

# Utjecaj temperature ekstrudera na masu i dimenzije 3D tiskanih snack bezglutenskih proizvoda od žitarica

---

Pleš, Vedrana

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology / Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:765367>

*Rights / Prava:* [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Food Technology and Biotechnology](#)



**Sveučilište u Zagrebu  
Prehrambeno-biotehnološki fakultet  
Preddiplomski studij Prehrambena tehnologija**

**Vedrana Pleš  
0058215584**

**UTJECAJ TEMPERATURE EKSTRUDERA NA MASU  
I DIMENZIJE 3D TISKANIH SNACK  
BEZGLUTENSKIH PROIZVODA OD ŽITARICA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Predmet:**

*Kemija i tehnologija žitarica*

**Mentor:** dr. sc. Bojana Voučko

**Zagreb, 2022.**

Rad je izrađen u Laboratoriju za kemiju i tehnologiju žitarica na Zavodu za prehrambeno-tehnološko inženjerstvo Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom dr. sc. Bojane Voučko.

Završni rad je izrađen u sklopu istraživačkog projekta 'Razvoj nove generacije snack proizvoda namijenjenih potrošačima s posebnim prehrambenim potrebama primjenom tehnologija 3D tiskanja' financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost (IP-2020-02-3829).

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

Sveučilište u Zagrebu  
Prehrambeno-biotehnološki fakultet  
Preddiplomski sveučilišni studij Prehrambena tehnologija

Zavod za prehrambeno-tehnološko inženjerstvo  
Laboratorij za kemiju i tehnologiju žitarica

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti  
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

**Utjecaj temperature ekstrudera na masu i dimenzije 3D tiskanih snack bezglutenskih proizvoda  
od žitarica**

**Vedrana Pleš, 0058215584**

### **Sažetak:**

Trodimenzijski (3D) tisak hrane je tehnologija u nastajanju koja omogućuje razvoj personaliziranih oblika hrane, ali je za uspješan tisak potrebno odabrati odgovarajuće uvjete procesa. Stoga je cilj ovog rada istražiti utjecaj temperature ekstrudera na kvalitetu 3D tiskanih snack proizvoda od žitarica. Proveden je tisak tijesta pri četiri različite temperature ekstrudera: 26, 30, 55, 80 °C. Određivanjem mase, visine, širine i debljine tiskanog oblika prije i nakon pečenja, istražena je preciznost tiska 3D proizvoda, gubitak mase pečenjem te deformacije oblika. Rezultati istraživanja su pokazali da tisak pri temperaturi od 80 °C nije moguć zbog promjene viskoznosti smjese. Proizvodi tiskani pri 26 °C su vizualno odstupali u preciznosti od onih tiskanih pri 30 i 55 °C. Zaključno, temperatura tiska pri 55 °C pokazala se poželjnom radi povoljnog utjecaja na smanjenje gubitka vode za oko 5 % i smanjenje deformacija tiskanog oblika.

**Ključne riječi:** 3D tisak, temperatura ekstrudera, snack proizvod, deformacija, bezglutenski

**Rad sadrži:** 26 stranica, 6 slika, 6 tablica, 28 literaturnih navoda

**Jezik izvornika:** hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom obliku pohranjen u knjižnici Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 23, 10 000 Zagreb

**Mentor:** dr. sc. Bojana Voučko

**Datum obrane:** 8. srpnja 2022.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

Undergraduate thesis

University of Zagreb  
Faculty of Food Technology and Biotechnology  
University undergraduate study Food Technology

Department of Food Engineering  
Laboratory for Cereal Chemistry and Technology

Scientific area: Biotechnical Sciences  
Scientific field: Food Technology

**Influence of extruder temperature on mass and dimensions of 3D printed gluten free cereal snacks**

**Vedrana Pleš, 0058215584**

### Abstract:

Three-dimensional food printing is an innovative technology that offers the ability to produce personalized food shapes and composition. The aim of this paper is to investigate the influence of extrusion temperature on the quality of 3D printed cereal snacks. 3D printing was performed at four different temperatures: 26, 30, 55 and 80 °C. By measuring shape height, width and thickness, printing precision, baking loss and deformations of 3D printed shapes were investigated. Research results showed that extruder temperature affects the quality of snack products. Printing at 80 °C was not possible due to a change in viscosity of the mixture. Snack products printed at 26 °C were visually inferior to the ones printed at 30 and 55 °C. Further on, somewhat higher quality of print was achieved at 55 °C due to smaller deformations of the printed sample and 5% lesser baking loss.

**Keywords:** 3D printing, extrusion temperature, snacks, deformation, gluten free

**Thesis contains** 26 pages, 6 figures, 6 tables, 28 references

**Original in:** Croatian

Thesis is deposited in printed and electronic form in the Library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Kačićeva 23, 10 000 Zagreb

**Mentor:** Bojana Voučko, PhD

**Thesis defended:** July 8, 2022.

# Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO .....</b>	<b>2</b>
2.1. 3D TISAK HRANE .....	2
2.1.1. 3D TISKANJE NA PRINCIPU EKSTRUZIJE .....	4
2.1.2. MEHANIZAM TISKANJA (EKSTRUZIJE) .....	4
2.1. 3D TISAK HRANE OD ŽITARICA .....	5
2.2.1. KRIOGENO MLJEVENJE .....	6
2.2.2. REOLOŠKA SVOJSTVA TIJESTA ZA 3D TISKANJE .....	6
2.2.3. PROCESI OBRADJE NAKON TISKANJA.....	7
2.3. SNACK PROIZVODI .....	8
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO.....</b>	<b>8</b>
3.1. MATERIJALI .....	8
3.1. METODE.....	9
3.2.1 MLJEVENJE.....	9
3.2.2. HOMOGENIZACIJA .....	10
3.2.3. PRIPREMA TIJESTA ZA 3D TISAK.....	10
3.2.4. 3D TISAK.....	11
3.2.5. ZAMRZAVANJE TIJESTA SNACK PROIZVODA.....	12
3.2.6. PEČENJE SNACK PROIZVODA.....	13
3.2.7. MJERENJE DIMENZIJA TJESTENIH KOMADA I SNACK PROIZVODA.....	13
3.2.8. VAGANJE SNACK PROIZVODA.....	14
3.2.9. SKENIRANJE GOTOVIIH SNACK PROIZVODA I OBRADA FOTOGRAFIJA.....	15
3.2.10. STATISTIČKA ANALIZA.....	15

<b>4. REZULTATI I RASPRAVA .....</b>	<b>15</b>
4.1. PRECIZNOST TISKA.....	17
4.2. GUBITAK MASE PEČENJEM.....	19
4.3. DIMENZIJE 3D TISKANOG OBLIKA PRIJE PEČENJA .....	19
4.4. DIMENZIJE 3D TISKANOG OBLIKA NAKON PEČENJA.....	21
<b>5. ZAKLJUČCI.....</b>	<b>24</b>
<b>6. POPIS LITERATURE .....</b>	<b>25</b>



## 1. UVOD

Trodimenzijski tisak (3D) hrane je i tehnologija u nastajanju koja omogućuje razvoj personaliziranih oblika hrane kao i prilagođavanje sastava hrane prema specifičnim potrebama pojedinca. U prehrambenoj industriji 3D tisak hrane pruža razne prednosti kao što je širenje izvora sirovina (korištenje netradicionalnih materijala, poput nusproizvoda biljnog i životinjskog podrijetla), te stvaranje novih tekstura i proizvodnju složenih oblika koje nije moguće proizvesti ručno ili upotrebom kalupa (Sun i sur., 2015b; Liu i sur., 2017; Severini i sur., 2018; Golubić, 2021). Trenutno se koriste četiri tehnike trodimenzijskog tiskanja hrane: tisak na principu ekstruzije (u današnje vrijeme najraširenija tehnika), tisak sa selektivnim sinteriranjem, tiskanje primjenom vezivnog sredstva te tintni tisak (Pérez i sur., 2019; Grgić, 2020). Iako 3D tisak hrane pruža razne prednosti u proizvodnji, njegova primjena ima određene izazove od kojih su glavni: preciznost tiska i ponovljivost oblika, produktivnost procesa tiskanja i istovremeno tiskanje proizvoda u više različitih boja, tekstura i okusa, te promjene svojstava pri naknadnoj obradi.

