

# Čimbenici koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba kukuruza

---

**Vlajsović, Doris**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:469632>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



# **ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA KINETIKU PROBAVLJIVOSTI ŠKROBA KUKURUZA**

DIPLOMSKI RAD

Doris Vlajsović

Zagreb, rujan, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Hranidba životinja i hrana

# **ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA KINETIKU PROBAVLJIVOSTI ŠKROBA KUKURUZA**

DIPLOMSKI RAD

Doris Vlajsović

Mentor:

doc. dr. sc. Kristina Kljak

Zagreb, rujan, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Doris Vlajsović**, JMBAG 0178107903, rođena 30.07.1996. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

### ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA KINETIKU PROBAVE ŠKROBA KUKURUZA

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studentice*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Doris Vlajsović**, JMBAG 0178107903, naslova

#### ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA KINETIKU PROBAVLJIVOSTI ŠKROBA KUKURUZA

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. doc. dr. sc. Kristina Kljak mentor \_\_\_\_\_

2. doc. dr. sc. Marija Duvnjak član \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. prof. dr. sc. Krešimir Salajpal član \_\_\_\_\_

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Cilj rada .....	2
Zrno kukuruza .....	3
2.1. Općenito o kukuruzu.....	3
2.2. Struktura zrna.....	4
2.3. Hranidbene značajke.....	6
Škrob.....	7
2.4. Škrob .....	7
2.5. Probava škroba .....	9
2.6. Probavljivost škroba i kinetika probavljivosti škroba .....	11
2.6.1. Probavljivost.....	11
2.6.2. Metode određivanja probavljivosti.....	12
2.6.3. Kinetika probavljivosti škroba.....	13
Čimbenici koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba kukuruza.....	15
4.1. Čimbenici strukture zrna.....	15
4.1.1. Amiloza i omjer amiloza/amilopektin .....	15
4.1.2. Svojstva granule škroba.....	19
4.1.3. Zein.....	22
4.2. Vanjski čimbenici .....	23
4.2.1. Veličina čestica meljave .....	23
4.2.2. Termička obrada .....	25
5. Opća diskusija .....	28
6. Zaključak .....	31
7. Popis literature.....	32
Životopis .....	36

## Sažetak

Diplomskog rada studenta/ice **Doris Vlajsović**, naslova

### **ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA KINETIKU PROBAVLJIVOSTI ŠKROBA KUKURUZA**

Kukuruz je najčešća žitarica koja se koristi u hranidbi monogastričnih životinja (svinja i peradi) te visokoproizvodnih preživača. Škrobasta je kultura koja pripada skupini koncentratnih krmiva. Udio škroba u različitim hibridima kreće se između 70 i 75%. Škrob je skladišni polisaharid upakiran u granulama a nalazi se u endospermu. Škrob se prema brzini probavljivosti dijeli na brzoprobavljivi, sporoprobavljivi te rezistentni škrob. Provedena su brojna istraživanja koja istražuju čimbenike koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba. Postoje razlike u građi i strukturi molekula škroba poput sadržaja amiloze i amilopektina, sadržaja s njima povezanih komponenti (lipidi, proteini, minerali) te veličine, oblika i površine granula škroba, koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba. Osim njih, probavljivost škroba može biti promijenjena uslijed obrade zrna što se odnosi na mljevenje (usitnjavanje zrna) te korištenje termičkih procesa poput peletiranja i ekspandiranja.

**Ključne riječi:** kukuruz, škrob, brzina probavljivosti

## Summary

Of the master's thesis – student **Doris Vlaisović**, entitled

### **FACTORS INFLUENCING STARCH DIGESTIBILITY RATE OF MAIZE**

Maize is the most common grain which is used for monogastric animals (swine and poultry) and high-producing ruminants. It is a starchy culture and classified as concentrated feed. The proportion of starch is between 70 and 75% in different hybrids. Starch is a storage polysaccharide packed in granules located in the endosperm. Depending on starch digestibility rate, it is divided into rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch. Many studies investigating factors influencing maize starch digestibility rate have been conducted. Between hybrids, there are differences in starch molecule architecture and structure, as amylose and amylopectin content, the content of components connected with amylose or amylopectin (lipids, proteins and minerals) and starch granule size, shape and surface, which all affect the rate of starch digestibility. Except them, starch digestibility rate can be changed during grain processing, like milling and using thermic treatments such as pelleting and extrusion.

**Keywords:** maize, starch, digestibility rate



## 1. Uvod

Kukuruz (*Zea mays*, L.) je najvažnije energetske krmivo na svijetu. Temeljni je dio obroka mnogih domaćih životinja, a najzastupljeniji je u hranidbi peradi, svinja i visokoproduktivnih preživača. Porijeklom je iz Amerike koja je ujedno i najveći svjetski proizvođač, potrošač i izvoznik kukuruza u svijetu.

Načini upotrebe zrna kukuruza su mnogobrojne. Osim korištenja kukuruza u hranidbene i prehrambene svrhe, zrno kukuruza koristi se i u drugim gospodarskim granama (kozmetika, lakovi, ljepila, boje itd.).

Kukuruz je vrlo varijabilna biljka, a uzgajivači su stvorili brojne kultivare i hibride prilagođene različitim agroklimatskim uvjetima te specifičnim namjenama. Na temelju karakteristika zrna kukuruz je podijeljen na šest tipova. To su redom zuban (*Zea mays indenta*) – oblik zrna u obliku zuba; tvrdunac (*Zea mays indurata*) – tvrdo, okruglo sjajno zrno; kokičar (*Zea mays everta*) – izduženo i zaoštreno zrno; mekunac (*Zea mays amyloacea*) – mekano zrno, bez sjaja, u kojem prevladava brašnjavi endosperm; pljevičar (*Zea mays tunicata*) – zrno obavijeno pljevicom; te šećerac (*Zea mays saccharata*) – zrno sa caklavim endospermom i malo škroba te visokim sadržajem šećera. U hranidbi životinja najviše se koriste zubani pa tvrdunci. Također, stvoreni su različiti hibridi kako bi se poboljšala industrijska ili prehrambena vrijednost pa tako postoje hibridi kukuruza s više ili manje amiloze, s više određenih aminokiselina poput lizina i triptofana, s više ulja, manje fitata, itd.

Zbog svog povoljnog kemijskog sastava, obroci i potpune krmne smjese mogu sadržavati između 40 i 80% zrna kukuruza. Najvažnije svojstvo kukuruza je visoki sadržaj škroba u endospermu zrna (70 – 75%). Prednosti kukuruza u odnosu na ostale žitarice (osim visokog sadržaja škroba) je dvostruko viši sadržaj ulja (4 – 5%), nizak sadržaj vlakana (2 – 3%) te visoka probavljivost organske tvari (88% za svinje). Kukuruz je životinjama izrazito ukusan vjerojatno zbog višeg sadržaja ulja i fizikalnih svojstava (Grbeša, 2016).

Određivanje probavljivosti škroba važan je korak u ispitivanju hranidbene vrijednosti krmiva. Probavljivost škroba često se ispituje *in vitro* metodama koje se izvode u laboratorijskim uvjetima te oponašaju procese koji se događaju u probavnom traktu životinja. Metoda uključuje mješavinu enzima potrebnih za hidrolizu frakcije škroba te lipida i proteina kao dijelova škroba. Nakon provedene analize mjeri se količina nastalog produkta hidrolize škroba – glukoza.

Škrob se u tankom crijevu životinja probavlja različitom brzinom i u različitom obujmu. Prema brzini probavljivosti, škrob je podijeljen na tri frakcije – brzoprobavljivi, sporoprobavljivi i rezistentni škrob – od kojih svaki ima svoje biološko djelovanje. Važno je da se u obroku

životinje nalaze sve tri frakcije škroba jer svaka od njih ima svoju ulogu u stvaranju energije za životinju te energije za stvaranje proizvoda životinje (meso, jaja).

Iskorištavanje škroba od strane životinja ovisi o visini, mjestu probave i brzini, odnosno kinetici njegove probavljivosti, a koji su pak pod utjecajem fizikalnih i kemijskih svojstava samih krmiva ali i njihovih kombinacija u obrocima i kompletnim krmnim smjesama. Kinetika, odnosno brzina probavljivosti, unazad desetak godina dobiva sve više na značenju jer je iskorištenje škroba nekog krmiva, i posljedično rast i razvoj životinja, uvelike ovisan o brzini probavljivosti škroba koja linearno djeluje na glikemijski indeks.

Na kinetiku probavljivosti škroba zrna kukuruza utječu brojni čimbenici (unutarnji i vanjski) koji mogu smanjiti ili povećati brzinu probavljivosti. Unutarnji čimbenici podrazumijevaju svojstva granule škroba, poput molekularne građe, veličine, oblika i površine granula te sa škrobom povezanih komponenata poput lipida, proteina i fosfata. Mljevenje i termička obrada, kao temeljni procesi obrade zrna, najvažniji su vanjski faktori koji mogu odrediti kinetiku probavljivosti škroba.

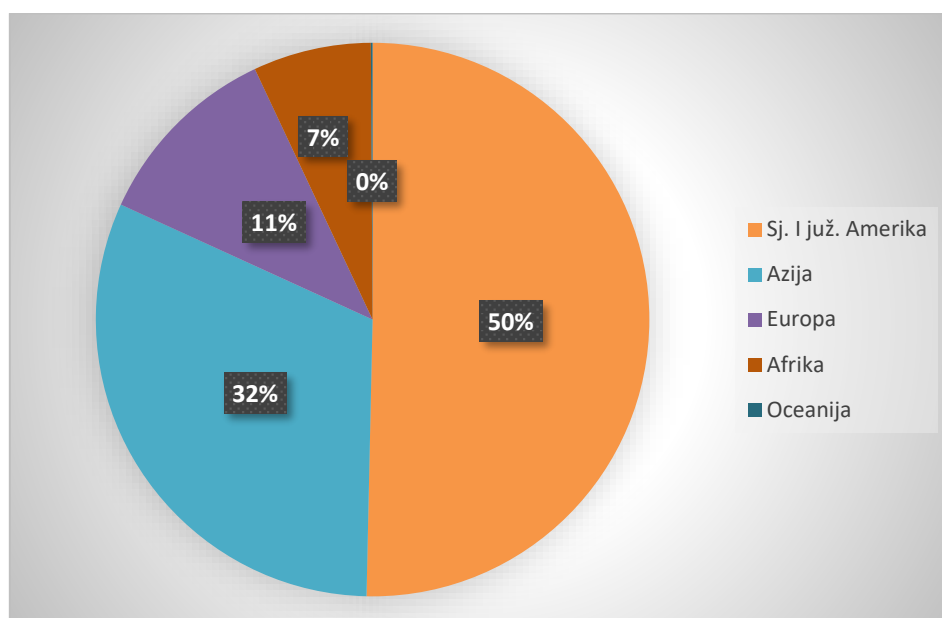
## **1.1. Cilj rada**

Iako je škrob kukuruza gotovo u potpunosti probavljiv u tankom crijevu, postoje različiti čimbenici koji mogu utjecati na njegovu probavu. Čimbenici koji su prepoznati kao presudni u probavi škroba na nju mogu utjecati na način ili da ju smanje ili da ju povećaju ili čak da ju u potpunosti onemoguće. Zbog toga su tijekom godina provedena mnoga istraživanja na temu različitih čimbenika koji utječu na probavljivost škroba, ali i na kinetiku odnosno brzinu probavljivost škroba, kako kukuruza tako i drugih biljnih krmiva. U radu su opisani različiti unutarnji i vanjski čimbenici škroba koji mogu povećati ili smanjiti brzinu probavljivosti škroba kukuruza.

## 2. Zrno kukuruza

### 2.1. Općenito o kukuruзу

Kukuruz predstavlja jednu od najrasprostranjenijih ratarskih kultura. Prema FAO podacima (eng. *Food and Agriculture Organization*) za 2018. godinu, uzgajao se na više od 190 milijuna ha s godišnjim prinosom od 1,15 milijardi tona, što čini prinos od skoro 6 000 kg/ha. Kukuruz se najviše uzgaja u Americi (50,4%) i Aziji (31,5%), a zatim u Europi (11,2%) (FAO, 2018.). Graf 1 prikazuje najveće svjetske proizvođače kukuruza u svijetu po kontinentima. U Hrvatskoj se uzgaja na 235 352 ha, a proizvodnja 2018. bila je 214 275 t (FAO, 2018.).



Graf 2.1.1. Najveći svjetski proizvođači kukuruza u svijetu po kontinentima

Izvor: FAO, 2018.

