komore, namontirati kompletnu uzengiju i proveriti funkciju osiguranja vrata od otvaranja.
 Pažljivo namontirati zaplivač u žlebu rama komore.
 Vakuumska komora sa zatvorenim i uzengijama zabravljenim vratima mora biti potpuno hermetična; ispitivanje na hermetičnost, izdržljivost i pouzdanost obaviti uključivo uz nadzor kompetentnih stručnih lica.

Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra
Ime i prezime	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra	Šifra

**8.2. PRILOG 2. REZULTATI FIZIČKO-HEMIJSKE ANALIZE SVEŽE JABUKE
SORTE „CRVENI DELIŠES“**



**D.O.O. PREDUZEĆE ZA PRUŽANJE
LABORATORIJSKIH USLUGA
"ALFA LAB" ALEKSANDROVAC**

Kruševačka 36
tel: 037/3554-986, fax: 037/3554-986, e-mail: lab@vinozupa.com
teknički račun: 200-2434330101919-06 PIB: 104100428



IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU BR. 399

br.kopija: 1 broj strana 1/2

KORISNIK / ADRESA: Republika Srbija
Zavod za javno zdravlje Kruševac
Vojvode Putnika 2, Kruševac

UZORAK / ŠIFRA: Sveža jabuka, crveni delišes br.uz.H 2092/04 /399/4

NAČIN PAKOVANJA: PVC kesa, uzorak 700 gr - rinfuz

VRSTA ISPITIVANJA: Fizičko – hemijska analiza

METODE ISPITIVANJA: Date na sledećoj strani Izveštaja

DATUM PRIJEMA ZAHTEVA: 18.12.2013.

DATUM IZRADE IZVEŠTAJA: 20.12.2013.

ALFA LAB d.o.o.
Aleksandrovac


Za Direktor
dipl.ing. Snežana Nikić

Rezultati ispitivanja se odnose samo na ispitivani uzorak.
Ovaj izveštaj se ne sme umnožavati, izdavati u celini, bez odobrenja Laboratorije i korisnika.

obrazac AL-O-47



D.O.O. PREDUZEĆE ZA PRUŽANJE
LABORATORIJSKIH USLUGA
"ALFA LAB" ALEKSANDROVAC

Kruševačka 36
tel: 037/3554-986, fax: 037/3554-986, e-mail: lab@vinozupa.com
tekući račun: 200-2434330101919-06 PIB: 104100428



REZULTATI FIZIČKO-HEMIJSKE ANALIZE

br. kopija: 1 strana 2/2

UZORAK / ŠIFRA: Sveža jabuka, crveni delišes hr.uz.H 2092/04 /399/4

R.br.	KARAKTERISTIKA	Jed. mere	METODA	Dobijene vrednosti
01.	Siva materija refraktometrijski na 20°C	% m/m	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 1	12,93
02.	Ukupne kiseline - izražene kao jabučna	% m/m	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 18	0,171
03.	Vitamin C	mg/l	AL-DM-35	<12
04.	Sadržaj ukupnog šećera	% m/m	Sl. list SFRJ br. 29/83 tačka 3	10

Svi parametri su radeni u iscedenom soku jabuke.

Verifikovao
M. Kostić
Vodeći analitičar
dipl.ing. Bojana Kostić



Odobrio
M. Milanović
Šef Laboratorije
dipl.ing. Miroslav Milanović

obrazac AL-O-47/4

8.3. PRILOG 3. IZVEŠTAJI O ISPITIVANJU SUŠENIH PLODOVA JABUKE SORTE „CRVENI DELIŠES“



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
ЗАВОД ЗА ЈАВНО ЗДРАВЉЕ
КРУШЕВАЦ



Адреса: Војводе Путника 2, 37000 Крушевац	тел: +381(0)37427241 +381(0)37438794	факс: +381(0)37422951	www.zavodks.rs E-mail: zavodks@pjt.rs
Регистарски број: 6145532727	Метични број: 07145764	ПИБ: 100480972	Текући рачун: 840-206667-54

Извештај о испитивању Број: Н 990/13	ОБ.020.А Страна 1/4
--	------------------------

Веза:	Лични захтев
Корисник:	„Висока машинско – техничка школа“ - Трстеник
Адреса:	Ул. Радоја Крстића бр. 19 - Трстеник
Особа за контакт:	Карић Марина
Датум узорковања:	16.12.2013. год.