Snack proizvod definira se kao hrana koja se konzumira između tri glavna obroka - doručka, ručka i večere (McCarthy, 2001; Golubić, 2021). Snack proizvode od žitarica moguće je proizvesti 3D tiskom na principu ekstruzije. Izazov ovog načina proizvodnje je očuvanje 3D tiskanog oblika tijekom naknadne obrade, najčešće tijekom pečenja (Habuš et al., 2021). Postoji mogućnost promjene oblika, odnosno može doći do iskrivljenja i izobličenja 3D tiskanog oblika. Za uspješnost 3D tiska na principu ekstruzije su ključna svojstva prehrambenih materijala kao što je vlaga, reološka svojstva te toplinska svojstva. Viskoznost korištenog materijala mora biti dovoljno mala da se materijal lako ekstrudira, ali dovoljno velika kako bi se naknadno tiskani slojevi održali stabilnima (Liu i Zhang, 2019). Temperatura procesa ima značajan utjecaj na reološka svojstva prehrambenog materijala (viskoznost, koeficijent konzistencije, indeks tečenja), stoga ju je bitno kontrolirati i održavati tijekom proizvodnog procesa.

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj četiri različite temperature ekstrudera na kvalitetu 3D tiskanih tijesta za snack. Istražit će se kvaliteta tiskanih snack proizvoda mjerenjem mase dimenzija prije i nakon pečenja te gubitka vlage pečenjem, preciznosti tiska i deformacije oblika u ovisnosti o temperaturi ekstrudera.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. 3D TISAK HRANE

3D tisak tehnika je koja omogućuje izradu dizajniranih predmeta, računalno potpomognutih, na platformi taloženjem sloja na sloj (Zhu i sur., 2019, Golubić, 2021). 3D tisak koristi se i u umjetnosti, gastronomiji, medicini i dr. Istraživači sa Sveučilišta Cornell prvi su puta uveli 3D tisak 2011. godine u prehrambeni sektor koristeći pritom 3D tiskač koji je radio na principu ekstrudiranja (Fab@home) (Liu i sur., 2017;). Tehnologija 3D tiska omogućava korištenje širokog raspona materijala poput prehrambenih materijala, prahova, polimera te živih tkiva.

Trenutno se u prehrambenom sektoru koriste četiri tehnike trodimenzijskog tiska hrane (Sun i sur., 2018; Pérez i sur., 2019), a to su: 3D tiskanje na principu ekstruzije, 3D tiskanje sa selektivnim sinteriranjem, 3D tiskanje primjenom vezivnog sredstva te tintni tisak. Tiskanje na principu ekstrudiranja većinom se primjenjuje za tisak rastopljene čokolade ili mekih materijala kao što je pire krumpir, sir i tijesto (Yang i sur., 2015; Grgić 2020). Tijekom 3D tiskanja hrane na principu ekstruzije pastozna smjesa ili rastopljeni materijal se kontinuirano nanosi na prethodne slojeve iz pokretne mlaznice. Kod 3D tiskanja selektivnim laserskim sinteriranjem koristi se snaga lasera kako bi se selektivno spojile čestice praha, do željenog 3D oblika, sloj po sloj. Sirovine koje se koriste za ovu tehniku tiska praškasti su materijali koji se mogu zajedno spojiti, a da se ne raspadnu tijekom proizvodnog procesa. Tiskanje selektivnim laserskim sinteriranjem koristi se za proizvodnju 3D tiskane hrane sa složenom strukturom koristeći šećer i prahove bogate šećerom. Mana ove metode je ograničenost prehrambenih materijala koji se mogu upotrebljavati, kao i njihova nutritivna vrijednost (Liu i sur., 2017). Tisak primjenom vezivnog sredstva temelji se na nanošenju slojeva praha između kojih se dodaje vezivo na točno određenim mjestima (Liu i Zhang, 2019, Grgić 2020). Ova se tehnika koristi za proizvodnju složenih, kompliciranih i šarenih trodimenzijskih oblika hrane. Šećer, proteini i škrob sirovine su koje se najčešće koriste prilikom 3D tiska hrane primjenom vezivnog sredstva. Vezivno sredstvo koje se koristi za 3D tiskanje hrane mora imati odgovarajuću gustoću, viskoznost i površinsku napetost (Liu i sur., 2017). Tintni se tisak temelji na tome da se kapljice iz termalne ili piezoelektrične glave oslobađaju do određenog područja kojeg se ukrašava ili ispunjava (Liu i Zhang, 2019). Tintni

tisak je metoda tiskanja kod koje se digitalni podaci s računala raspršuju površinom tiskanog prehrambenog oblika kroz kapljice tinte (Liu i sur., 2020).

3D tisak ima mnogobrojne prednosti kao što je personaliziranje hrane, prilagodba sastojaka hrane te tisak vrlo složenih oblika. Ovom je tehnologijom ljudima u svakodnevnom životu, ne samo u industrijskim pogonima, omogućena proizvodnja kompleksnih oblika koje nije moguće proizvesti ručno ili upotrebom kalupa. 3D tisak omogućuje personalizaciju prehrane pojedinca prema njegovom fizičkom i nutritivnom statusu (Sun i sur., 2015b; Golubić, 2021). Dobar su primjer proizvodi na bazi žitarica koji ne sadrže gluten namijenjenih za osobe s celijaklijom. Isto tako, moguće je proizvesti i hranu za osobe koje pate od disfagije, odnosno poteškoće gutanja, hranu mekane teksture kako ne bi došlo do gušenja (Nachal i sur., 2019).

Velika prednost 3D tiska je i to što je moguće proširiti izvore dostupnih prehrambenih sirovina i to na način da se koriste netradicionalni materijali kao što su nusproizvodi biljnog i životinjskog podrijetla, biljni materijali bogati vlaknima, kao i insekti (Severini i Derossi, 2016; Liu i sur., 2017; Golubić, 2021). Prilikom odabira samog materijala za tiskanje i njegove pripreme, potrebno je paziti na dva kriterija koja ovise o reološkim svojstvima materijala, a to su lakoća tiska i sposobnost zadržavanja iste strukture nakon tiskanja, npr. nakon pečenja.

Budući da je ova tehnologija još uvijek u razvoju, javljaju se određeni nedostaci koji predstavljaju probleme u uporabi. Hrana se može nakupljati u sitnim prostorima unutar 3D pisača (ekstruder i uske mlaznice), te se iz tog razloga javlja zabrinutost za opću sigurnost tako pripremljene hrane radi potencijalnog razvoja patogenih bakterija. Uz potencijalni razvoj patogenih bakterija, problem predstavljaju i čestice koje mogu otpustiti plastični dijelovi 3D pisača tijekom postupka tiskanja hrane. Kao nedostatak ove tehnologije navodi se i vrijeme utrošeno na samu proizvodnju hrane. Proces proizvodnje podrazumijeva pripremu materijala te razvoj recepture za tijesto koje mora zadovoljiti sve kriterije za uspješan tisak, samo tiskanje proizvoda i obradu nakon tiskanja (najčešće pečenje 3D tiskanog oblika).

Tehnologija proizvodnje hrane 3D tiskom ima određene izazove, a četiri glavna izazova su: preciznost tiska, ponovljivost tiskanih oblika, produktivnost samog procesa te istovremeno tiskanje proizvoda u više različitih boja, tekstura i okusa.