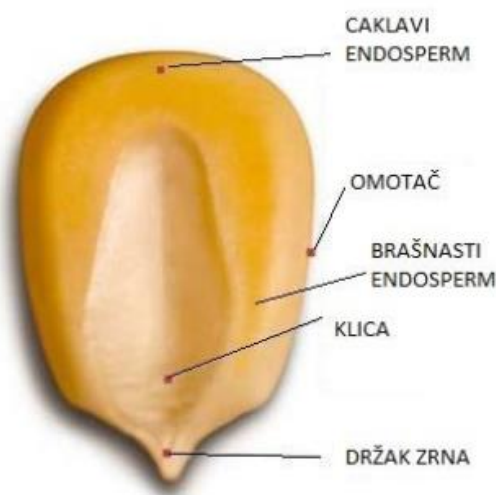
Kukuruz je jednogodišnja biljka iz porodica trava (lat. *Poaceae*). Beadle (1939.; prema Rebourgu i sur., 2003.) navodi kako je kukuruz domesticiran od divlje trave *teosinte* prije 9 000 godina. Prema jednoj teoriji, kukuruz je u Europu uveo Columbo nakon otkrića Amerike 1492. godine. Amerika, točnije Sjedinjene Američke Države (SAD), i dalje prednjače u proizvodnji kukuruza pa je tako prema Grbeši (2016.), SAD u 2014. ostvario prihod od gotovo 62 milijarde dolara, što je više nego proizvodnja svih ostalih žitarica zajedno.

Uporabe zrna kukuruza su brojne. Tradicionalno, kukuruzno zrno koristi se kao hrana ljudi i životinja, te sirovina za brojne industrijske proizvode (npr. kukuruzni sirup) (Grbeša,

2008.). Zrno kukuruza smatra se najvažnijim energetskim krmivom u hranidbi monogastričnih životinja, a to svojstvo najviše duguje velikom sadržaju škroba.

## 2.2. Struktura zrna

Poznavanje građe i strukture zrna kukuruza važno je kako bi se razumio kemijski sastav i hranidbena vrijednost kukuruza. Četiri osnovna dijela koja izgrađuju zrno kukuruza su endosperm, klica, omotač (perikarp) i drška zrna (Slika 2.2.1.). Tablica 2.2.1. prikazuje udio pojedinog dijela u cijelom zrnju. Vidljivo je kako najveći postotak zauzima endosperm (>80%).



Slika 2.2.1. Građa zrna kukuruza  
(prilagođena slika: <http://freshoffthecob.com>)

Tablica 2.2.1. Građa zrna Bc hibrida kukuruza (12% vlage, 32 hibrida kroz 5 godina)

Dijelovi zrna	Prosjek	Standardna devijacija	Najmanje	Najviše
Omotač, %	4,98	0,46	4,00	6,10
Klica, %	11,25	0,92	9,19	13,47
Endosperm, %	83,77	1,08	81,25	85,89
Čaklavi, % od endosperma	63,18	6,06	44,03	77,58
Brašnjavi, % od endosperma	36,82	6,06	22,42	55,97

Izvor: Grbeša (2016.)

Endosperm se sastoji od dugih stanica u kojima se nalaze granule škroba omotane proteinima u kojima dominira skladišni protein kukuruza – zein. U endospermu se nalazi 98%

škroba kukuruza, pa njegov udjel upućuje na sadržaj škroba (Grbeša, 2008.). Endosperm zrna, osim škroba (86 – 89%), čine i proteini (8%), lipidi (0,8%) te ostale tvari. Na slici 2.2.2. prikazana su dva tipa endosperma koji se u različitom omjeru nalaze u zrnu najčešće korištenih tipova kukuruza.



Slika 2.2.2. Caklavi i brašnavi endosperm

Izvor: Grbeša (2016.)

Brašnavi endosperm nalazi se u unutrašnjosti zrna te obavija klicu. Sastavljen je od krupnih i okruglih granula, obavijenih tankom proteinskom ovojnicom koje su okružene zračnim džepovima. Građen je od 90% škroba te malo proteina i ulja. Caklavi endosperm smješten je odmah ispod perikarpa zrna te je odgovoran za čvrstoću zrna. Sastavljen je od granula škroba obavijenih debljim proteinskim omotačem nego granule škroba brašnavog endosperma, te proteina i ulja. Caklavi endosperm sadrži više amiloze i proteina, a manje škroba te jeveći postotak većih škrobnih granula s većim srednjim promjerom škrobnih granula (Zhang i Xu, 2019.). Gayral i sur. (2015.) iznose kako su proteinska tijela veća i brojnija u caklavom nego brašnavom endospermu. S obzirom na omjer caklavog i brašnjavog endosperma, odnosno tvrdoću zrna, zrno kukuruza dijeli se na tvrdunice, polutvrdunice, kvalitetne zubane i zubane (Grbeša, 2016.). Polutvrdunice i kvalitetni zubani sadrže više caklavog od brašnjavog endosperma. U hranidbi životinja najvažniji je zuban pa tvrdunac.

Klica se nalazi iznad drške te čini 10 – 12% mase zrna kukuruza. Sastoji se od skuteluma i embrija te ima ulogu skladišta hranjivih tvari i hormona za embrio. Uglavnom se sastoji od ulja (33%) i proteina (18,4%), te šećera i pepela (10,8%). Od ukupne količine ulja u zrnu, najveći postotak se nalazu upravo u klici (82,1%). Isto vrijedi za minerale i šećer kukuruza, što potvrđuje činjenicu da je klica skladište hranjivih tvari za razvoj embrija.

Omotač (perikarp, košuljica) zrna čini 5% mase zrna kukuruza te se pretežito (90%) sastoji od vlakana. Uloga mu je zaštita zrna od mehaničkih i bioloških oštećenja, a u procesu prerade izdvaja se kao kukuruzne posije.

### **2.3. Hranidbene značajke**

Kukuruz pripada skupini koncentratnih ili krepkih krmiva zbog visokog sadržaja ugljikohidrata, u obliku škroba, te se smatra jednim od najvažnijih energetske krmiva u hranidbi monogastričnih životinja. Kemijski sastav zrna kukuruza pri 12% vlage (Grbeša, 2004.) čini 72,2% dušičnih ekstraktivnih tvari (NET), 12,8% neutralnih detergent vlakana (celuloza, hemiceluloza i lignin), 8,1% sirovih proteina (SP), 3,7% sirovih masti (SM), 3,5% kiselih detergent vlakana (KDV – celuloza i lignin), 2,7% sirovih vlakana i 1,3% pepela. Također, prema Grbeši (2004.), NET se sastoji od 61,9% škroba i 1,7% šećera.

Kukuruz ima najviše energije od svih žitarica zbog najvišeg sadržaja škroba i dvostruko više ulja od ostalih žitarica, niskog sadržaja vlakana te visoke probavljivosti organske tvari. Probavljivost organske tvari zrnjivosti kukuruza za svinje iznosi 88%, dok za perad stvarna metabolizirajuća energija korigirana za dušik, iznosi 15 MJ/kg suhe tvari (ST) (Feedipedia, 2020.). Upravo zbog tih karakteristika, zrno kukuruza je najvažnije krmivo koje se koristi u hranidbi svinja i peradi te predstavlja standard sa čijom se energetskom vrijednošću uspoređuju ostale žitarice. Zrnjivlje kukuruza sadrži 14,46 MJ/kg metaboličke energije za svinje te 13,73 MJ/kg metaboličke energije za perad (Grbeša, 2004.).

Najviši postotni udjeli koje Grbeša (2004.) preporuča u obroku svinja ograničeni su samo za suprasne krmače (do 35%) te tovne i svinje u priplodu (do 40%), dok za perad i ostale kategorije svinja, nema ograničenja.

## 3. Škrob

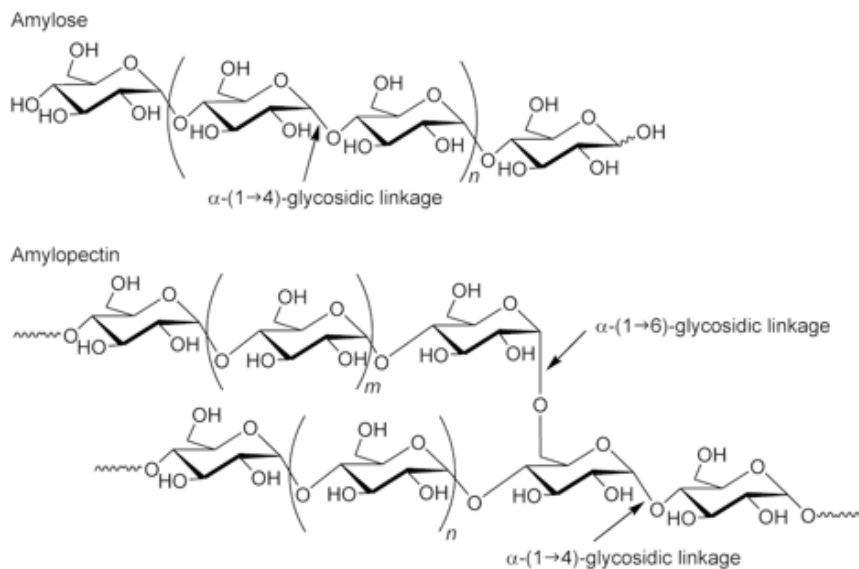
### 3.1. Škrob

Prirodni škrob je polukristalni materijal sintetiziran kao grube sferne granule u mnogim biljnim tkivima (Gallant i sur., 1992.; prema Bach Knudsenu i sur., 2006.) od kojih su žitarice, grašak i grah najvažnija krmiva u hranidbi svinja i peradi (Bach Knudsen, 1997.; prema Bach Knudsenu i sur., 2006.). Najvažniji je izvor energije u hranidbi monogastričnih životinja i visokoproduktivnih preživača. Granule škroba sastavljene su od dva tipa  $\alpha$ -glukana, amiloze i amilopektina, koji zauzimaju otprilike 98 – 99% suhe tvari (Tester i sur., 2004.) te su ugrađeni u relativno hidrofobnu mrežu proteina i okruženi su staničnim stjenkama (Bach Knudsen i sur., 2006.). Singh i sur. (2003.) izvještavaju kako normalni kukuruz sadrži između 22,4 i 32,5% amiloze.

Amiloza je relativno dugi, linearni  $\alpha$ -glukan koji sadrži oko 99% (1 → 4)- $\alpha$ -veza i (1 → 6)- $\alpha$ -veza te se razlikuje u veličini i strukturi ovisno o botaničkom podrijetlu (Tester i sur., 2004.). Lanci amiloze mogu biti u obliku jednostruke ili dvostruke uzvojnice. Amilopektin je razgranati polisaharid sastavljen od stotine kratkih  $\alpha$ -(1, 4) lanaca, koji su međusobno povezani (1 → 6)- $\alpha$ -vezama (Buleon i sur., 1998.). Kemijsku strukturu amiloze i amilopektina prikazuje Slika 3.1.1.. Kao i kod amiloze, veličina, oblik te struktura amilopektina ovise o podrijetlu škroba. Prema Testeru i sur. (2004.), dužina jednog lanca amiloze iznosi oko 200 – 700 glukoznih jedinica, dok su lanci amilopektina sastavljeni od mnogo manje jedinica, uglavnom između 18 i 25. Također prema Testeru i sur. (2004.), lanci amilopektina dijele se prema njihovoj dužini te ponavljajućoj poziciji unutar granule škroba. Vanjski lanci amilopektina (A i B<sub>1</sub>), koji tvore dvostruku uzvojnici najčešće sadrže 12 – 24 glukozne jedinice ovisno o biljnoj vrsti.

Škrob je molekula sastavljena od naizmjeničnih slojeva polukristala te amornog sloja. Tester (1997.) i Smith (2001.) (prema Svihus i sur., 2005.) navode kako se polukristalni sloj sastoji od naizmjenično kristalnog sloja dvostruke uzvojnice  $\alpha$ -glukana debljine 9 nm koje se protežu iz povremenih grana amilopektina te amornog sloja iz točaka grananja amilopektina.

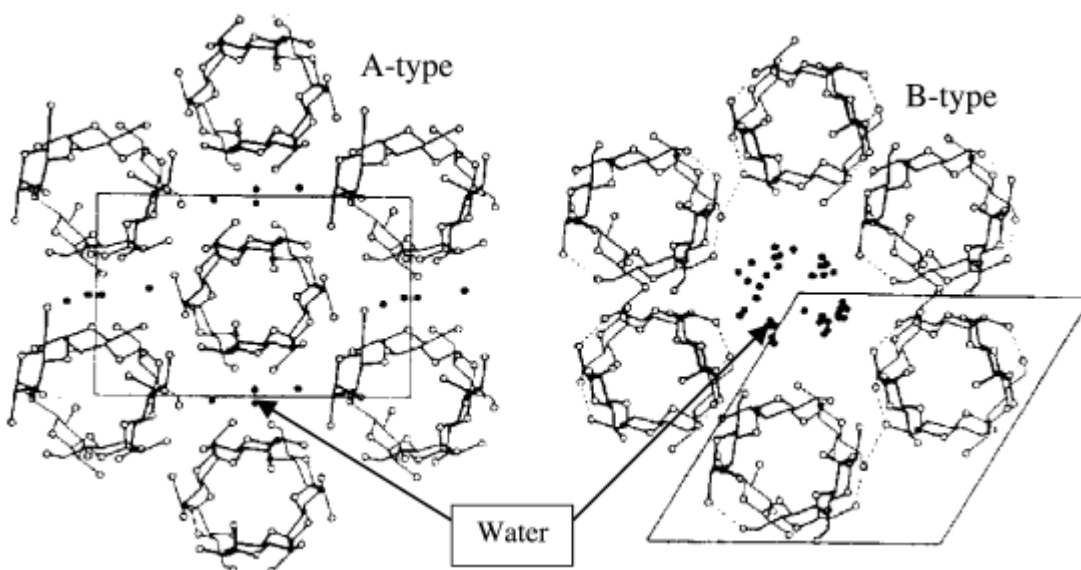
Unutar granule škroba, amilopektin tvori razgranati, spiralni kristalni sustav koji se sastoji od dvostrukih spirala  $\alpha$  (1 → 4) linearnih jedinica isprepletenih s amornim lamelama koje sadrže  $\alpha$  (1 → 6) razgranata područja amilopektina i amiloze (Bach Knudsen i sur., 2006.).