Назив узорка	Ознака узорка	Порекло	Произвођач	Опис стања узорка	Узорковано из количине	Количина	Узорковано по методи
1. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес	Н 2090/04	Зан.пр.	„Висока машинско – техничка школа“ - Трстеник	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
2. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес	Н 2091/04	Зан.пр.	„Висока машинско – техничка школа“ - Трстеник	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
3. Јабука свежа црвени делишес	Н 2092/04	Зан.пр.	„Висока машинско – техничка школа“ - Трстеник	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*

*Није садржано у обиму акредитације

Шапомена	
Изјава:	Резултати испитивања се односе само на испитивани узорак. Извештај се сме умножавати искључиво као целина

Датум:	30.12.2013. год.	 М.П.	Овлашћено лице: др Александра Бојанић, спец. хигијене
--------	------------------	----------	--



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
ЗАВОД ЗА ЈАВНО ЗДРАВЉЕ
КРУШЕВАЦ



Адреса: Војводе Путника 2, 37000 Крушевац	тел: +381(0)37427241 +381(0)37438794	факс: +381(0)37422951	www.zavodks.rs E-mail: zavodks@ptt.rs
Регистарски број: 6145532727	Матични број: 07145764	ПИБ: 100480972	Текући рачун: 840-206667-54

Извештај о испитивању
Број: Н 5/14

ОБ.020.А
Страна 1/9

Веза:	Лични захтев
Корисник:	„Висока машинско – техничка школа“ Трстеник
Адреса:	Ул. Радоја Крстића бр. 19 - Трстеник
Особа за контакт:	Карић Марина
Датум узорковања:	13.01.2014.год.

Назив узорка	Ознака узорка	Порекло	Произвођач	Опис стања узорка	Узорковано из количине	Количина	Узорковано по методи
1. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 2	Н 8/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
2. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 3	Н 9/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
3. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 4	Н 10/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
4. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 6	Н 11/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
ЗАВОД ЗА ЈАВНО ЗДРАВЉЕ
КРУШЕВАЦ



Адреса: Војводе Путника 2, 37000 Крушевац	тел: +381(0)37427241 +381(0)37438794	факс: +381(0)37422951	www.zavodks.rs E-mail: zavedks@ptt.rs
Регистарски број: 6145532727	Матични број: 07145764	ПИБ: 100480972	Текући рачун: 840-206667-54

Извештај о испитивању Број: <u>Н 5/14</u>	ОБ.020.А Страна 2/9
---	-------------------------------

Веза:	Лични захтев
Корисник:	„Висока машинско – техничка школа“
Адреса:	Ул. Радоја Крстића бр. 19 - Трстеник
Особа за контакт:	Карић марица
Датум узорковања:	13.01.2014.год.

Назив узорка	Ознака узорка	Порекло	Произвођач	Опис стања узорка	Узорковано из количине	Количина	Узорковано по методи
5. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 7	Н 12/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
6. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 9	Н 13/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*
7. Сушени плод јабуке – сорта црвени делишес узорак 10	Н 14/04	Промет	Расински округ	одговара	1,5 кг	100 г	Сл. лист СФРЈ 60/78 Табела III*

*Није садржано у обиму акредитације

Напомена	
Изјава:	Резултати испитивања се односе само на испитивани узорак. Извештај се сме умножавати искључиво као целина

Датум:	21.01.2014.год.		Овлашћено лице: др Александра Бојанић, спец. хигијене
--------	-----------------	---	--



Извештај о испитивању

Број: Н 990/13

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес

Ознака узорка: Н 2090/04

Датум пријема узорка: 16.12.2013.

Начин паковања: Пластична кеса.

Завршено: 30.12.2013.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	С.л.л.СФРЈ 29/83 – 2а	11,0
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,90
Садржај пепела нерастворљивог у HCl	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 8	0,01
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	67,0

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



**Завод за јавно здравље
Крушевац**
Одсељење за санитарну хемију
и екотоксиколошку дијагностику



Страна 3 од 4

Извештај о испитивању

Број: Н 990/13

Узорак: Сушени плод јабуке сорта првени делишес

Ознака узорка: Н 2091/04

Датум пријема узорка: 16.12.2013.

Начин паковања: Пластична кеса.