### 2.1.1 3D tiskanje na principu ekstruzije

Od svih tehnologija trodimenzijskog tiska, 3D tiskanje na principu ekstruzije je trenutno

najpopularnija za tisak hrane (Liu i sur., 2017). Tijekom tiska hrane na principu ekstruzije pastozna se smjesa ili rastopljeni materijal kontinuirano iz pokretne mlaznice nanosi na prethodne slojeve (Liu i sur., 2017; Grgić, 2020). Razlog popularnosti ove tehnologije je jednostavna izvedba uređaja i što velika količina materijala zadovoljava kriterije tiskanja ovom tehnologijom. Ova se tehnika primjenjuje za tisak tekućih i viskoznih materijala (Liu i sur., 2017). Iako se ova tehnika koristi za širok spektar materijala, obično se primjenjuje za tisak rastopljene čokolade i mekih materijala poput tijesta, sira i pire krumpira (Yang i sur., 2015). Tiskanje osjetljivih i složenih oblika ograničeno je zbog narušavanja 3D oblika, a postoji mogućnost izobličenja i iskrivljenja tiskanog oblika. Osim toga, komplicirano je održati stabilnost 3D tiskanog oblika tijekom naknadnog procesiranja (Liu i sur., 2017). Kako bi se 3D oblici uspješno mogli graditi, bitno je u potpunosti razumijeti svojstva materijala i tehnologije (Liu i sur., 2017, Golubić, 2021).

### 2.1.2. Mehanizam tiskanja (ekstruzije)

Postoje tri mehanizma ekstruzije kod 3D tiskanja hrane, a to su ekstruzija pomoću puža, ekstruzija pomoću komprimiranog zraka te ekstruzija na bazi šprice. Ekstruzija pomoću puža izvedena je tako da se materijal umeće u spremnik koji ima široki otvor na vrhu, a puž, koji se pokreće djelovanjem motora, kroz usku cijev kontinuirano odvodi materijal do mlaznice za ekstrudiranje te kroz tu mlaznicu prolazi materijal. Ovaj mehanizam tiskanja nije pogodan za materijale velike viskoznosti i mehaničke čvrstoće (Liu i sur., 2017). Kod ekstruzije pomoću komprimiranog zraka, obavezno je korištenje pneumatske pumpe koja potiskuje materijal kroz mlaznicu, a ovaj mehanizam ekstruzije primjenjuje se za tiskanje tekućih materijala i materijala niske viskoznosti. Pneumatska pumpa ima sposobnost pokretanja više ekstruzijskih glava 3D tiskača istovremeno, pomoću regulacijskih ventila. Ekstruzija na bazi šprice se provodi tako da se materijal za tiskanje umetne u špricu, a motorom se pokreće sam proces ekstruzije. Ekstruzija na bazi šprice je mehanizam pogodan za tiskanje materijala velike viskoznosti i velikom mehaničkom snagom i koristi se za izradu kompleksnih trodimenzijskih oblika (Liu i sur., 2017). Svaki od ovih mehanizama ima svojih prednosti i nedostataka. Recimo, prednost ekstruzije pomoću puža u usporedbi s preostala dva mehanizma ekstruzije je kontinuirano dovodjenje materijala čime se uvelike ubrzava i olakšava proces 3D tiskanja. S druge strane, kod ekstruzije pomoću komprimiranog zraka i pomoću šprice, prehrambeni materijal nije u doticaju s mehaničkim komponentama 3D

pisača što je velika prednost nad mehanizmom ekstruzije pomoću puža.

Na Slici 1. ispod, prikazani su mehanizmi tiskanja na principu ekstruzije i to redom: a) mehanizam ekstruzije na bazi šprice, b) mehanizam ekstruzije na temelju komprimiranog zraka i pod c) mehanizam ekstruzije na bazi puža.



**Slika 1.** Mehanički mehanizmi ekstruzije u 3D tiskanju hrane (Sun i sur., 2018)

## 2.2. 3D TISAK HRANE OD ŽITARICA

Žitarice su biljne vrste iz porodice trava (Poaceae) u koje se ubraja: zob, raž, pšenica, ječam, kukuruz, riža, proso, sirak i pšenoraž (tritikale) te heljda iz porodice dvornika (Polygonaceae). Proizvodi od žitarica proizvodi su koji se dobivaju daljnjom obradom ili preradom očišćenih žitarica, a namijenjeni su za daljnju proizvodnju i/ili za krajnjeg potrošača. (Pravilnik, NN 81/2016).

Ovisno o namjeni, sastavu, vrsti i osobinama tehnološkog procesa, proizvodi od žitarica se dijele na mlinske proizvode; gotove proizvode od žitarica; mješavine za pekarske proizvode; pekarske proizvode, tjesteninu, tijesto i proizvode od tijesta te na fine pekarske i srodne proizvode.

Za 3D tisak bitno je odabrati materijale s odgovarajućim fizikalnim i kemijskim svojstvima kao što su veličina čestica te reološka svojstva. Mlinski proizvodi dobivaju se od očišćenih, oljuštenih i pripremljenih žitarica, postupcima usitnjavanja, odnosno mljevenja i njihovog razvrstavanja. Mljevenje može biti tradicionalno, ali se razvijaju i inovativne metode mljevenja poput kriogenog. Osim toga, bitno je odabrati materijale tako da lako mogu

istjecati kroz sapnicu 3D tiskača, te da imaju sposobnost održavanje oblika tijekom i nakon tiskanja. Nadalje, komplicirano je održati stabilnost 3D tiskanog oblika tijekom naknadnog procesiranja, postoji mogućnost iskrivljenje i izobličenja pod utjecajem temperature pečenja. Uspješnim 3D tiskanim oblikom se smatra onaj čije se tijesto može lako istisnuti i ima sposobnost održavanja oblika nakon 3D tiskanja, te nakon termičke obrade. Nažalost, vrlo je malo materijala koji se izravno mogu koristiti za 3D tisak hrane, većina materijala zahtjeva predobradu kao što je mljevenje, priprema tijesta i sl. (Grgić, 2020).

### 2.2.1. Kriogeno mljevenje

Kriogeno mljevenje je tip ultra finog mljevenja kojim se uz pomoć kriogene obrade postiže se veličina čestica od 50  $\mu\text{m}$ , što bi se tradicionalnim mljevenjem postiglo tek nakon nekoliko ponavljanja (Kalia i Fu, 2013). Kriogena obrada označava jednokratnu i trajnu obradu materijala na vrlo niskim temperaturama koja rezultira poboljšanjem fizikalnih i mehaničkih svojstava materijala (Kalia i Fu, 2013). Ovaj se proces odvija na temperaturi od  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  koja se postiže upotrebom kriogena, i to tekućeg dušika. Osim dušika, koriste se još i tekući helij, tekući neon, tekući kisik i tekući argon. Iako relativno jeftina metoda obrada materijala, ona poboljšava kemijska i fizikalna svojstva materijala. Uzorak se pri ovako niskim temperaturama lakše melje jer postaje lomljiviji (Wilczek i sur., 2004). Primjena kriogenog mljevenja je vrlo široka, materijali koji se ovako mogu obraditi su širokog spektra: prehrambeni materijali, metali, legure, polimeri, keramika itd. U prehrambenoj industriji se koristi za proizvodnju bilja i začina kao i za proizvode na bazi žitarica (Benković et. al., 2018).

### 2.2.2. Reološka svojstva tijesta

Reologija je znanstvena disciplina koja proučava deformacije i karakteristike tečenja materijala pod utjecajem vanjskih sila. Tijesto je viskozno-elastični materijal koji pokazuje elastična i viskozna svojstva, odnosno, nakon prestanka djelovanja sile, deformacija se smanjuje, a struktura materijala se samo djelomično ponovno uspostavlja (Lelas, 2006; Grgić 2020). Praćenje reologije tijesta važno je za određivanje namjene brašna i osiguravanje konzistentne kvalitete proizvoda. Deformacija se definira kao promjena oblika i dimenzije nekog materijala pod utjecajem sile, a tečenje kao kontinuirana promjena deformacije s

vremenom (Lovrić, 2003; Grgić, 2020). Reološka su svojstva tijesta stoga ovisna o vremenu i naprežanju. Ako je deformacija nastane nakon djelovanja sile, govorimo o elastičnosti materijala, a ako nastane deformacija koja je trajna govorimo o plastičnosti materijala. Plastičnost i elastičnost su svojstveni krutinam materijalima, dok je viskoznost svojstvena tekućim materijalima. Na reološka svojstva materijala utječu temperatura, tehnološki proces te kemijski sastav. Temperatura je izuzetno bitan čimbenik koji utječe na reološka svojstva tijesta. Poznato je kako se povećanjem temperature smanjuje viskoznost kapljevine, a povećava viskoznost plinova (Lelas, 2006) te je stoga temperaturu tehnološkog procesa potrebno kontrolirati i održavati konstantnom.