Slika 3.1.1. Amiloza i amilopektin

Izvor: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/58080/bonding-between-amylopectin-and-amylose>

Uz pomoć x-zračenja otkrivena su dva tipa škroba (A i B) te C tip koji je mješavina tipova A i B (Slika 3.1.2.). Žitarice najčešće imaju škrob A tipa. Na temelju istraživanja s x-zračenjem, smatra se da granule škroba posjeduju polukristalni karakter, što ukazuje na visok stupanj orijentacije glukana (Sajilata i sur., 2006.). Isti autori navode kako se 70% mase granule škroba smatra amorfnom, dok se 30% smatra kristalnom. Amilopektin primarno tvori kristalnu strukturu, dok se amorfni dio sastoji najviše od amiloze no uz znatan dio amilopektina.



Slika 3.1.2. A i B tip kristalne strukture škroba

Izvor: Tester i sur. (2004.)



Osim velikih polisaharidnih komponenata, granule škroba sadržavaju male količine proteina, lipida i fosfata (Perez i Bertoft, 2010.). Oni se mogu nalaziti ili na površini granule škroba ili u njezinoj unutrašnjosti. Najvažnija komponenta povezana s granulom škroba su lipidi. Kukuruz sadrži 0,6 – 0,8% lipida vezanih za škrob (Buleon i sur., 1998.). Lipidi se mogu nalaziti na površini škroba ili u unutrašnjosti. Lipidi žitarica koji se nalaze na površini granule škroba sastoje se od triglicerida, glikolipida te slobodnih masnih kiselina, dok se lipidi u unutrašnjosti sastoje od lizofosfolipida (LPL) te slobodnih masnih kiselina. Količina lipida na površini škroba, prema Testeru i sur. (2004.), u pozitivnoj je korelaciji s količinom amiloze u škrobu. Naime, amiloza ima tendenciju praviti komplekse s lipidima (Bulpin i sur., 1982.; Gayral i sur., 2016.).

Svihus i sur. (2005.) prenose kako granule škroba uglavnom sadrže manje od 3 g proteina po kilogramu, a Tester i sur. (2004.) iznose podatak kako pročišćeni škrob sadrži < 0,6% proteina. Integralni proteini imaju veću molekulsku masu nego površinski (~ 50 – 150 i ~15 – 30 kDa) te uključuju i ostatke enzima uključenih u sintezu škroba, ponajviše škrobnu sintazu (Baldwin, 2001., prema Testeru i sur., 2004.). Zein je najzastupljenija proteinska frakcija kukuruza koja ima brojne biološke uloge, pa tako određuje njegov aminokiselinski sastav, tip endosperma, brzinu i visinu probave i razgradnje škroba osobito sadržaj metaboličke energije (Grbeša, 2016.). Na zein otpada 45 – 50 % proteina kukuruza (Shukla i Cheryan, 2001.). Sadržaj zeina ovisi o genotipu i okolišnim čimbenicima poput gnojidbe dušikom te je njegov sadržaj viši u caklavom nego brašnjavom endospermu (Gayral i sur., 2016.). Sastoji se od četiri glavne frakcije ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) od koji je najzastupljenija  $\alpha$  frakcija koja se zajedno s  $\delta$  frakcijom nalazi u središnjem dijelu proteinskih tijela. Ostale dvije frakcije obavijaju  $\alpha$  i  $\delta$  zein. Grbeša (2016.) navodi kako je  $\gamma$  zein povezan s caklavosti zrna i nižom probavljivošću škroba. Isti autor navodi kako u pravilu rani hibridi, polutvrđunci i kvalitetni zubani sadrže više zeina nego tipični kasni hibridi i tipični zubani.

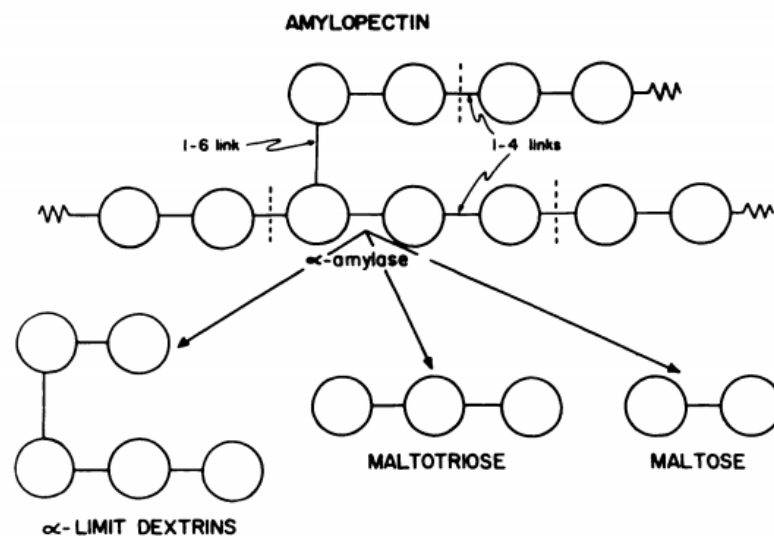
Minerali se u granulama škroba mogu pronaći u vrlo malim količinama (< 0,4%). Uglavnom su to kalcij, magnezij, fosfor, kalij i natrij, no jedino fosfor ima zapaženiju ulogu. On je u granulama škroba prisutan u tri oblika (fosfatni monoester, fosfolipid te anorganski fosfor). Fosfati su uglavnom vezani uz amorfn dio granule škroba.

### **3.2. Probava škroba**

Glavnina probave ili hidrolize škroba kod monogastričnih životinja odvija se u tankom crijevu. Probavu vrše enzimi  $\alpha$ -amilaza, dekstrinaza i glukoamilaza. Neke životinjske vrste imaju aktivnu  $\alpha$ -amilazu u slini, ali ne smatra se da ona ima veliki utjecaj na probavu škroba zbog kratkog vremena zadržavanja u usnoj šupljini (Svihus i sur., 2005.). Nakon kratkog vremena provedenog u usnoj šupljini bolus odlazi u želudac. Parietalne stanice koje se nalaze

u želucu izlučuju klorovodičnu kiselinu (HCl) čiji niski pH (~2,6) inhibira enzim  $\alpha$ -amilazu dospjelu sa česticama hrane iz usne šupljine. Također, u gornjem gastrointestinalnom traktu, lipide vezane za škrob hidrolizira lipaza izlučena iz različitih egzokrinih žlijezda (Dona i sur., 2010.). Kako bi se omogućila pravilna hidroliza lipida škroba, vrlo je bitno stvaranje emulzije kako bi se enzimima olakšalo djelovanje. Emulzija se stvara tijekom žvakanja hrane te tijekom prolaza bolusa kroz probavni trakt.

Nakon želuca, digest dolazi u početni dio tankog crijeva, duodenum. Ovdje započinje prava hidroliza škroba uz pomoć gušteračinog (pankreasnog) soka. Sok gušterače sadrži najvažniju komponentu za probavu škroba, a to je enzim  $\alpha$ -amilaza. Pankreasni sok bitan je jer sadrži i bikarbonate koji su zaduženi za povećanje pH vrijednosti sadržaja dospjelog iz pH kiselog želuca. Konačni proizvodi probave  $\alpha$ -amilazom uglavnom su disaharid maltoza i trisaharid maltotrioza (Gray, 1992.). Oni u tom obliku ne mogu biti apsorbirani kroz sluznicu crijeva te se dalje moraju hidrolizirati do glukoze, a za to potrebni su daljnji enzimatski procesi. Razlog tomu je nemogućnost  $\alpha$ -amilaze da hidrolizira  $\alpha$ -(1  $\rightarrow$  6) vezu unutar molekule škroba. Osim maltoze i maltotrioze, produkata hidrolize  $\alpha$ -amilaze, nastaje još i  $\alpha$ -limitiran dekstrin što je prikazano na Slici 3.2.1.



Slika 3.2.1.. Hidroliza amilopektina  $\alpha$ -amilazom

Izvor: Gray (1992.)

Međuprodukte hidrolize škroba dalje hidroliziraju enzimi koji se nalaze u membrani enterocita (stanica koje izgrađuju tanko crijevo), a to su maltaza-glukoamilaza i sukraza-isomaltaza. Za razliku od  $\alpha$ -amilaze, ova dva enzima hidroliziraju obje veze prisutne u molekuli amiloze i amilopektina. Dona i sur. (2010.) prenose kako se nastali monosaharidi, poput glukoze i galaktoze, apsorbiraju sekundarnim aktivnim transportom preko apikalne membrane enterocita te potom izlaze iz gastrointestinalnog trakta preko bazolateralne membrane u krvotok.

### 3.3. Probavljivost škroba i kinetika probavljivosti škroba

#### 3.3.1. Probavljivost

Probava je proces kojim se razgrađuju hranjive tvari do elemenata koji se mogu apsorbirati i treba ju razlikovati od probavljivosti određene hranjive tvari. Probavljivost je mjera probave i karakteristika krmiva koja pokazuje koliki se dio konzumiranog krmiva probavi. Kako navode Domaćinović i sur. (2015.), probavljivost škroba i drugih nestrukturnih ugljikohidrata kreće se i do 90%. Prema Grbeši (2016.), probavljivost škroba kukuruza u cijelom probavnom traktu peradi, svinja i goveda je 97%, što je gotovo potpuna probavljivost i nema većih razlika između hibrida kukuruza.

Osim količine ukupno probavljivog škroba vrlo je bitan podatak probavljivosti škroba u pojedinom dijelu probavnog sustava. Kod svinja i peradi važno je poznavati probavljivost škroba u tankom i debelom crijevu jer se glavnina probave škroba odvija upravo tamo. Mjesto probave škroba određuje brzinu probavljivosti u crijevima monogastričnih životinja, pa se prema brzini probave škrob dijeli na: brzoprobavljivi, sporoprobavljivi i rezistentni škrob (Grbeša, 2008.).

Mjesto probave brzoprobavljivog škroba (eng. *Rapidly Digestible Starch* – RDS) je u duodeumu te se on probavi unutar prva dva sata od ulaska u tanko crijevo. Važnost brzoprobavljivog škroba je u njegovoj ulozi osiguravanja energije za duodeum i vito crijevo (srednji dio tankog crijeva). Nakon što dio glukoze, nastale probavom brzoragradljivog škroba, podmiri potrebe za energijom tankog crijeva, ostatak odlazi u krvotok te snažno podiže razinu glukoze u krvi te se ona ne može u potpunosti iskoristi za stvaranje jaja ili mesa. Iz tog razloga Grbeša (2016.) navodi kako je poželjno da škrob kukuruza sadrži 82% brzoprobavljivog škroba, 14% sporoprobavljivog i da se 4% škroba ne probavi te služi kao hrana poželjnim bakterijama u debelom crijevu peradi i svinja.

Važnost sporoprobavljivog škroba (eng. *Slowly Digestible Starch* – SDS) je u tome što se on probavi tek kroz četiri sata nakon hranjenja. Mjesto njegove probave je u donjem dijelu tankog crijeva, ileumu. Ukoliko on ne bi postojao, ileum ne bi mogao iskoristiti energiju škroba, već bi iskorištavao energiju proteina što nikako ne bi bilo ekonomski isplativo. Poželjno je da krmne smjese ili potpuna brašnasta hrana sadržavaju 50 g/kg umjereno probavljivog škroba, što znači da kukuruz koji sudjeluje u hrani sa 60% treba sadržavati 83 g/kg ove frakcije (Grbeša, 2016.).