Завршено: 30.12.2013.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл. л. СФРЈ 29/83 – 2а	8,3
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	1,09
Садржај пепела нерастворљивог у НСl	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 8	0,01
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	64,3

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



Завод за јавно здравље
Крушевац
Одељење за санитарну хемију
и екотоксиколошку дијагностику



Страна 2 од 8

Извештај о испитивању

Број: Н 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес – узорак 2

Ознака узорка: П 8/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Завршено: 21.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	7,8
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,96
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	68,6

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



Завод за јавно здравље
Крушевац
Одељење за санитарну хемију
и екотоксиколошку дијагностику



Страна 3 од 8

Извештај о испитивању

Број: Н 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес – узорак 3

Ознака узорка: П 9/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Завршено: 21.01.2014.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	7,6
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,54
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	71,1

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарица Михајловић, спец. санитарне хемије



Завод за јавно здравље
Крушевац
Одељење за санитарну хемију
и екотоксиколошку дијагностику



Страна 5 од 8

Извештај о испитивању

Број: Н 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес – узорак 6

Ознака узорка: Н 11/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Завршено: 21.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	7,9
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	1,06
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	73,0

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Оплаћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



Извештај о испитивању

Број: H 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес – узорак 7

Ознака узорка: H 12/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Завршено: 21.01.2014.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	7,6
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,68
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	72,5

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



Завод за јавно здравље
Крушевац
Одељење за санитарну хемију
и екотоксиколошку дијагностику



Страна 7 од 8

Извештај о испитивању

Број: Н 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делишес – узорак 9

Ознака узорка: Н 13/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Завршено: 21.01.2014.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	7,9
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,96
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	68,7

* Није садржало у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарина Михајловић, спец. санитарне хемије



**Завод за јавно здравље
Крушевац**
Одељење за санитарну хемију
и екоотоксиколошку дијагностику



Страна 8 од 8

Извештај о испитивању

Број: H 5/14

Узорак: Сушени плод јабуке сорта црвени делилес – узорак 10

Опака узорка: H 14/04

Датум пријема узорка: 13.01.2014.

Завршено: 21.01.2014.

Начин паковања: Папирна кеса.

Сензорска испитивања*

Изглед садржаја	својствен
Стране примесе	без
Мирис	својствен
Укус	својствен

Резултати хемијске анализе

Параметар	Јединица мере	Метода	Добијена вредност
Садржај воде	%	Сл.л.СФРЈ 29/83 – 2а	8,0
Садржај укупних киселина (као јабучна киселина)	%	Сл. л. СФРЈ 26/89 – 5	0,94
Садржај укупних шећера	%	по <i>Luff-Schoorl</i> *	67,8

* Није садржано у обиму акредитације

Напомена: /.



Овлашћено лице:

дипл. хемичар Катарица Михајловић, спец. санитарне хемије

KRATKA STRUČNA BIOGRAFIJA

mr Marina Karić, dipl. inž. maš.

Lični podaci

Rođena 9. 11. 1965. god. u Trsteniku, Republika Srbija. Nacionalnost: srpska.

Bračno stanje: udata 1990. god., majka dvoje dece rođene 1991. i 1993.

Obrazovanje:

Osnovnu školu završila je u Počekovini 1980. god., a Crednju prirodno-tehničku školu u Trsteniku 1984. god., sa odličnim uspehom.

Na Mašinskom fakultetu u Kraljevu, Univerziteta u Beogradu diplomirala je 1989. god. na smeru za proizvodno-privredno mašinstvo, sa prosečnom ocenom u toku studija 8,31 (osam i 31/100), čime je stekla stručni naziv diplomirani inženjer mašinstva.

Poslediplomske magistarske studije na Mašinskom fakultetu u Kraljevu, smer termoenergetska postrojenja, upisala je 1994. god. nakon položenih ispita, marta 1999. god. kandidatkinja je odbranila magistarski rad pod naslovom "Gasifikacija biomase u reaktorima istosmernog toka", i time stekla akademski naziv magistra tehničkih nauka u oblasti termoenergetska postrojenja.

Od 2008. god. doktorant na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu, naučna oblast: Procesna tehnika i Termoenergetika, naučna disciplina: Toplotne operacije.

Kretanje u profesionalnom radu:

1989. - 1990. Prva petoletka - razvojno istraživačka laboratorija Trstenik na radnom mestu konstruktora ventila.

1990. - 1999. Mašinski fakultet Kraljevo kao asistent - pripravnik na predmetima Termodinamika i Konstrukcija tehnoloških postrojenja

1999. - Viša tehničko mašinska škola (sada Visoka tehničko mašinska škola strukovnih studija) Trstenik. Glavne aktivnosti i odgovornosti - nastavnik na predmetima: Tehnička mehanika, Tehnička termodinamika, Grejna i rashladna tehnika u prehrambenoj opremi, Projektovanje procesne opreme.

Glavni sadašnji profesionalni interes vezan je za: racionalizaciju potrošnje toplotne energije, razvoj opreme za konzerviranje hrane i optimizaciju toplotnih procesa.

Objavila je 30 stručnih radova iz oblasti procesne tehnike i termoenergetike, učestvovala je na 7 naučno-istraživačkih projekata i napisala je 2 interne skripte.