### 2.2.3. Procesi obrade nakon 3D tiskanja

Jedan od glavnih problema 3D tiskanih proizvoda principom ekstruzije jest održavanje stabilnosti oblika tijekom toplinske obrade, npr. pečenja. Tijekom toplinske obrade događaju se kemijske reakcije, kao i fizikalne promjene kao što su denaturacija proteina, smanjenje udjela vode, promjene boje, promjene volumena, promjena teksture i promjena hranjive vrijednosti proizvoda. Glavna dva načina za održavanje 3D oblika tijekom i nakon naknadnih procesa obrade su kontrola i modificiranje receptura, te dodavanje aditiva (Lipton i sur., 2010; Grgić, 2020). Trenutno se većina istraživanja usmjerila na razvoj materijala za tisak te kontrolu parametara tiska radi poboljšanja točnosti tiska i kvalitete proizvoda. Recepture se razvijaju prema stanjima i svojstvima materijala, tako da smjesa ima odgovarajuću reologiju, odnosno da se lako istiskuje iz mlaznice, te odgovarajuća mehanička svojstva za održavanje vjernosti oblika 3D tiskanog oblika. S druge strane, utjecaj metoda prethodne i naknadne obrade na 3D tiskanoj hrani nisu toliko uključeni u istraživanja a upravo to su glavni čimbenici koji utječu na točnost trodimenzijskog tiska hrane i stabilnost tiskanih oblika (He i sur., 2019). Danas se smatra da se sposobnost tiskanja i stabilnost 3D tiskanog oblika mogu postići kontrolom kemijskih, fizikalnih, reoloških, strukturnih i mehaničkih svojstava materijala (Godoi i sur., 2016, Grgić, 2020). Predobrada prehrambenih materijala te naknadna obrada 3D tiskanih oblika su glavni čimbenici koji utječu na točnost trodimenzijskog tiska hrane i stabilnost tiskanih oblika (He i sur., 2019).

## 2.3. SNACK PROIZVODI

Danas se živi užurbanim načinom života te se u skladu s tim razvija i prehrana ljudi pri čemu dolazi do razvoja hrane poput snack proizvoda. Snack proizvod je definiran kao hrana koja se konzumira između tri glavna obroka u danu - doručka, ručka i večere (McCarthy, 2001; Golubić, 2021). Većina se snack proizvoda ubraja u skupinu gotove hrane, koja je popularna među potrošačima radi prikladnosti za konzumaciju i jednostavne pripreme. Uredbom (EZ) br. 2073/2005 gotova hrana definirana se hranom koju je proizvođač namijenio izravnoj konzumaciji ljudi bez potrebe za toplinskom ili nekom drugom obradom koja je učinkovita za uklanjanje ili smanjivanje razine mikroorganizama na prihvatljivu razinu mikroorganizama. Snack proizvodi se dijele u više kategorija, prirodni proizvodi kao npr. orašasti plodovi, krumpirov čips te ispućane kokice ubrajaju se u prvu generaciju, snack proizvodi druge generacije u koje je ubrojena većina snack proizvoda, snack proizvodi treće generacije, drugog naziva poluproizvodi ili peleti (proizvodi s više komponenti koji se kuhaju ekstruzijom) (Riaz, 2016; Golubić, 2021). U drugu kategoriju uključeni su snack proizvodi od jednog sastojka te proizvodi jednostavnog oblika poput kukuruznog čipsa, flips proizvoda i svih proizvoda direktno ekspanziranih. Budući da je konzumacija snack proizvoda sve češća, tržište zahtjeva složen i raznovrsan izbor istih. Raste potražnja potrošača za specifičnim karakteristikama snack proizvoda, kao što je smanjen udio masti, soli i šećera, te veći udio prehrambenih vlakana i bioaktivnih komponenti (Crofton i Scannell, 2020; Golubić, 2021).

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

#### **3.1. Materijali**

Radni materijal u ovome istraživanju predstavljala je smjesa brašna i pomoćnih sirovina od kojih je napravljeno tijesto namijenjeno za 3D tisak snack proizvoda, prema recepturi prikazanoj u tablici 1.

##### Brašna:

1. Kukuruzno brašno (mlin Pukanić, Hrvatska)
2. Proseno brašno (Bezgluten Sp. z o. o., Poljska)
3. Laneno brašno (OPG Siladi, Hrvatska)



4. Brašno batata (VG Fryer d.o.o., Hrvatska)
5. Proteini riže (Nutrigold, Europska unija)

Pomoćne sirovine:

1. Ulje (Omegol)
2. Sol (Paška)
3. Prašak za pecivo (Dolcela)
4. Vodovodna voda

### 3.2. Metode

#### 3.2.1. Mljevenje

Aparatura i pribor:

1. Kriomlin (CryoMill, Retsch, Austrija)
2. Posuda za mljevenje na kriomlinu (6 mm i 22 mm)
3. Kugle za mljevenje
4. Kistovi
5. Špatule

Postupak rada:

Sva brašna, osim proteina riže, melju se na kriomlinu prije uporabe. Uzorak brašna (10 g) stavi se u posudu za mljevenje. Proseno, kukuruzno i brašno batata se melju sa jednom velikom kuglom. Laneno brašno se melje sa 6 malih kuglica. Program mljevenja se sastoji od jednog ciklusa mljevenja koji se sastoji od predhlađenja uzorka u struji tekućeg dušika u trajanju od 2 min i provodi se pri frekvenciji 5/s, nakon čega slijedi mljevenje u trajanju od 8 min pri frekvenciji 30/s. Po završetku mljevenja, posuda za mljevenje se čisti od finog praha uzorka uz pomoć kistova te se uzorci brašna pohranjuju u hladnjaku do daljnje analize.

#### 3.2.2. Homogenizacija

Aparatura i pribor:

1. Turbula (WAB, Willy A. Bachofen Maschinenfabrik Basel, proizvedena u Švicarskoj)
2. Posuda za Turbulu volumena 1L

### Postupak rada:

Nakon kriomljevenja, sva usitnjena brašna se izvažu prema recepturi u tablici 1 te se homogeniziraju korištenjem Turbule prije dodavanja pomoćnih sirovina za pripremu tijesta. Posuda volumena 1 L dopuni se smjesom brašna do pola volumena, te se gubicama pričvrsti na Turbulu i homogenizira tijekom 10 min.

#### 3.2.3. Priprema tijesta za 3D tisak

### Aparatura i pribor:

- 1 ručni mikser (Gorenje, Slovenija)
2. laboratorijska vaga (Kern, Njemačka)
3. laboratorijske čaše (250 mL)
4. menzura (100 mL)

### Postupak rada:

Nakon homogenizacije na Turbuli, praškastoj smjesi dodaju se ostali sastojci prema recepturi navedenoj u Tablici 1. Takva smjesa miješa se u plastičnoj laboratorijskoj čaši 3 minute ručnim mikserom na brzini 2-3.

**Tablica 1.** Receptura smjese namijenjene za 3D tisak snack proizvoda

Sastojak	Udio	
Brašno (% ukupnog brašna)	Kukuruzno brašno	71,5
	Proseno brašno	28,5
Ostali sastojci (% mase brašna)	Laneno brašno	8,9
	Brašno batata	13,5
	Izolat proteina riže	62,5

Praškastoj smjesi se (na masu praškaste smjese) doda 2 % praška za pecivo, 1% soli, 20 % Omegol ulja i 97,5% vode.