Rezistentni škrob (eng. *Resistent Starch* - RS) je škrob koji izbjegne probavu u tankom crijevu te dolaskom u debelo crijevo postaje hrana poželjnim mliječno-kiselim bakterijama. Bakterije fermentacijom, iz dospjelog škroba, stvaraju kratkolančane masne kiseline (acetat, propionat i butirat) koje opskrbljuju debelo crijevo energijom. Jedan od benefita stvaranja kratkolančanih masnih kiselina je u tome što one smanjenjem pH debelog crijeva inhibiraju razvoj patogenih mikroorganizama te povećavaju apsorpciju hranjivih tvari (Macfarlane i Macfarlane., 2012.; prema Magallanes-Cruz i sur., 2017.). Fuentes-Zaragoza i sur. (2010.) navode četiri razloga nastanka rezistentnog škroba: fizička nedostupnost probavnim enzimima zbog kompaktne molekularne strukture što je slučaj kod žitarica, sjemenki i gomolja; građa granula škroba koja ne dopušta da ih enzimi probave razgrade što je prisutno kod krumpira, banana te kukuruza s velikim udjelom amiloze; termička obrada nakon koje slijedi hlađenje što se događa kod „corn-flakesa“; te genetski modificirani škrob. Kao što je već navedeno, najoptimalnija količina rezistentnog škroba u potpunoj hrani peradi i svinja je 4%.

### 3.3.2. Metode određivanja probavljivosti

Probavljivost hrane ili određene hranjive tvari može se odrediti pokusima te različitim matematičkim izračunima. Za najtočnije podatke koriste se pokusi koji mogu biti *in vivo* i *in vitro*. *In vivo* pokusi podrazumijevaju pokuse na živim organizmima, te se u njima prati količina hrane koju životinja pojede i količina fecesa (urina) koju životinja izluči. Postoji više metoda koje uključuju *in vivo* način određivanja probavljivosti, poput metode eutaniziranja, metode kanuliranja ili ugradnje katetera. No pokusi na živim životinjama, kako zaključuju Zhang i sur. (2015.), su skupi, etički ograničeni te specijalizirani za prehrambena ili klinička istraživanja.

*In vitro* metode podrazumijevaju pokuse u kojima se sva probavljivost odvija u laboratorijskim uvjetima djelovanjem smjese komercijalnih enzima. Uzimajući u obzir vrstu životinje (monogastrične ili preživači) određuje se metoda ispitivanja. Tako se za svinje i perad koristi enzimatska metoda određivanja probavljivosti uz pomoć koje se dobivaju podaci o ukupnoj probavljivosti, ali i podaci za određivanje kinetičkih parametara.

Metoda određivanja probavljivosti škroba za monogastrične životinje uključuje smjesu komercijalnih enzima. Pokus se provodi u 2 koraka. Prvi dio oponaša uvjete u želucu gdje se koristi mješavina klorovodične kiseline i enzima pepsina. U drugom dijelu oponašaju se procesi koji se odvijaju u tankom crijevu koristeći pankreasni sok koji sadrži smjesu enzima amilaze, lipaze i proteaze - pankreatin. Probavljivost škroba se određuje prateći nastajanje glukoze (produkta razgradnje škroba). Glukoza se potom detektira spektrofotometrijski te se mjeri apsorbancija koja je u ovisnosti s koncentracijom produkta u otopini.

### 3.3.3. Kinetika probavljivosti škroba

Kinetika proučava brzine kemijskih reakcija i mehanizme kojima se te reakcije odvijaju. Kod monogastričnih životinja fokus je na kinetici probavljivosti hranjivih tvari u ileumu. Jedan od parametara za izračunavanje kinetike određene reakcije je brzina probavljivosti kojom se dobiva udio probavljive frakcije krmiva ili hranjive tvari krmiva probavljene u određenom vremenu.

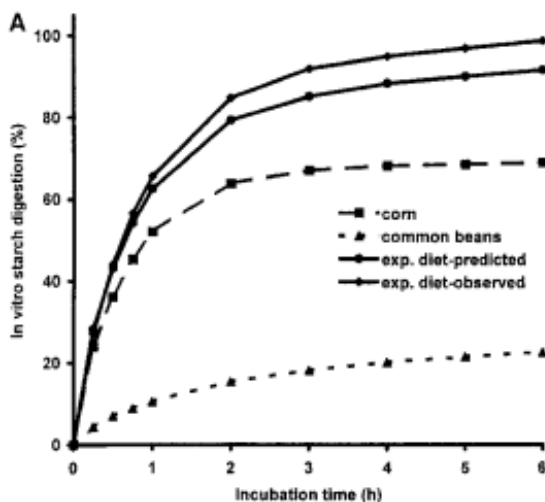
Brzina probavljivosti škroba računa se prema kinetici prvog reda na temelju rasta sadržaja glukoze kao produkta probave škroba tijekom određenog vremena. Za škrob se koristi model probavljivosti s topljivom frakcijom. Jednadžba kinetike prvog reda koja se koristi za izračunavanje brzine probavljivosti škroba prikazana je na Slici 3.3.3.1. pri čemu  $D_t$  predstavlja količinu škroba probavljenog u vremenu  $t$ ,  $S$  predstavlja topljivu frakciju, a  $D$  predstavlja potencijalno probavljivu frakciju škroba koji će se probaviti pri brzini  $k_d$ .

$$D_t = S + D \times (1 - e^{-k_d \times t})$$

Slika 3.3.3.1. Jednadžba kinetike prvog reda

Izvor: Giuberti i sur. (2012.)

U kinetici prvog reda koncentracija produkta raste eksponencijalno s vremenom. U istraživanju Weurding i sur. (2001.) prikazan je eksponencijalan porast glukoze s vremenom (Graf 3.3.3.1.). Između ostalih uzoraka, prikazana je krivulja probavljivosti škroba kukuruza u određenom vremenu.



### Graf 3.3.3.1. *In vitro* probavljivost škroba u odnosu na vrijeme inkubacije

Izvor: Weurding i sur. (2001.)

Weurding (2002.) je proveo istraživanje u kojem su ispitivali utjecaj brzine probavljivosti škroba potpune krmne smjese na performanse brojlera. Najveći prirast brojleri su postigli pri hranidbi smjesom manje brzine probavljivosti škroba ( $1,05 \text{ h}^{-1}$ ), u prosjeku 1465 g, dok je najmanji postignut kod hranidbe smjesom najbrže probavljivosti škroba ( $1,99 \text{ h}^{-1}$ ), u prosjeku 1400 g. Konverzija je također bila bolja kod hranidbe smjesom sa sporijom probavljivosti škroba (prosječno 1,511) u odnosu na smjesu s najvišom brzinom probavljivosti škroba (prosječno 1,544). Iako je konverzija manja kod smjese sa sporijom probavljivosti škroba, brojleri su više dobivali na težini nego kod lošije konverzije što upućuje da su se energija i/ili proteini iskorištavali bolje prilikom hranjenja takvom smjesom. Kako bi testirali hipotezu da smjesa niže brzine probavljivosti škroba povećava učinak proteina, dodan je protein u smjese sa izvorima sporoprobavljivog škroba (sirovi grašak i kukuruz) i brzoprobavljivog škroba (ekspandirani i peletirani grašak i kukuruz). Pilići hranjeni smjesom s brzoprobavljivim škrobom su imali niže konverzije, dok kod pilića hranjenih smjesama sa sporoprobavljivim škrobom nije bilo utjecaja na konverziju. Ovo opažanje potvrđuje da hranidba sa sporoprobavljivim škrobom može poboljšati proteinsku učinkovitost smjese kod brojlera (Weurding, 2002.).

U istraživanju Gutierrez del Alamo i sur. (2009.) u *in vivo* pokusu ispitivan je utjecaj pšenice različitih kultivara i podrijetla na proizvodna svojstva brojlera. Rezultati su pokazali kako se svojstva pšenice razlikuju ovisno i o genetici ( $2,17 - 2,56 \text{ h}^{-1}$ ) i o uvjetima proizvodnje ( $1,96 - 2,56 \text{ h}^{-1}$ ) te time utječu na ekspresiju proizvodnih svojstva brojlera. Najveći rast brojlera utvrđen je kad su brojleri hranjeni potpunim krmnim smjesama s brzinom probavljivosti škroba od  $2,2 \text{ h}^{-1}$ , dok su najlošije performanse brojleri imali pri  $1,8 \text{ h}^{-1}$  iako su u ovoj smjesi mogli utjecati i drugi čimbenici poput probavljivosti sirovog proteina.

## 4. Čimbenici koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba kukuruza

U ovom poglavlju biti će prikazani neki od najvažnijih čimbenika koji utječu na brzinu probavljivosti škroba kukuruza u posljednjih 25 godina. Giuberti i sur. (2014.) smatraju da su najvažniji čimbenici koji utječu na kvantitativne i kvalitativne razlike probavljivosti škroba, sadržaj amiloze, kompleks amiloza-lipidi, morfologija granule, kristalnost, proteinska matrica, caklavost endosperma, zrelost te metode obrade zrna. Isti autori smatraju kako su mjesto, obujam i brzina probave i hidrolize škroba u probavnom sustavu domaćih životinja pod utjecajem unutarnjih i vanjskih faktora te mogu biti međusobno povezana.

### 4.1. Čimbenici strukture zrna

#### 4.1.1. Amiloza i omjer amiloza/amilopektin

Omjer amiloze i amilopektina ovisi o botaničkom podrijetlu škroba pa tako Buleon i sur. (1998.) navode kako škrob najčešćih žitarica ima relativni postotak težine amiloze i amilopektina između 72 i 82% amilopektina te 18 i 33% amiloze. Buleon i sur. (1998.) također navode kako postoje različiti mutirani genotipovi kukuruza, ječma i riže koji sadrže više od 70% amiloze, a postoje i genotipovi, nazvani „waxy“ tj. voštani, koji sadrže manje od 1% amiloze. U pravilu, normalan kukuruz sadržava 25% škroba u formi amiloze, a 75% u formi amilopektina pa porast jedne smanjuje udjel druge forme škroba (Grbeša, 2016.).

Kljak i sur. (2019.) navode da je amilopektin bolji supstrat od amiloze za djelovanje amilaze zbog veće površine po molekuli te zbog razgranatosti lanaca amilopektina umjesto čvrsto vodikovim vezama vezanih molekula glukoze u amilazi, što onda inhibira djelovanje amilaze. Prema tome, sirovi škrob bogat amilopektinom ostvaruje bržu probavljivost nego škrob s puno amiloze (Singh i sur., 2010.). Primjerice, u navedenom istraživanju Kljak i sur. (2019.), hibrid kukuruza s 16,5% amiloze u zrnu ima brzinu probavljivosti škroba  $1,37 \text{ h}^{-1}$  dok hibrid s 20,7% amiloze ima brzinu od  $1,19 \text{ h}^{-1}$ .

U istraživanju Hu i sur. (2004.) promatrana je probavljivost tri tipa riže (Indica, Japonica i hibrid) od kojih je svaki tip imao četiri kultivara različitog sadržaja amiloze (u prosjeku, visoki – 26,4%, srednji – 21%, niski – 13,5% i vrlo niski sadržaj – 0,6%). Brzina probavljivosti škroba kuhane riže raste s opadanjem udjela amiloze bez obzira na tip riže. Primjerice, kod ranih Indica kultivara brzina (redom 26,8, 21,3, 13,2 i 1,1% amiloze) raste u nizu 1,26, 1,74, 5,34 i  $7,5 \text{ h}^{-1}$ . Nadalje, sadržaj rezistentnog škroba povećao se s povećanjem amiloze u istom tipu riže.

U istraživanju Pirgozliev i sur. (2010.) ispitivan je utjecaj različitog udjela amiloze u dodanom škrobu u potpunim krmnim smjesama na proizvodne performanse brojlera. Dodavana su tri različita škroba s obzirom na omjer amiloze i amilopektina. Prvi je bio konvencionalni škrob kukuruza s 25% amiloze i 75% amilopektina, drugi je bio kultivar Hylon VII sa 70% amiloze, te treći škrob koji je imao 47,5% amiloze (mješavina prva dva škroba). Svaka vrsta škroba dodavana je u potpunu smjesu u različitim količinama (0, 20, 40, 60 g/kg). U eksperimentu se određivao unos hrane, masa brojlera, konverzija, viskozitet jejunalnog digesta te pH jejuma. Rezultati su očekivano pokazali kako se povećao unos hrane te masa brojlera hranjenih većom količinom škroba (60 g/kg), međutim nije bilo značajnijih promjena promatranih varijabli s obzirom na omjer amiloze i amilopektina (Tablica 4.1.1.1.).

Tablica 4.1.1.1. Utjecaj različitog omjera amiloze i amilopektina na promatrane varijable

Udio amiloze u dodanom škrobu (g/kg)	Unos hrane kg/brojler	Prirast kg/brojler	Konverzija kg/kg	Viskozitet jejunalnog digesta cP	pH jejuma
250	0,649	0,377	0,580	13,22	6,38
475	0,678	0,391	0,577	9,96	6,47
700	0,708	0,417	0,589	11,94	6,35

Izvor: Pirgozliev i sur. (2010.)

Giuberti i sur. (2012.) proveli su veliko istraživanje o utjecaju različitih svojstava zrna i škroba žitarica na brzinu probave škroba. Ispitala su se svojstva škroba različitog podrijetla (kukuruz, ječam, zob, riža, pšenica, sirak, tritikale, visoko-vlažni kukuruz), oblika (sirovo i tretirano toplinom) te sadržaja amiloze u škrobu (kukuruz i ječam s manje od 10% amiloze). Škrob kukuruza i ječma s malo amiloze (7 g/100 g škroba i 9,8 g/100 g škroba) imali su bržu probavu u odnosu na zrna s normalnim sadržajem amiloze (31,1 g/100 g škroba i 28,9 g/100 g škroba) što je prikazano u Tablici 4.1.1.2. Rezultati ponovno ukazuju na smanjenje brzine probave ukoliko se radi o škrobu s višim sadržajem amiloze.



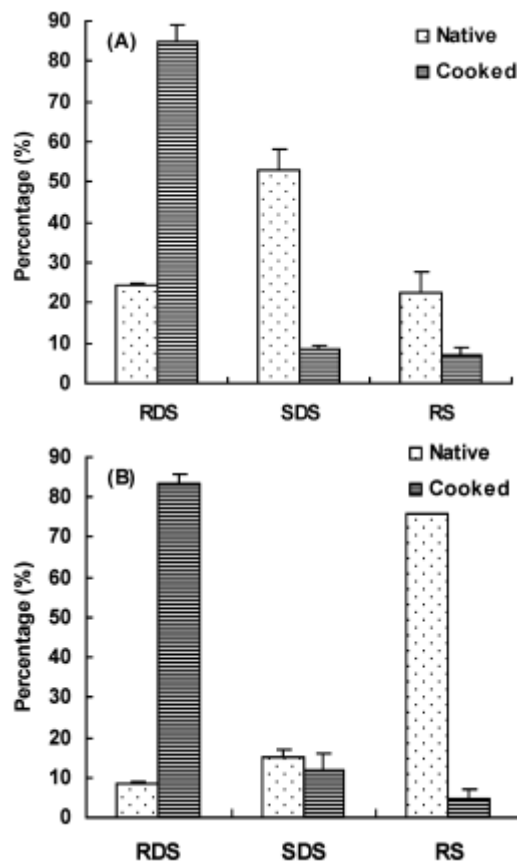
Tablica 4.1.1.2. Sadržaj amiloze u škrobu i parametri kinetike probavljivosti škroba

	Sadržaj amiloze (g/100 g škroba)	Brzina probavljivosti škroba ( $h^{-1}$ )	Očekivani glikemijski indeks
Kukuruz	31,1	1,02	39,5
Ječam	28,9	1,44	51,1
Nisko amilozni kukuruz	7,0	2,1	67,6
Nisko amilozni ječam	9,8	2,7	77,2

Izvor: Giuberti i sur. (2012.)

Dužina lanaca amiloze i amilopektina također ima utjecaj na brzinu probavljivosti škroba. Be Miller i Whitsler (2009.) (prema Magallanes-Cruz i sur., 2017.) podijeli su dužinu lanca amilopektina prema stupnju njihove polimerizacije na kratke lance ( $12 < DP < 20$ ), duge lance ( $30 < DP < 45$ ) i jako duge lance ( $DP > 60$ ). Ustanovljeno je kako se duljine lanaca grana razlikuju između A i B tipa škroba: škrob s dužim lancima grana prikazuje B-tip difrakcijske rendgenske slike, dok oni s kraćim lancima prikazuju A-tip (Jane i sur., 2003.). Isti autori navode kako je škrob A-tipa više podložan djelovanju enzima nego škrob B-tipa. Fina struktura amilopektina, pogotovo A+B<sub>1</sub> lanci, koji formiraju kristalni dio molekule škroba, najviše utječu na sporu probavljivost škroba žitarica. S obzirom da se ogranci amilopektina A tipa lanaca mogu biti rasuti u kristalnoj regiji granula, a ti ogranci mogu stvoriti strukturalne defekte u granule što omogućuju lakši ulazak enzima koji hidroliziraju škrob (Zhu i sur., 2018.)

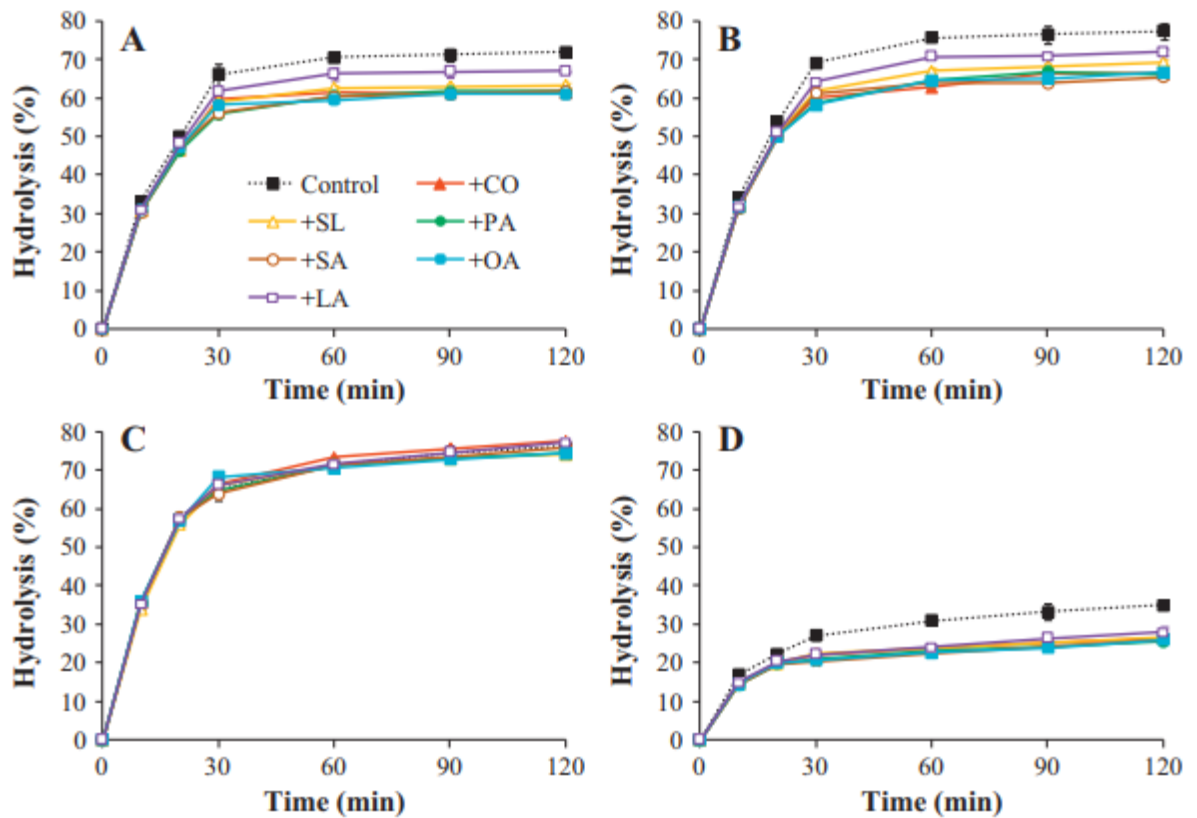
Zhang i sur. (2006.) istraživali su strukturu škroba kao ključan faktor za sporiju probavljivost škroba žitarica polazeći od činjenice kako su prirodne žitarice idealni izvor sporoprobavljivog škroba. U istraživanju se uspoređivao sadržaj škroba žitarica (normalnog kukuruza, voštanog kukuruza, riže i pšenice) te škroba kukuruza (B tipa škroba), prije i poslije kuhanja. Na Slici 4.1.1.1. prikazani su grafovi iz istraživanja. Prvi graf prikazuje udio pojedine frakcije škroba prirodnog i kuhanog normalnog kukuruza (rezultati su bili slični i za ostale žitarice korištene u eksperimentu), a drugi prikazuje iste frakcije za krumpir. Uočljivo je kako se nakon kuhanja izgubila frakcija sporoprobavljivog škroba, a povećala frakcija brzoprobavljivog škroba kod normalnog kukuruza. Zbog toga što proces kuhanja potpuno uništava polukristalnu strukturu granula prirodnog škroba, gubitak sporoprobavljivog škroba, a povećanje brzoprobavljivog škroba upućuje na to kako je kristalna struktura A-tipa škroba žitarica ključna za njihovu sporu probavljivost (Zhang i sur., 2006.). U istraživanju je isto tako potvrđeno kako je škrob tipa A kojeg posjeduju žitarice sastavljen uglavnom od kraćih lanaca amilopektina (A i B<sub>1</sub>), dok je škrob krumpira sastavljen od duljih lanaca (B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>). Velika količina kratkih A lanaca sugerira nakupljanje visećih lanaca ili neispravnih kristala koji pogoduju bržoj početnoj hidrolizi (Zhang i sur., 2006.). Dakle, škrob žitarica s manje uređenom kristalnom strukturom ne samo da ima relativno visoku količinu brzoprobavljivog škroba, već njihova spora probavljivost može biti pod utjecajem uređenosti njihovih kristala (Zhang i sur., 2006.).



Slika 4.1.1.1. Udio pojedinih frakcija (brzoprobavljivi – RDS, sporoprobavljivi – SDS, rezistentni – RS) škroba u normalnom kukuruzu (A) i krumpiru (B) prije i poslije kuhanja  
Izvor: Zhang i sur. (2006.)

Sa škrobom povezane komponente poput spomenutih lipida, proteina i minerala također mogu utjecati na brzinu probave škroba. Kompleks između amiloze i lipida, poput monoglicerida, masnih kiselina, lizofosfolipida i surfakanata, mogu značajno smanjiti brzinu i obujam probave i *in vivo* i *in vitro*, jer se na taj način stvara rezistentni škrob (Ai i sur., 2013.; Hasjim i sur., 2010. prema Zhangu i sur., 2015.). Ai i sur (2013.) ispitivali su utjecaj dodanih lipida na brzinu probavljivosti škroba žitarica. U pokusu je ispitivan utjecaj kukuruznog ulja (eng. *corn oil* – CO), sojinog lecitina (eng. *soy lecithin* – SL), palmitinske kiseline (eng. *palmitic acid* – PA), stearinske kiseline (eng. *stearic acid* – SA), oleinske kiseline (eng. *oleic acid* – OA) i linolne kiseline (eng. *linoleic acid* – LA) na brzinu probavljivosti škroba normalnog kukuruza, tapioke, voštanog kukuruza te visokoamiloznog kukuruza. Svaki lipid dodavan je zasebno u količini od 0,4 g te se zasebno svaka žitarica kuhala s pojedinim lipidom u kipućoj vodenoj kupelji (~95 °C) tijekom osam minuta uz konstantno ručno miješanje kako bi se škrob što bolje želatinizirao. Dobiveni rezultati pokazuju smanjenje postotka hidrolize škroba kod svake

promatrane žitarice osim kod voštanog kukuruza u kojem niti ne postoji veza između amiloze i lipida (Slika 4.1.1.2.).



Slika 4.1.1.2. Brzina enzimske hidrolize kuhanog škroba i škroba kuhanog s 10% lipida; A – normalni kukuruz; B – tapioka; C – voštani kukuruz; D – visokoamilozni kukuruz  
Izvor: Ai i sur. (2013.)

Kompleks amiloze i lipida smanjuje probavljivost škroba iz dva razloga. Direktni utjecaj lipida na smanjenje probavljivosti škroba je taj što lipidi sprječavaju kontakt enzima s površinom granule škroba. Indirektni razlozi su što lipidi sprječavaju bubrenje granule škroba te tijekom obrade zrna kukuruza sudjeluju u reakcijama tijekom mljevenja i želatinizacije.

#### 4.1.2. Svojstva granule škroba

Varijacije u morfologiji škroba poput veličine, oblika i površine, imaju važnu ulogu u potencijalnoj probavi škroba (Giuberti i sur., 2014.). Langhworthy i Deuel (1992.) među prvima su opisali utjecaj veličine granule škroba na njegovu probavljivost. Ispitivao se utjecaj granula

škroba sirove riže te su uočili negativnu povezanost između veličine granula škroba i njegove probavljivosti. Lindeboom i sur. (2004.) iznose kako manje granule škroba (< 10 μm) pšenice i ječma imaju bržu hidrolizu nego granule veće od 10 μm. U istraživanju Kaur i sur. (2007.) dobiveni su isti rezultati za različite veličine granula škroba krumpira. Ispitivana je brzina probavljivosti granula škroba veličine 40 - 65 μm (velike granule), 20 – 40 μm (srednje granule) i 1 – 20 μm (male granule). Stope hidrolize pojedine frakcije (%) iznosile su redom; 0,83, 1,12 i 1,32. Giuberti i sur. (2014.) navode kako probavni enzimi lakše hidroliziraju manje granule škroba u usporedbi s većim granulama škroba istoga izvora. To objašnjavaju manjim omjerom površine prema volumenu kod većih granula škroba što onda može smanjiti površinu za djelovanje enzima. Dhital i sur. (2010.) proveli su istraživanje u kojem je ispitan utjecaj veličine granule škroba kukuruza i krumpira na probavljivost. Smatraju kako je brzina probave veća kod škroba kukuruza zbog manje veličine granula škroba, hrapave površine te pora i kanala na površini granule kukuruza.