#### 3.2.4. 3D tisak

### Aparatura i pribor:

1. špatule

2. laboratorijske čaše
3. šprica za 3D tiskač
4. Mlaznica promjera 1 mm
5. 3D tiskač (FoodBot D2 Multi Ingredient Dual Head Food 3D Printer, Changxing Shiyin Technology Co., Ltd., Kina)

Postupak rada:

Pripremljeno tijesto puni se u špricu 3D tiskača pomoću špatule. Šprica je plastična i graduirana, a punjena je na otprilike polovicu volumena (30 mL). Na napunjenu špricu se stavlja plastična mlaznica promjera 1 mm. Napunjena šprica sa sapnicom se umeće u ekstruder 3D tiskača (ekstruder 1). Tiskač se pripremi za tiskanje kalibracijom visine. U izborniku tiskača odabere se G kod željenog oblika za tiskanje, koji je u ovom slučaju bio Roundflower1. Tiskanje se provodilo pri 4 različite temperature ekstrudera: pri sobnoj temperaturi 26 °C, 30 °C, 55 °C i 80 °C. Za svaku temperaturu provodile su dvije paralele, odnosno tiskanje iz dvije zasebne šprice pri istoj temperaturi. Iz svake šprice tiskano je 5 snackova te je svakom uzorku zabilježen redni broj i temperatura. 3D tiskanje jednog tjestenog komada Roundflower 1 traje 10 minuta. U Tablici 2 navedene su oznake za pojedine uzorke.

**Tablica 2.** Oznake uzoraka za 3D tisak

OZNAKE TRETMANA	Temperatura ekstrudera	Redni broj šprice/paralele
26A	26	1
26B	26	2
30A	30	1
30B	30	2
55A	55	1
55B	55	2
80A	80	1
80B	80	2

### 3.2.5. Zamrzavanje tijesta snack proizvoda

Aparatura i pribor:

1. zamrzivač (Beko, Turska)

2. ravna čvrsta podloga ( rupičasti metalni pleh za pečenje)

3. pekarski papir za pečenje

Postupak rada:

Nakon završetka tiskanja, svaki od uzoraka je izvagan i označen rednim brojem izlaska. Nakon toga uzorci su zamrzavani i to na način da su na pekarskom papiru poredani na ravnu plohu i tako pohranjeni u zamrzivač. Bitno je da su uzorci na ravnoj podlozi i na dovoljnoj udaljenosti jedan od drugoga, kako se ne bi oštetili ili deformirali. Takvom, zamrznutom uzorku mjerene su dimenzije načinom koji je opisan u poglavlju 3.2.8.

### 3.2.6. Pečenje snack proizvoda

Aparatura i pribor:

1. Etažna peć tip EBO 64 - 320 IS 600 (Wiesheu Wolfen GmbH, Njemačka)

2. Metalni pleh za pečenje sa perforacijama

3. Pekarski papir za pečenje

Postupak rada:

Uzorci se nakon odmrzavanja pri sobnoj temperaturi u trajanju 1 h poslažu na pekarski papir za pečenje koji se nalazi sa metalnom plehu za pečenje sa perforacijama te umeću u predgrijanu pećnicu na program pečenja u trajanju od 18 minuta, bez dovoda zraka i bez naparavanja.

Parametri pečenja su sljedeći:

- Temperatura predgrijavanja gornjeg grijača: 200 °C
- Temperatura predgrijavanja donjeg grijača: 160 °C
- Temperatura pečenja gornjeg grijača: 160 °C
- Temperatura pečenja donjeg grijača: 140 °C

### 3.2.7. Mjerenje dimenzija tijestениh komada i snack proizvoda

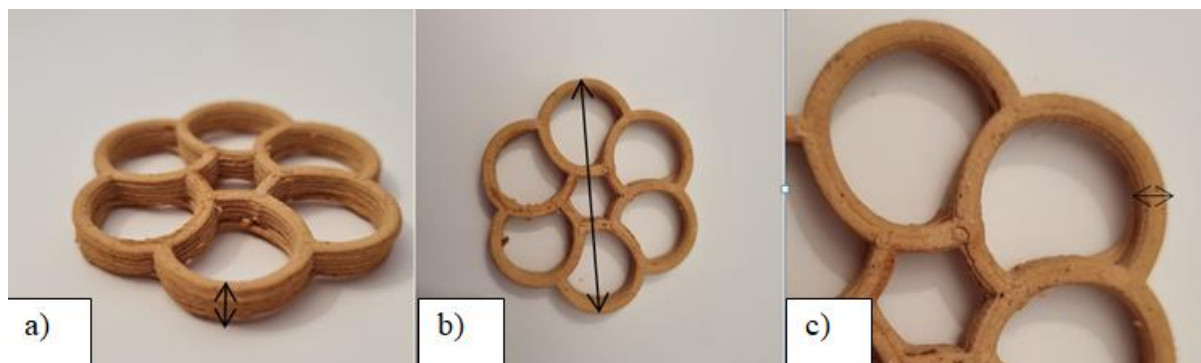
Aparatura i pribor:

1. kaliper (Meba, Zagreb)

Postupak rada:

Nakon zamrzavanja tijestениh komada u minimalnom trajanju od 24 sata, te ponovno nakon pečenja, uzorcima je potrebno izmjeriti dimenzije kaliperom. Mjere se tri dimenzije: visina,

širina, te debljina gornje linije. Mjere se izražavaju u centimetrima. Na Slici 2. je prikazan način mjerenja dimenzija i to redom: a) visina, b) širina i c) debljina gornje linija.



**Slika 2.** Prikaz načina mjerenja dimenzija snack proizvoda (vlastita fotografija)

Iz ovako dobivenih podataka, moguće je izračunati preciznost tiska te odstupanja od predviđenih dimenzija. Preciznost 3D tiska izračunata je prema sljedećoj jednadžbi (Keerthana et al., 2020):

$$\text{Preciznost 3D tiska (\%)} = \left( \frac{D_{wt}}{D_{pn}} \right) \times 100 \quad [1]$$

gdje je  $D_{wt}$  promjer širine na vrhu 3D tiskanog oblika, a  $D_{pn}$  promjer mlaznice za tisak (cm).

### 3.2.8. Vaganje gotovih snack proizvoda

#### Aparatura i pribor:

1. laboratorijska tehnička vaga (Kern, Njemačka)
2. računalni program Microsoft Office Excel, verzija 2010

#### Postupak rada:

Nakon tiskanja se tijestanim komadima, isto kao i nakon pečenja, snack proizvodima određuje težina na laboratorijskoj tehničkoj vagi. Iz podataka dobivenih vaganjem određuje se gubitak mase pečenjem i takvi se podaci dalje statistički obrađuju. Gubitak mase izražen je pomoću sljedeće formule (Habuš et al., 2021):

$$\text{Gubitak mase pečenjem (\%)} = \left( \frac{m_{pd} - m_{bs}}{m_{pd}} \right) \times 100 \quad [2]$$

gdje je  $m_{pd}$  masa 3D tiskanog tijesta, a  $m_{bs}$  masa pečenog snack proizvoda.

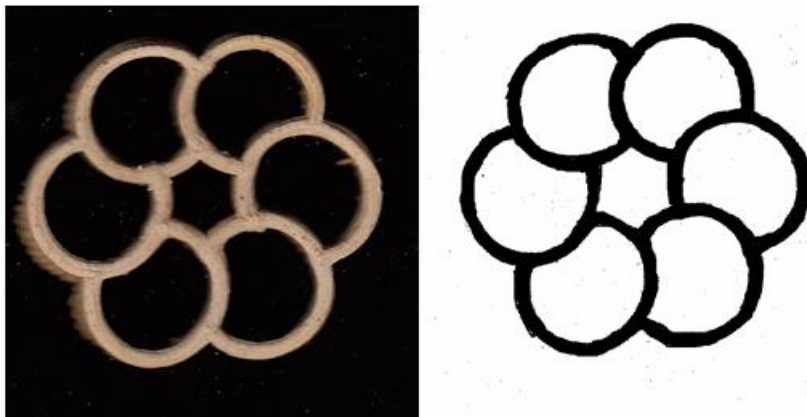
### 3.2.9. Skeniranje gotovih snack proizvoda i obrada fotografija

#### Aparatura i pribor:

1. skener (Canon, Japan)
2. računalni program Image J (Java program)
3. program Microsoft excel

#### Postupak rada:

Nakon vaganja, gotovim snack proizvodima mjere se dimenzije prema postupku opisanom u poglavlju 3.2.7. Osim toga, snack proizvodi se i skeniraju na crnoj podlozi te pohranjuju na računalu. Takve dobivene fotografije se dalje obrađuju u programu ImageJ koji omogućava dobivanje binarnih fotografija iz kojih se očitava zastupljenost crnih i bijelih piksela. Prema njihovom omjeru mogu se izračunati odstupanja u širini snackova međusobno.