Međutim, kada se govori o probavljivosti škroba u matrici hrane poput onog zrna kukuruza. Ukoliko je škrob u matrici hrane, rezultati mogu biti drugačiji. Kljak i sur. (2019.) ispitivali su svojstva osam visokoprinosnih hibrida kukuruza te su rezultati pokazali kako je kukuruz s najmanjim granulama škroba imao najmanji koeficijent probavljivosti što je u suprotnosti s dotadašnjim istraživanjima. U tom slučaju, matrica hrane predstavlja barijeru probavnim enzimima do škroba zbog čega se brže probavljaju veće granule škroba. Tablica 4.1.2.1. prikazuje dimenzije i karakteristike oblika granula škroba osam ispitanih hibrida u kojoj je istaknut hibrid s najmanjim dimenzijama granule te najniže brzine probavljivosti škroba (Bc 462).

Tablica 4.1.2.1. Dimenzije i karakteristike oblika granula škroba te brzina probavljivosti hibrida u osam hibrida kukuruza

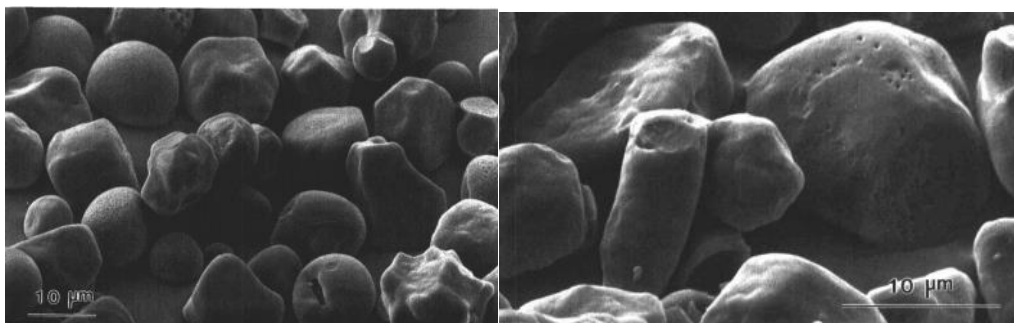
	Površina	Promjer	Zaobljenost	Elongacija	Brzina probavljivosti škroba
Hibrid	μ	μ			h <sup>-1</sup>
Bc 244	122	11,9	0,91	1,32	1,37
Bc 354	127	12,2	0,91	1,31	1,27
Bc 394	117	11,8	0,93	1,25	1,30
<b>Bc 462</b>	<b>112</b>	<b>11,5</b>	<b>0,9</b>	<b>1,26</b>	<b>1,19</b>
Bc 572	116	11,7	0,92	1,27	1,38
Bc 574	128	12,4	0,92	1,29	1,40
Bc 678	123	12,0	0,92	1,26	1,44
Pajdaš	124	12,1	0,91	1,29	1,41

Izvor: Kljak i sur. (2019.)

Smatra se kako ječam s više amiloze ima više manjih granula škroba u usporedbi s normalnim i niskoamiloznim ječmom (Stevnebo i sur., 2006.). Navedeni autori proveli su istraživanje o ovisnosti brzine probave škroba s veličinom granula škroba ječma ovisno o udjelu amiloze u kultivaru. U istraživanju, dobiveni rezultati nisu bili u skladu s prijašnjim istraživanjima. Iako ječam s višim udjelom amiloze sadrži manje granule škroba, rezultati su pokazali kako upravo kultivari s najviše amiloze imaju najniži stupanj probave škroba. To ukazuje kako su sadržaj amiloze i kompleksa amiloze i lipida ograničavajući čimbenici razgradnje škroba kultivara ječma korištenih u istraživanju (Stevnebo i sur., 2006.).

Različite vrste biljaka tvore škrobne granule različitih oblika. No, osim razlika u obliku granula kod različitih biljnih vrsta, oblici se mogu razlikovati i među različitim tipovima jedne vrste. Tako se različiti oblici granula škroba kukuruza mogu razlikovati ovisno o udjelu amiloze. Buleon i sur. (1998.) navode dva oblika granula škroba s obzirom na sadržaj amiloze. Kukuruz s normalnim sadržajem amiloze (25 – 28%) posjeduje granule škroba poliedarnog i zaobljenog oblika, dok su granule škroba s visokim udjelom amiloze (60 – 73%) vrlo izduženog, nepravilnog oblika (Buleon i sur., 1998.). Rezultati u radu Kljak i sur. (2019.) ukazuju kako veća zaobljenost granula škroba dovodi do njegove brže probave.

Na površini granula škroba mogu se pronaći sitni otvori (pore) koji također imaju utjecaj na probavu škroba. Naime, s obzirom na enzim i tip škroba hidroliza se može odvijati na dva načina. Jedan od njih je kada enzim hidrolizira cijelu površinu (ili dio) škroba izvana, a drugi je kada enzim ulazi u samu površinu škroba kroz kanale te hidrolizira molekulu škroba prema središtu molekule. Pore su bitne zbog ulaska enzima u kanale granule zbog čega omogućuju bržu probavu takvih granula. Fannon i sur. (1992.) proveli su istraživanje upravo na temu postojanja pora na granulama različitih biljnih vrsta s naglaskom na pore granula škroba zrna kukuruza. Neke, ali ne sve granule imale su pore po cijeloj površini (Fannon i sur., 1992.). Slika 4.1.2.1. A prikazuje granule škroba bez prisutnih pora, dok su na granulama škroba na slici 4.1.2.1. B pore vidljive. Pore su uglavnom bile nakupljene u obliku grozdova, nalazile su se na glatkim, sferičnim granulama u brašnjavom endospermu.



Slika 4.1.2.1. Granule škroba bez prisutnih pora (A) i sa porama (B)

Izvor: Fannon i sur. (1992.)

Kljak i sur. (2019.) također su uočili postojanje pora na promatranim hibridima kukuruza. Dhital i sur. (2010.) smatraju kako pore, kanali i udubljenja na površini granule škroba omogućuju  $\alpha$ -amilazi pet puta bržu difuziju u škrob krumpira, rezultirajući bržom kinetikom probavljivosti škroba. Dreher i sur. (1984.) iznose tvrdnju kako škrob žitarica ima veću probavljivost nego škrob gomolja i leguminoza. To se može pripisati prisutnosti brojnih rupica na površinskom sloju i porama koje prodiru prema unutrašnjosti granula, iz izvora žitarica poput kukuruza (Singh i sur., 2010.).

#### 4.1.3. Zein

Slično kao i kompleks amiloze-lipida, proteinska matrica oko granule škroba može utjecati na potencijal probave škroba kod domaćih životinja (Giuberti i sur., 2013). Autori su proveli istraživanje o utjecaju sadržaja zeina na probavljivost škroba u probavnom traktu svinja na način da su promatrali brzinu probavljivosti škroba i udjele brzoprobavljivog, sporoprobavljivog i rezistentnog škroba kukuruza s različitim sadržajem zeina u *in vitro* modelu. U istraživanju je korišteno 20 uzoraka zrna kukuruza koji su sadržavali različite količine zeina (4,0 do 8,0 g zeina/100 g škroba), a rezultati su prikazani u tablici 4.1.3.1.. Uzorci s najviše zeina u škrobu (omjer zein/škrob > 6) imali su najmanju količinu brzoprobavljivog škroba, a najviše su imali frakcije rezistentnog škroba, dok je sa uzorcima s najmanje zeina odnos bio obrnut. Zrna kukuruza podijeljena su u grupe s obzirom na omjer zeina i škroba (g zeina/100 g škroba).

Tablica 4.1.3.1. Brzina probavljivosti škroba i frakcije škroba povezane s različitim sadržajem zeina

	Tipovi zeina					P-vrijednost
	L	ML	M	MH	H	
Brzina probavljivosti škroba ( $h^{-1}$ )	0,96	0,96	0,90	0,42	0,42	<0,05
Frakcija škroba (g/kg)						
RDS	132	133	139	68	99	<0,05
SDS	362	359	349	242	240	<0,05
RS	205	220	220	387	357	<0,05

Izvor: Giuberti i sur. (2014.)

L (niski sadržaj zeina; < 4,0 g/100 g škroba); ML (srednje niski; 4,0 – 5,0 g/100 g škroba); M (srednji; 5,0 – 6,0 g/100 g škroba); MH (srednje visoki; 6,0 – 8,0 g/100 g škroba); H (visoki; >8,0 g/100 g škroba); RDS – (brzoprobavljivi škrob); SDS (sporoprobavljivi škrob); RS (rezistentni škrob).

Istraživanje Kljak i sur. (2019.) potvrđuje istraživanje Giuberti i sur. (2014.). U Tablici 4.1.3.2., napravljenoj na temelju spomenutog istraživanja, prikazani su hibridi korišteni u pokusu, sadržaj zeina u ukupnom škrobu (TS) te brzina probavljivosti škroba hibrida s obzirom na sadržaj zeina. Brzina probavljivosti škroba je bila u negativnoj korelaciji sa sadržajem zeina u ukupnom škrobu (Kljak i sur., 2019.). Takav rezultat navodi kako se sav zein nije uspio probaviti u želucu pomoću enzima pepsina te u tankom crijevu predstavlja svojevrsnu barijeru za probavu škroba. Stoga, autori zaključuju da kada su granule škroba uronjene u složenu matricu koja sadrži zein, njihova dostupnost enzimima utječe na brzinu probavljivosti škroba.

Tablica 4.1.3.2. Sadržaj zeina u ukupnom škrobu i razlomačka stopa brzine probavljivosti hibrida osam hibrida kukuruza

Hibrid	Zein u ukupnom škrobu g/kg	Brzina probavljivosti škroba h <sup>-1</sup>
Bc 244	86,5	1,37
Bc 354	78,9	1,27
Bc 394	83,1	1,30
Bc 462	88,7	1,19
Bc 572	70,3	1,38
Bc 574	75,5	1,40
Bc 678	83,1	1,44
Pajdaš	83,6	1,41

Izvor: Kljak i sur. (2019.)

## 4.2. Vanjski čimbenici

### 4.2.1. Veličina čestica meljave

Žitarice kojima se hrane domaće životinje obično se melju ili rolaju prije davanja životinjama te se i mehanička obrada može smatrati jednim od primarnih i jeftinijih metoda koje imaju utjecaj na dostupnost prirodnog škroba procesima probave (Giuberti i sur. 2014.).

Amaral i sur. (2015.) proveli su istraživanje o utjecaju veličine čestica meljave kod kukuruza na brzinu probave škroba u tankom crijevu tovljenika. Ispitivao se utjecaj različitih čestica meljave (promjeri 550 µm, 700 µm i 850 µm) na proizvodna svojstva 42 tovljenika. Rezultati pokusa prikazani su u tablici 4.2.1.1.. Svinje hranjene obrokom koji je sadržavao čestice promjera 500 µm rezultirao je boljom konverzijom; no utjecaja veličine čestica na druge varijable nije bilo (Amaral i sur., 2015.).

Tablica 4.2.1.1. Performanse svinja hranjenih potpunim krmnim smjesama s različitim veličinom čestica meljave kukuruza

Varijabla	Veličina čestica meljave ( $\mu\text{m}$ )		
	550	700	850
Početna težina (kg)	30,57	30,48	30,46
Završna težina (kg)	56,34	55,69	56,02
Dobitak mase (kg/dan)	0,86	0,86	0,85
Unos hrane (kg/dan)	1,81	1,90	1,88
Konverzija	2,11	2,22	2,21

Izvor: Amaral i sur. (2015.)

U pokusu su ispitani i koeficijenti probavljivosti škroba u različitim dijelovima tankog crijeva. Produkt razgradnje škroba tj. glukoza određena je u duodeumu, početnom dijelu jejunima, jejunumu te završnom dijelu jejunuma i ileumu što je prikazano u Tablici 4.2.1.2. Rezultati pokazuju kako su sve tri frakcije škroba u ileumu probavljene više od > 90% (0,92 ; 0,92 ; 0,90), no razlika je u dijelu probavnog trakta u kojem je već postignuta probava od 90%. Kod svinja hranjenih veličinom čestica meljave promjera 550  $\mu\text{m}$  ukupna probava škroba dostignuta je u trećem segmentu (jejunum) dok je kod 2. i 3. tretmana hranjenja potpuna probava dostignuta nešto kasnije (ileum). Kod čestica promjera 700  $\mu\text{m}$  potpuna probava škroba (0,92) postignuta je u ileumu, dok je kod 3. tretmana hranjenja probava u ileumu bila 0,9.

Tablica 4.2.1.2. Koeficijent probavljivosti škroba u dijelovima tankog crijeva kod svinja hranjenih različitim veličinom čestica meljave

Dio tankog crijeva	Veličina čestice kukuruza ( $\mu\text{m}$ ) <sup>A</sup>			P-vrijednost
	550	700	850	
Duodenum	0,60	0,22	0,19	$\leq 0,001$
Prednji jejunum	0,75	0,61	0,34	$\leq 0,001$
Jejunum	0,89	0,66	0,63	$\leq 0,001$
Stražnji jejunum	0,92	0,77	0,79	0,001
Ileum	0,92	0,92	0,90	0,280

Izvor: Amaral i sur. (2014.)

Na kraju istraživanja zaključeno je kako meljava promjera 550  $\mu\text{m}$  utječe pozitivno na konverziju kod svinja. Također, zaključeno je kako sve tri veličine čestica meljave postižu jednaku probavljivost u ileumu, no razlikuju se u brzini probave. Kukuruz s promjerom čestica 550  $\mu\text{m}$  ima najbržu probavljivost škroba, sa 700  $\mu\text{m}$  srednju, a sa 850  $\mu\text{m}$  najsporiju (Amaral i sur., 2015.).



Anguita i sur. (2006.) proveli su istraživanje o utjecaju veličine čestice meljave na probavu škroba kukuruza, pšenice, ječma, zobi te graška. Ispitivala su se svojstva zrna u tri oblika (sirovo, kuhano i ekstrudirao) samljevenih na dvije veličine čestica (0,8 mm i 3 mm). U tablici 4.2.1.3. prikazan je udio hidrolize škroba kukuruza u sirovim sastojcima nakon 60 i 240 minuta *in vitro* inkubacije. Vidljivo je kako postoji značajno smanjenje ( $P < 0,001$ ) u obujmu probavljivosti škroba nakon promatranog vremena za čestice usitnjene na 3 mm u usporedbi s česticama veličine 0,8 mm. Nema značajne razlike u brzini probave jedino kod kuhanog kukuruza.

Tablica 4.2.1.3. Udio hidrolize škroba kukuruza u sirovim sastojcima nakon 60 i 240 min

Oblik zrna	Kukuruz	
	60 min	240 min
Sirovo 0,8 mm	0,32	0,69
Sirovo 3 mm	0,16	0,57
Kuhano 0,8 mm	0,59	0,79
Kuhano 3 mm	0,60	0,79
Ekstrudirano 0,8 mm	0,75	0,86
Ekstrudirano 3 mm	0,60	0,79

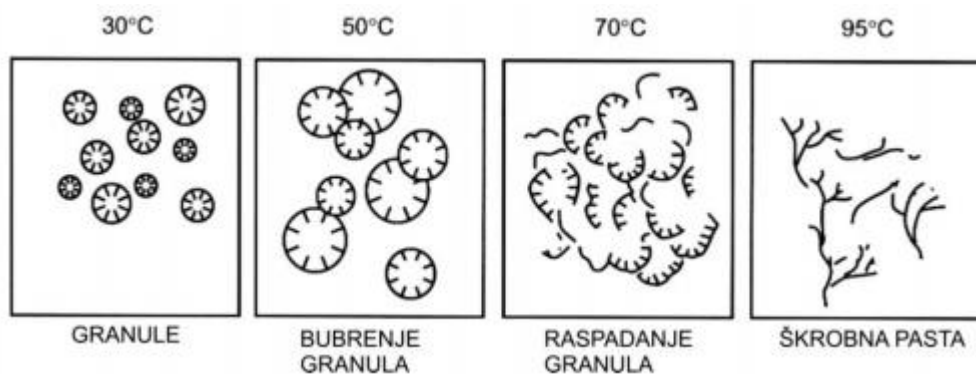
Izvor: Anguita i sur. (2006.)

Al Rabadi i sur. (2009.) proveli su istraživanje o utjecaju veličine čestica meljave ječma i sirka na brzinu probavljivosti škroba. Pri svakoj ispitivanoj veličini čestica, koje su se kretale između 0,1 i 3 mm, brzina probavljivosti škroba sirka uvijek je bila viša nego ječma. Nadalje, u skladu s prethodno navedenim istraživanjem, meljave sa sitnijim česticama (0,045 mm) u odnosu na krupnije (3,78 mm) imale su bržu probavu i kod sirka ( $(1,1 \pm 0,1) \times 10^{-1}$  naprema  $(1,9 \pm 0,2) \times 10^{-3}$ ) i kod ječma ( $(4,7 \pm 0,2) \times 10^{-1}$  naprema  $(4,3 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ ).

#### 4.2.2. Termička obrada

Obrada hrane dovodi do promjena u strukturi hrane i također utječe na nutritivne karakteristike hrane, uključujući probavljivost škroba (Singh i sur., 2010.). Usvojeno je nekoliko metoda za poboljšanje iskorištavanja žitarica kod proizvodnih životinja, poput svinja, uključujući smanjenje veličine čestica, dodavanje tekućine i termička obrada, poput peletiranja, ekspaniranja i parenja (Al-Rabadi i sur., 2011.). Obrada hrane uglavnom podrazumijeva dva koraka s ciljem povećanja njezine probavljivosti. Prvo bi se nepotpuno probavljivi segmenti zrna poput srednjih i većih segmenata trebali odvojiti pomoću sita frakcioniranjem mljevenih zrna (Al-Rabadi i sur., 2011.). Nakon toga trebala bi uslijediti ekstruzijska obrada tako da veliki i srednji fragmenti dobiju dodatnu termo-mehaničku obradu (Al-Rabadi i sur., 2011.). Termička obrada uz dovoljno prisutne vode uzrokuje želatinizaciju škroba koja omogućava lakšu probavu. Želatinizacija je proces uzrokovan bubrenjem te

omogućava povećanje osjetljivosti na probavne enzime iz razloga jer se gubi kristalna struktura. Kada se molekule škroba zagrijavaju u prisutnosti vode kristalna struktura je poremećena te se molekule vode povezuju vodikovom vezom na izložene hidroksilne skupine amiloze i amilopektina što uzrokuje povećano bubrenje i topivost granula škroba (Singh i sur., 2010.). Hidrotermički postupak želatinizacije škroba se definira kao nepovratno razaranje kristalne strukture škroba gdje površina svake molekule škroba postaje podložna djelovanju otapala i reagensa. Slika 4.2.2.1. prikazuje utjecaj temperature na razaranje kristalne strukture škroba.



Slika 4.2.2.1. Želatinizacija granula škroba

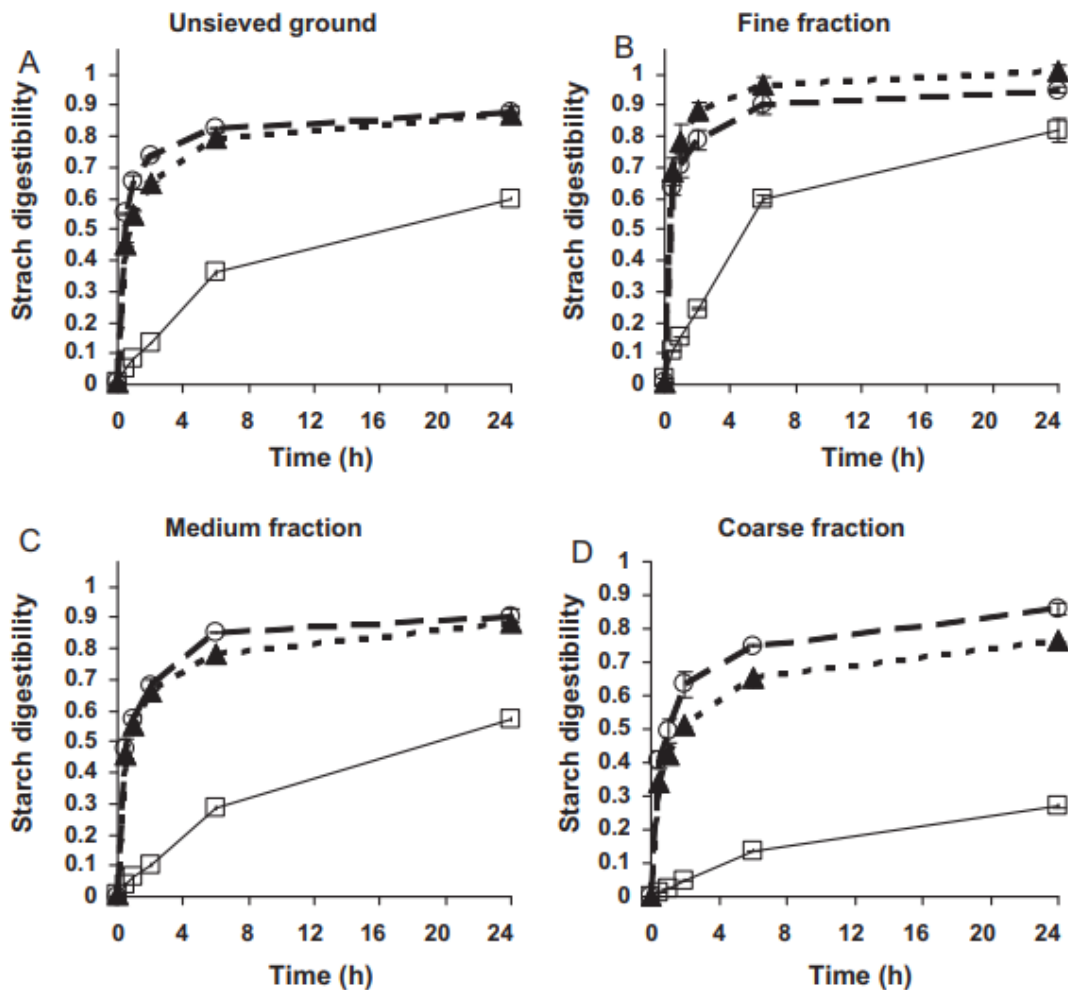
Izvor: Johned, 2006.

U već spomenutom istraživanju Anguite i sur. (2006.) toplina je povećala probavljivost na više od 90% za pšenicu, ječam i zob nakon 240 min inkubacije za zrna sitnije meljave (kuhanje redom: 97% ; 100% ; 92%; ekstrudiranje redom: 99% ; 100% ; 98%). Kuhanje povećava brzinu hidrolize na način da povećava želatinizaciju škroba te ga čini dostupnijim za djelovanje enzima (Singh i sur., 2010.). Tijekom ekstrudiranja dolazi do gubitka integriteta strukture granula škroba uslijed djelovanja sila u cijevi ekstrudera što dovodi do povećanja osjetljivosti granula škroba na djelovanje enzima.

Holm i sur. (1998., prema Svihus i sur. 2005.) pronašli su korelaciju od 0,96 između mjere želatinizacije i brzine probavljivosti škroba što ukazuje da je odnos blizu linearnom za čisti škrob. Većina škrobova želatinizira se na temperaturi višoj od 80 °C uz prisustvo vode. Na želatinizaciju škroba utječe i struktura škroba poput udjela amiloze ili veličina granula škroba. Bržoj želatinizaciji pogodnije su velike od malih granula škroba, a veći udio amiloze u škrobu utječe na smanjenu želatinizaciju, izvještava Svihus i sur. (2005.). Razlog tome je povezanost amiloze u kompleksu s lipidima pa što ima više amiloze ima više i lipida koji reducira bubrenje granule škroba te smanjuje želatinizaciju.

Slika 4.2.2.2. prikazuje grafove kao rezultate istraživanja Al-Rabadi i sur. (2011.). Ispitala se probavljivost škroba ječma i sirka za četiri različite veličine čestica (nemljeveno,

fino mljevono < 0,5 mm, srednje mljevono 0,5 – 1 mm i grubo mljevono > 1 mm) na dvije različite temperature (100 i 140 °C). Rezultati su u skladu s istraživanjem Anguita i sur. (2006.) za pšenicu, ječam i zob u kojima je također povećana probavljivost uzoraka tretiranih temperaturom u odnosu na sirovo zrno. S obzirom na temperaturu nije bilo većih razlika između niže (100 °C) i više (140 °C) temperature ekspandiranja.



Slika 4.2.2.2. Utjecaj vremena na probavljivost škroba sirka za 4 različite frakcije meljave

□ - neobrađeno zrno; o - niža temperatura; crni trokutić - viša temperatura

Izvor: Al-Rabadi i sur., 2011.

U istraživanju Mahasukhonthachat i sur. (2010.) o utjecaju uvjeta ekspandiranja na probavljivost sirka rezultati pokazuju kako je najbrža želatinizacija škroba postignuta pri vlazi od 30 % i brzini okretaja ekstrudera 250 u minuti (99,3%). S ciljem povećanja frakcije rezistentnog škroba, uzimajući u obzir njegovo pozitivno djelovanje na ljudsko zdravlje, autori

zaključuju kako su optimalni uvjeti ekspandiranja kada je vlaga 30% te niža brzina okretaja ekspandera (150 rpm).

Ako su u procesu obrade prisutne male količine vode, potrebna je viša temperatura tretiranja. Kako većina procesa obrade poput peletiranja, ekstruzije, ekspandiranja i sličnog, zahtjeva uvjete rada bez vode, potrebno je koristiti višu temperaturu. Kada je prirodni škrob pod utjecajem termičkih tretmana (na primjer kuhanje), dolazi do narušavanja strukturne organizacije; događaju se različiti procesi poput bubrenja granule, ispiranja amiloze te disorganizacije amilopektina (Biliaderis, 1991.; prema Magallanes-Cruz i sur., 2017.). Spomenuti procesi, mijenjajući svojstva škroba tijekom procesa, utječu na dostupnost škroba enzimima probave tijekom hidrolize u probavnom traktu.