**Slika 3.** Fotografija snack proizvoda prije (lijevo) i nakon (desno) obrade u ImageJ programu (vlastita fotografija)

### 3.2.10. Statistička analiza

Za statistička analizu eksperimentalno dobivenih podataka korišten je Microsoft Office Excel, 2010. Statistička analiza provedena je uz pomoć ANOVA testa pri vrijednosti  $p < 0,05$ . Rezultati su izračunati na temelju dva paralelna mjerenja te su prikazani kao srednja vrijednost  $\pm$  standardna devijacija.

#### 4. REZULTATI I RASPRAVA

Cilj ovog rada bio je odrediti utjecaj temperature ekstrudera na kvalitetu 3D tiskanih tjestenih komada i pečenih snack proizvoda. Istražen je utjecaj temperature ekstrudera na preciznost ispisa, deformacije tiskanog proizvoda prije i nakon pečenja obzirom na G kod izabranog oblika, te utjecaj na gubitak vode pečenjem.

Odabrane su četiri temperature ekstrudera pri kojima će se provoditi ispitivanje: 26, 30, 55 i 80 °C. Temperatura od 26 °C predstavlja sobnu temperaturu, odnosno tisak bez zagrijavanja ekstrudera. Kod ostale tri temperature, ekstruder je zagrijavan na zadanu temperaturu. Do 80 °C još ne dolazi do potpune želatinizacije škroba te je cilj bio ispitati da li će smjesa biti povoljna za tisak snack proizvoda i pri toj temperaturi predobrade. U rezultatima nisu prikazani podaci 3D tiska pri 80 °C, budući da ispis pri toj temperaturi nije bio moguć što je prikazano na Slici 4. Na Slici 4 prikazan je uzorak tiskan na temperaturi 80 °C te je vidljivo da je zbog promjene viskoznosti smjese bilo nemoguće dobiti željeni oblik pri zadanoj temperaturi. Kemijske reakcije kao što su značajno bubrenje škroba i agregacija proteina javljaju se pri nižim temperaturama (već pri 55-60 °C) (Mí's et al., 2016) što je dovelo do promjene viskoznosti smjese, te smjesa nije bila pogodna za ispis.



**Slika 4.** Uzorak tiskan pri temperaturi 80 °C, 80A

Također, u rezultatima nisu prikazani podaci uzoraka koji su tiskani prvi. Rezultati mjerenja uzoraka koji su tiskani prvi značajno odskoču od ostalih uzoraka tiskanih pri istoj temperaturi. Uzrok tome je to što je ekstruderu potrebno 10 minuta da postigne radnu

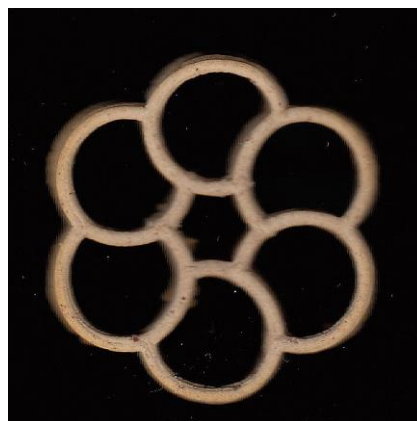
temperaturu. Budući da je i vrijeme tiska jednog oblika je 10 minuta prvi uzorak nije stigao postići zadanu temperaturu.

#### 4.1. PRECIZNOST TISKA

Preciznost tiska jedna je od najvećih izazova proizvodnje hrane tehnologijom trodimenzijskog tiska. Računa se prema formuli [2]. Mehanizam tiskanja tj. mehanizam ekstruzije, svojstva materijala, parametri procesa tiskanja te procesi obrade nakon tiskanja su tehnološki faktori odgovorni za preciznost 3D tiskanog oblika (Liu i Zhang, 2019). Upotrijebljena debljina mlaznice za 3D tisak od 1 mm odabrana je prema radu Habuš et al., 2021. Tijekom izvođenja pokusa, pokušano je tisak provesti pomoću mlaznice promjera 0,85 mm ali takva mlaznica se začepila te nije bilo moguće provesti tisak. Također, pokus je proveden i s mlaznicom promjera 1,5 mm te je tisak s takvom mlaznicom bio neprecizan što je vidljivo na Slici 5.



**Slika 5.** Snack tiskan s mlaznicom promjera 1,5 mm (vlastita fotografija)



**Slika 6.** Uzorak najveće preciznosti tiska (30B; rednog broja 4)(vlastita fotografija)



**Tablica 2.** Prikaz vrijednosti preciznosti 3D tiska

<b>Temperatura ekstrudera pri 3D tisku (°C)</b>	<b>Redni broj tiska</b>	<b>Preciznost tiska (%)</b>
26	2	70 ± 5
26	3	69 ± 3
26	4	74 ± 4
26	5	69 ± 3
30	2	70 ± 2
30	3	73 ± 6
30	4	82 ± 7
30	5	76 ± 6
55	2	75 ± 2
55	3	69 ± 3
55	4	75 ± 12

Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost preciznosti tiska (%) dva paralelna mjerenja provedena pri istoj temperaturi i istom rednom broju tiska ± standardna devijacija preciznosti tiska.

Kao što je moguće vidjeti u tablici 2., srednje vrijednosti preciznosti 3D tiska (%) ne razlikuju se značajno za istu temperaturu. Rezultat koji se značajnije razlikuje od ostalih je 4. tisak pri 30 °C, gdje je preciznost tiska čak  $82 \pm 7 \%$  te je to ujedno i uzorak s najvećom preciznošću printa (Slika 7). Usporedbom ukupnih srednjih vrijednosti preciznosti tiska za određenu temperaturu, moguće je primijetiti da je preciznost tiska slična kod temperatura od 30 te 55 °C, dok su kod 26 °C vrijednosti nešto manje. Habuš i sur., (2021) navode kako je preciznost tiska veća kod niže temperature grijanja ekstrudera (20 °C) u usporedbi s višom (40 °C). Niža temperatura tiska osigurava bolju definiciju tiska i konzistenciju tijesta, dok na višoj temperaturi ima nižu čvrstoću i krutost, ali i veću viskoznost (Varghese i sur., 2020). Ipak, u ovom istraživanju preciznost tiska se ne razlikuje statistički značajno između različitih temperatura što dovodi do zaključka da temperatura ekstrudera ne utječe značajno na preciznost tiska.

## 4.2. GUBITAK MASE PEČENJEM

Tablica 3. Prikaz rezultata gubitka mase pečenjem

Temperatura ekstrudera pri tisku (°C)	Redni broj tiska	Gubitak pečenjem (%)
26	2	48,3 ± 2,9
26	3	48,2 ± 2,7
26	4	48 ± 2,9
26	5	47,2 ± 2,4
30	2	43,8 ± 2,2
30	3	43,0 ± 0,5
30	4	44,5 ± 0,3
30	5	42,9 ± 0,0
55	2	43,1 ± 1,0
55	3	44,2 ± 0,4
55	4	42,5 ± 0,6
55	5	42,1 ± 1,1

Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost ± standardna devijacija za dva paralelna mjerenja.

Iz dobivenih rezultata prikazanih u Tablici 4 vidljivo je da je gubitak pečenjem najveći kod tiskanja pri 26 °C. Gubici pečenjem se statistički značajno ne razlikuju između uzoraka tiskanih pri 30 °C i pri 55 °C. Gubitak mase je najmanji kod uzoraka tiskanih pri 55 °C. Prijašnja istraživanja pokazuju da uzorci koji su obrađeni mikrovalovima pri 70 °C imaju manji postotak gubitka vlage pečenjem od uzoraka koji nisu prethodno obrađeni ili su obrađeni pulsirajućim svjetlom koje je netoplinaska metoda što pokazuje da predobrada tijesta višom temperaturom smanjuje postotak gubitka vlage pečenjem (Golubić, 2021).

## 4.3. DIMENZIJE 3D TISKANOG OBLIKA PRIJE PEČENJA

Rezultati mjerenja dimenzija uzoraka nakon tiska i zaleđivanja a prije pečenja prikazani su u Tablici 4. Mjerenje dimenzija provođeno je s ciljem utvrđivanja statističke značajne razlike u

dimenzijama između uzoraka, te radi utvrđivanja odstupanja u dimenzijama od dimenzija zadanih G kodom. Dimenzije tiskanih oblika predviđene su G kodom 3D tiskača te se eksperimentalno dobivene dimenzije uspoređuju s njima. Dimenzije prema G kodu 3D tiskanog oblika Rounflower2 su sljedeće: širina 5,34 cm; visina 0,94 cm i debljina 0,24.

**Tablica 4.** Prikaz odstupanja dobivenih rezultata od dimenzija predviđenih G kodom

Uzorak	Redni broj tiska	Prosječno odstupanje od visine predviđene G kodom oblika (%)	Prosječno odstupanje od širine predviđene G kodom oblika (%)	Prosječno odstupanje od debljine predviđene G kodom oblika (%)
26A;B	2	0,33 ± 0,04	-0,17 ± 0,14	-0,05 ± 0,02
26A;B	3	0,31 ± 0,01	-0,13 ± 0,04	-0,05 ± 0,01
26A;B	4	0,30 ± 0,01	-0,08 ± 0,02	-0,03 ± 0,01
26A;B	5	0,31 ± 0,01	-0,16 ± 0,26	-0,05 ± 0,01
30A;B	2	0,34 ± 0,04	-0,11 ± 0,05	-0,05 ± 0,01
30A;B	3	0,34 ± 0,01	-0,11 ± 0,01	-0,04 ± 0,02
30A;B	4	0,34 ± 0,07	-0,30 ± 0,19	-0,01 ± 0,02
30A;B	5	0,36 ± 0,05	-0,50 ± 0,04	-0,03 ± 0,02
55A;B	2	0,33 ± 0,02	-0,04 ± 0,04	-0,03 ± 0,01
55A;B	3	0,33 ± 0,00	-0,10 ± 0,04	-0,05 ± 0,01
55A;B	4	0,37 ± 0,01	-0,08 ± 0,06	-0,03 ± 0,04

Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost ± standardna devijacija za dva paralelna mjerenja.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako dimenzije 3D tiskanih komada tijesta odstupaju od onih predviđenih G kodom. Najveće odstupanje od one predviđene G kodom je u visini oblika, tiskani proizvodi su niži od predviđenih. Najmanje odstupanje od predviđene visine imaju uzorci tiskani pri 26 °C, što se može objasniti viskoznošću smjese. Pri manjoj temperaturi, viskoznost smjese je manja i samim time čvršća. Ipak, razlika u odstupanju visine između uzoraka tiskanih pri različitim temperaturama nije statistički značajna. Tiskani uzorci su širi nego što je predviđeno G kodom. Kao i manja visina, veća širina se može objasniti prevelikom viskoznošću smjese. Najveća odstupanja u širini su kod uzoraka tiskanih

pri 30 °C. Ipak, razlike između paralelnih mjerenja širine za istu temperaturu obrade su bile prevelike, što se vidi iz velikih standardnih devijacija, te mjerenje širine radi određivanja međusobne razlike između uzoraka tiskanih pri različitim temperaturama ne možemo smatrati pouzdanim. Najmanju vrijednost odstupanja od G koda ima debljina snacka, osobito kod uzoraka tiskanih pri 30 °C i Odstupanje debljine gornje linije ima nešto veću vrijednost kod uzoraka tiskanih pri 26 °C. Iako se statistički rezultati ne razlikuju značajno, vizualni izgled snackova tiskanih pri 26 °C bio je lošiji u usporedbi s onima tiskanih pri 30 i 55 °C. Pregled literature ukazuje da su i u prethodnim analizama uzorci bez predgrijavanja dali deblje slojeve i lošiji vizualni izgled u usporedbi s uzorcima koji su tiskani s predgrijavanjem ekstrudera, što bi se moglo objasniti njihovom slabijom unutarnjom strukturom (Pulatsu i sur., 2021).

#### 4.4. DIMENZIJE 3D TISKANOG OBLIKA NAKON PEČENJA

Pečenim 3D oblicima dimenzije su izmjerene kaliperom, te su snack proizvodi skenirani i fotografije su obrađene u ImageJ programu. Pomoću odnosa broja piksela (broj crnih piksela/broj ukupnih piksela) određena su odstupanja tiskanih oblika od željenih oblika. rezultatima nisu prikazani oblici tiskani pri 26 °C jer skenirane fotografije nisu bile adekvatne za obradu u ImageJ programu.

**Tablica 5.** Prikaz rezultata dobivenih obradom slika u programu Image J

Uzorak	Temperatura (°C)	Redni broj tiska	% crnih piksela		Prosječna vrijednost % crnih piksela	Prosjek % crnih piksela svih uzoraka pri istoj T
30A;B	30	2	17,2	16,8	17,0	16,8±0,4
30A;B	30	3	17,1	-	17,1	
30A;B	30	4	16,9	15,7	16,3	
30A;B	30	5	16,8	16,4	16,6	
55A;B	55	2	16,6	-	16,6	17,5±0,77
55A;B	55	3	-	17,8	17,8	
55A;B	55	4	17,5	18,6	18,0	

Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost ± standardna devijacija za dva paralelna mjerenja.

Omjer crnih i ukupnih piksela opisuje kako objekt (fotografija) ispunjava 2D prostor. Tijekom pečenja, tijesto se skupljalo što uzrokuje deformacije u obliku proizvoda. Ovo ponašanje moglo bi se objasniti procesom dehidracije, denaturacijom i kontrakcijom proteina te inhibitorni utjecaj želatinizacije škroba na širenje (Lille i sur, 2018). Iskustveno je spoznano da se ovaj oblik deformira izvrtanjem prema gore, što znači da u 2D prostoru, veća deformacija, vodi manjoj širini tiskanog oblika, odnosno manjem broju piksela. Obzirom na nemogućnost obrade fotografija pri 26 °C, ovaj podatak se može upotrijebiti samo za usporedbu utjecaja temperature ekstrudera 30 i 55 °C. Budući da je, zbog pogrešaka pri mjerenju, moguće analizirati samo dva uzorka pri temperaturi ekstrudera 55 °C, analizirana je razlika srednje vrijednosti između uzoraka tretiranih pri različitim temperaturama. Iz rezultata prikazanih u Tablici 5 vidljivo je da je ukupna srednja vrijednost uzoraka tiskanih pri 30 °C statistički značajno manja od one pri 55 °C. Osim toga, pri temperaturi od 55 °C, povećanjem rednog broja tiska, povećava se i udio crnih piksela. Ovakvi rezultati ukazuju na to da se dužim zagrijavanjem ekstrudera smanjuje deformacija tiskanog uzorka nakon pečenja. Moguće je da predobrada pri višoj temperaturi omogućava manju deformaciju tijekom pečenja.

**Tablica 6.** Odstupanje dimenzija snack proizvoda od zadanih G kodom

Temperatura ekstrudera pri tisku (°C)	Redni broj tiska	Odstupanje oblika od visine zadane G kodom (%)	Odstupanje od debljine gornje linije zadane G kodom (%)	Prosječno odstupanje oblika od zadanog G kodom (%)	
				visina	debljina gornje linije
26	2	0,345 ± 0,007	-0,020 ± 0,000	0,350	-0,018
26	4	0,355 ± 0,021	-0,015 ± 0,007		
30	2	0,355 ± 0,021	-0,005 ± 0,007	0,385	-0,005
30	4	0,415 ± 0,007	-0,005 ± 0,021		
55	2	0,38 ± 0,014	0,005 ± 0,007	0,373	-0,015
55	4	0,365 ± 0,021	-0,035 ± 0,007		

Kako je uz pomoć binarnih fotografija bilo moguće analizirati širinu tiskanog i pečenog snack proizvoda, preostalo je na temelju mjerenja kaliperom analizirati utjecaj temperature na visinu i debljinu gornje linije. Kao i kod tjestenih komada, visina značajno odstupa od visine zadane G kodom, što je posljedica neadekvatne viskoznosti smjese. Najmanje odstupanje u visini je kod tretmana pri 26 °C, koji se značajnije razlikuje od tretmana pri 30 i 55 °C. Visine se kod tretmana pri 30 i 55 °C ne razlikuju značajno. Vidljiva je značajna razlika u odstupanje debljine gornje linije kod tretmana pri 30 °C. Kao i kod 3D tiskanih komada tijesta, odstupanje je kod ovog tretmana značajno manje nego pri 26 i 55 °C, a odstupanja su slična kod ova dva tretmana.

## 5. ZAKLJUČCI

Cilj ovog rada bio je utvrditi utjecaj temperature ekstrudera pri 3D tisku na kvalitetu 3D tiskanih tjestenih komada i pečenih snack proizvoda. Istražen je utjecaj četiri različite temperature ekstrudera na karakteristike tiskanog tijesta i pečenog snack proizvoda određivanjem preciznosti tiska, deformacije snack proizvoda te na gubitak mase prilikom pečenja. Na temelju eksperimentalno dobivenih podataka doneseni su sljedeći zaključci:

1. 3D tisak bez grijanja ekstrudera (26 °C) dovodi do tiska lošijeg izgleda proizvoda koji ima veći gubitak mase pečenjem.
2. 3D tisak pri temperaturi ekstrudera od 80 °C nije moguć zbog promjene viskoznosti smjese.
3. Tijestu umetnutom u ekstruder potrebno je 10 minuta kako bi se zagrijalo na zadanu temperaturu ekstrudera.
4. Temperatura ekstrudera ne utječe na preciznost tiska 3D snack tjestenih komada.
5. Povećanjem temperature ekstrudera sa sobne temperature (26 °C) na više temperature, smanjuje se vrijednost gubitka mase pečenjem za oko 5%.
6. Veća odstupanja u dimenzijama 3D tiskanog tijesta (naprema G kodu oblika), dovode i do većih deformacija kod pečenih snack proizvoda.
7. Uzorci se deformiraju tijekom pečenja pri čemu se u odabranom obliku Roundflower najviše mijenja širina snack proizvoda.

8. Pri temperaturi ekstrudera od 30 °C najmanja su odstupanja u debljini gornje linije od dimenzija zadanih G kodom.
9. Tisak pri temperaturi ekstrudera pri 55 °C sličan je tisku pri 30 °C, ali ima povoljniji utjecaj na deformaciju pečenog snack proizvoda.
10. Grijanje ekstrudera pri 3D tisku utječe na kvalitetu pečenog snack proizvoda te su potrebna su daljnja ispitivanja teksture proizvoda tiskanog u temperaturnom rangu od 30 do 55 °C kako bi se utvrdilo koja temperatura daje optimalan proizvod.

## 6. POPIS LITERATURE

Benković M., Novotni D., Voučko B., Čurić D., Ježek D., Čukelj N. (2018) Influence of Cryo-Grinding on Particle Size Distribution of Proso Millet Bran Fraction. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1641065>

Crofton, E., Scannell, A. (2020) Snack foods from brewing waste: Consumer-led approach to developing sustainable snack options. *Brit. Food J.* **122(12)**, 3889-3916. <http://doi.org/10.1108/bfj-08-2018-0527>

Godoi, F. C., Prakash, S., Bhandari, B. R. (2016) 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *J. Food Eng.* **179**, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>

Golubić P., (2021) Fizikalna svojstva trodimenzijski tiskanog snack proizvoda obogaćenog obrađenim pšeničnim posijama, (diplomski rad), Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Grgić T., (2020) Utjecaj sastava tijesta na tehnološke karakteristike trodimenzionalno ispisanih keksa, (diplomski rad), Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Habuš M., Golubić P., Vukušić Pavičić T., Čukelj Mustač N., Voučko B., Herceg Z., Čurić D., Novotni D. Influence of Flour Type, Dough Acidity, Printing Temperature and Bran Pre-processing on Browning and 3D printing Performace of Snacks. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02732-w>

He, C., Zhang, M., Fang, Z. (2019) 3D printing of food: pretreatment and post-treatment of materials. *Crit. Rev. Food Sci.* **60(14)**, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1641065>

Kalia S., Fu S.Y. (2013) Cryogenic Processing: State of the Art, Advantages and Applications, U: Polymers at cryogenic temperatures *Springer, Berlin*. str.1-7. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35335-2>

Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom. *Journal of Food Engineering*, **287**, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110116>

Lelas, V. (2006), Prehrambeno-tehnološko inženjerstvo, Golden marketing - Tehnička knjiga, Zagreb.

Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, **220**, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>

Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., Lipson, H. (2010) Multimaterial food printing with complex internal structure suitable for conventional post processing. *Solid freeform fabrication symposium, Austin*, str. 809-815. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/15245>

Liu, Y., Liang, X., Saeed, A., Lan, W., Qin, W. (2019) Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **54**, 9–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.008>

Liu, Z., Zhang, M. (2019) 3D food printing technologies and factors affecting printing precision. U: Fundamentals of 3D food printing and applications, (Godoi, F. C., Bhandari, B. R., Prakash, S., Zhang, M., ured.), *Elsevier Science Ltd., San Diego*, str. 19-40.



Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., Wang, Y. (2017) 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends Food Sci. Technol.* **69**, 83–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>

Lovrić, T. (2003) *Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva*, Hinus, Zagreb.

McCarthy, J.A. (2001) *The Snack Industry: History, Domestic and Global Status*. U: *Snack Foods Processing* (Lusas, E.W., Rooney, L.,W., ured.), CRC Press, Boca/Raton/London/New York/Washington D.C. str. 29.-35.

Nachal, N., Moses, J., Karthik, K. i Anandharamakrishnan, C. (2019) Applications of 3D printing in food processing: a review. *Food Eng. Rev.* **11**, 123-141. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09199-8>

Pérez, B., Nykvist, H., Brøgger, A. F., Larsen, M. B., Falkeborg, M. F. (2019) Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. *Food Chem.* **287**, 249–257. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.02.090.

Pravilnik o žitaricama i proizvodima od žitarica (2016) Narodne novine 81, Zagreb. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2016\\_09\\_81\\_1823.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2016_09_81_1823.html)

Pulatsu E., Su J.W., Kenderes S. M., Lin J., Vardhanabhuti B., Lin M. (2021) Effects of ingredients and pre-heating on the printing quality and dimensional stability in 3D printing of cookie dough. *Journal of Food Engineering* **294** 110412. <http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>

Riaz, M.N. (2016) *Snack Foods: Processing*. U: *Encyclopedia of Food Grains*, 2.izd.(Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J., ured.), *Academic Press, Oxford*, str. 414-422.

Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., Fiore, A. (2018) Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *J. Food Eng.* **220**, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.025>.

Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015b) An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food Bioprocess Tech.* **8**, 1605-1615. doi: 10.1007/s11947-015-1528-6

Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., Lin, L.Y. (2018) Extrusion based food printing for digitalized food design and nutrition control. *J. Food Eng.* **220**, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>.

Wilczek, M., Bertling, J., Hintemann, D. (2004) Optimised technologies for cryogenic grinding. *Int. J. Miner. Process.* **74**, 425-434. doi : 10.17577/IJERTCONV2IS03057

Yang, Fan, Zhang, M., Bhandari, B. (2015) Recent development in 3D food printing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **57**, 3145-3153. doi: 10.1080/10408398.2015.1094732.

Zhu, S., Stieger, M.A., van der Goot, A.J., Schutyser, M.A.I. (2019) Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour, *Innov. Food Sci. Emerg.* **58**. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102214>

## Izjava o izvornosti

Ja Vedrana Pleš izjavljujem da je ovaj završni rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio/la drugim izvorima, osim onih koji su u njemu navedeni.

Vedrana Pleš<sup>U</sup>  
Vlastoručni potpis