Kod obrade zrna za pahuljice mjera želatinizacije škroba ovisi o količini dodane pare i trajanju procesa parenja. Tijekom procesa ekspandiranja dodaje se do 80 g/kg vode dok je temperatura tijekom procesa viša od 100 °C. Goelama i sur. (1999.) nisu uočili utjecaj ekspandiranja (2,4 %/h u odnosu na 1,2 %/h za netretirano zrno) na povećanu probavljivost hranjivih tvari te smatraju kako je opseg želatinizacije bio prenizak da bi se primijetio utjecaj na probavljivost škroba. S obzirom da proces ekspandiranja može rezultirati povećanjem, ali i smanjenjem razgradnje proteina i škroba, uvjeti tijekom procesa od velike su važnosti za pravilnu procjenu probavljivosti (Goelama i sur., 1999.).

Proces ekstrudiranja u kojem se dodaje više do 180 g/kg vode, a temperatura je viša od 110 °C, najčešće povećava želatinizaciju škroba te omogućava bolju probavljivost. Provedena su istraživanja koja se razlikuju u dobivenim rezultatima. Medel i sur. 1999. i Hongtrakul i sur. 1999. (prema Svihus i sur. 2005.) proveli su ekstrudiranje u određenim uvjetima koji su rezultirali obujmom želatinizacije škroba od samo 0,387, pokazujući time kako opseg želatinizacije škroba ovisi o uvjetima ekstrudiranja.

Termički procesi obrade ponekad mogu i negativno utjecati na probavljivost škroba. Primjer je kada tijekom produženog tretmana povišenom temperaturom dolazi da pucanja glikozidnih veza u škrobu i stvaranja neprobavljive 1,6 – anhidroglukopiranoze koja smanjuje probavljivost škroba. Nadalje, procesi obrade mogu povećati količinu kompleksa amiloza-lipid te na taj način smanjiti probavljivost ( Jacobs i Delcour, 1998. prema Svihus i sur. 2005.).

## 5. Opća diskusija

Kukuruz je žitarica s najvišim sadržajem energije u obliku škroba te najvećom konzumacijom za domaće životinje. Najviše proizvedenog kukuruza koristi se u hranidbi životinja, a tek potom u prehrani ljudi. Iz tih razloga, interes za istraživanjem i shvaćanjem utjecaja zrna kukuruza na probavljivost, a indirektno i na proizvodna svojstva životinja, je golem. U radu su opisani mnogi čimbenici o kojima će ovisiti probava zrna kukuruza u probavnom traktu životinje, s naglaskom na vrijeme koje je za to potrebno (kinetika probavljivosti).

Čimbenici koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba kukuruza razvrstani su na unutarnje i vanjske čimbenike. Unutarnji čimbenici odnose se na karakteristike samog zrna, od molekulske građe amiloze i amilopektina do nekih drugih dijelova škroba poput lipida i proteina koji također utječu na brzinu probavljivosti samog škroba. Vanjski čimbenici se odnose na postupke u obradi zrna poput usitnjavanja zrna i različitih hidrotermičkih postupaka. Neki od navedenih čimbenika potiču bržu probavu škroba, a neki predstavljaju svojevrsne barijere bržoj i efikasnijoj probavi škroba. Tako veći udio amiloze naspram amilopektina te veći sadržaj kompleksa amiloza-lipid usporavaju probavu škroba tj. negativno djeluju na brzinu probavljivosti škroba. Zbog svoje razgranate strukture, amilopektin se smatra boljim supstratom od amiloze za vezanje enzima probave. Što se tiče karakteristika same granule zrna, višu probavljivost postiže škrob s manjim granulama, pravilnijeg, okruglastog oblika te sa prisutnim porama na površini granule. Kao što lipidi povezani s amilozom ometaju probavu, slični učinak ima i zein jer se granule škroba nalaze okružene proteinskom matricom u kojoj prevladava ovaj prolamin. Štoviše, kada se radi o mljevenom kukuruzu a ne izoliranom škrobu, zein je najvažniji limitirajući faktor probave škroba jer da bi se počeo probavljati škrob prvo se mora probaviti zein. Nadalje, u tom slučaju, veće granule škroba će se brže probavljati.

Što se tiče procesa obrade, sitnija meljava pozitivno utječe na brzinu probavljivosti škroba jer dolazi do većeg razaranja strukture zrna čime škrob postaje dostupniji probavnim enzimima pa se samim time manje čestice brže probavljaju. S druge strane, visoke temperature različito utječu na probavljivost. Tako proces ekstrudiranja, u kojem se koristi najviše vode u obliku vodene pare te temperature iznad 110 °C, najbolje utječe na povećanje brzine probavljivosti škroba jer povećava želatinitizaciju škroba. Prilikom želatinitizacije škroba dolazi do nepovratnog razaranja kristalne strukture škroba što omogućava bolju izloženost škroba probavnim enzimima.

Važnost kinetike probavljivosti škroba u prehrani ljudi ogleda se u benefitima koje donosi sporoprobavljivi škrob kao prevencija za bolesti poput dijabetesa tipa II, dok se prisutnost brzoprobavljivog škroba veže s povećanjem glukoze u krvi i inzulinskog odgovora što može štetno djelovati na zdravlje. Kada se kinetika probavljivosti škroba gleda sa stajališta hranidbe životinja tada je potrebno poznavati brzinu probavljivosti hranjivih tvari, krmiva i kompletnih krmnih smjesa, u ovom slučaju škroba kao najvažnijeg izvora energije za

visokoproduktivne životinje, kako bi se optimiziralo iskorištenje škroba i održavanja zdravlja životinja.

Unatoč tome što se prepoznala važnost kinetike probavljivosti škroba, prvenstveno zbog utjecaja na zdravlje čovjeka, i tome što je to važna tema istraživanja u posljednjih desetak godina, još uvijek je potrebno provesti istraživanja s izvorima škroba koji se prvenstveno koriste u hranidbi životinja. Na taj način, omogućilo bi se bolje iskorištenje hrane za životinje, smanjenje troškova proizvodnje te potencijalno pozitivan utjecaj na zdravlje životinja.

## 6. Zaključak

Na kinetiku probavljivosti škroba zrna kukuruza utječu unutarnji čimbenici poput molekulske građe granula škroba, svojstva granula škroba (veličina, oblik, površina) te sadržaja zeina kojim su okružene granule škroba. Također, s amilozom povezane komponente poput lipida, proteina i fosfata smanjuju brzinu probavljivosti škroba. Pod vanjske čimbenike ubrajaju se mehanička obrada odnosno veličina meljave zrna te termički procesi samog zrna i potpunih krmnih smjesa. Općenito čestice sitnije meljave imaju višu brzinu probavljivosti škroba dok se korištenje termičkih postupaka poput kuhanja, peletiranja, ekstrudiranja, koristi u svrhu povećanja probavljivosti molekula škroba.

Iako se kod hranidbe životinja manje vodi računa o zrnu kukuruza i njegovim svojstvima jer se smatra izvorom energije, dosadašnja istraživanja su pokazala da bi se izborom hibrida niže brzine probavljivosti škroba moglo maksimalizirati iskorištenje te energije te povećati proizvodnja životinja. Unutarnji čimbenici strukture zrna su određeni genotipom što upućuje da će brzina probavljivosti škroba biti također genetski određena. S druge strane, na genetski određenu brzinu probavljivosti škroba će se moći utjecati obradom zrna i potpunih krmnih smjesa te će se moći postići hrana više ili niže brzine probave u odnosu na samo zrno kukuruza.

## 7. Popis literature

1. Ai, Y., Hasjim, J., & Jane, J. L. (2013). Effects of lipids on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch. *Carbohydrate Polymers*, *92*(1), 120-127.
2. Al-Rabadi, G. J., Gilbert, R. G., & Gidley, M. J. (2009). Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine alpha-amylase. *Journal of Cereal Science*, *50*(2), 198-204.
3. Al-Rabadi, G. J., Torley, P. J., Williams, B. A., Bryden, W. L., & Gidley, M. J. (2011). Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates. *Animal Feed Science and Technology*, *168*(3-4), 267-279.
4. Amaral, N. O., Amaral, L. G. M., Cantarelli, V. S., Fialho, E. T., Zangeronimo, M. G., & Rodrigues, P. B. (2015). Influence of maize particle size on the kinetics of starch digestion in the small intestine of growing pigs. *Animal Production Science*, *55*(10), 1250-1254.
5. Anguita, M., Gasa, J., Martín-Orúe, S. M., & Pérez, J. F. (2006). Study of the effect of technological processes on starch hydrolysis, non-starch polysaccharides solubilization and physicochemical properties of different ingredients using a two-step in vitro system. *Animal Feed Science and Technology*, *129*(1-2), 99-115.
6. Bertoft, E., Annor, G. A., Shen, X., Rumpagaporn, P., Seetharaman, K., & Hamaker, B. R. (2016). Small differences in amylopectin fine structure may explain large functional differences of starch. *Carbohydrate Polymers*, *140*, 113-121.
7. Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, *23*(2), 85-112.
8. Bulpin, P. V., Welsh, E. J., & Morris, E. R. (1982). Physical characterization of amylose-fatty acid complexes in starch granules and in solution. *Starch-Stärke*, *34*(10), 335-339.
9. Del Alamo, A. G., Verstegen, M. W. A., Den Hartog, L. A., de Ayala, P. P., & Villamide, M. J. (2009). Wheat starch digestion rate affects broiler performance. *Poultry Science*, *88*(8), 1666-1675.
10. Dhital, S., Shrestha, A. K., & Gidley, M. J. (2010). Relationship between granule size and in vitro digestibility of maize and potato starches. *Carbohydrate Polymers*, *82*(2), 480-488.
11. Domaćinović, M., Antunović, Z., Džomba, E., Opačak, A., & Baban, M. (2015). Specijalna hranidba domaćih životinja.
12. Dona, A. C., Pages, G., Gilbert, R. G., & Kuchel, P. W. (2010). Digestion of starch: In vivo and in vitro kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release. *Carbohydrate Polymers*, *80*(3), 599-617.
13. Dreher, M. L., Dreher, C. J., Berry, J. W., & Fleming, S. E. (1984). Starch digestibility of foods: a nutritional perspective. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, *20*(1), 47-71.



14. Fannon, J. E., Hauber, R. J., & BeMiller, J. N. (1992). Surface pores of starch granules. *Cereal Chemistry*, 69(3), 284-288.
15. FAOSTAT (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <www.fao.org/faostat>. Pristupljeno 10. kolovoza 2020.
16. Feedipedia (2020). Feedipedia – Animal Feed Resources Information System - INRA CIRAD AFZ and FAO © 2012-2017, <www.feedipedia.org>. Pristupljeno 10. kolovoz 2020.
17. Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M. J., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43(4), 931-942.
18. Gayral, M., Bakan, B., Dalgalarondo, M., Elmorjani, K., Delluc, C., Brunet, S., Brunet, S., Linossier, L., Morell, M.-H., & Marion, D. (2015). Lipid partitioning in maize (*Zea mays* L.) endosperm highlights relationships among starch lipids, amylose, and vitreousness. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(13), 3551-3558.
19. Gayral, M., Gaillard, C., Bakan, B., Dalgalarondo, M., Elmorjani, K., Delluc, C., Brunet, S., Linossier, L., Morell, M.-H., & Marion, D. (2016). Transition from vitreous to floury endosperm in maize (*Zea mays* L.) kernels is related to protein and starch gradients. *Journal of Cereal Science*, 68, 148-154.
20. Giuberti, G., Gallo, A., Cerioli, C., & Masoero, F. (2012). In vitro starch digestion and predicted glycemic index of cereal grains commonly utilized in pig nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 174(3-4), 163-173.
21. Giuberti, G., Gallo, A., Masoero, F., Ferraretto, L. F., Hoffman, P. C., & Shaver, R. D. (2014). Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review. *Starch-Stärke*, 66(1-2), 72-90.
22. Goelema, J. O., Smits, A., Vaessen, L. M., & Wemmers, A. (1999). Effects of pressure toasting, expander treatment and pelleting on in vitro and in situ parameters of protein and starch in a mixture of broken peas, lupins and faba beans. *Animal Feed Science and Technology*, 78(1-2), 109-126.
23. Gray, G. M. (1992). Starch digestion and absorption in nonruminants. *The Journal of nutrition*, 122(1), 172-177.
24. Grbeša D. (2016.). Hranidbena svojstva kukuruza. Bc institut. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
25. Grbeša, D. (2004). Metode procjene i tablice kemijskog sastava i hranjive vrijednosti krepkih krmiva. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
26. Grbeša, D. (2008). Bc hibridi kukuruza u hranidbi životinja. Bc Insitut za oplemenjivanje i proizvodnju bilja dd Zagreb, Hrvatska.
27. Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., & Wu, D. (2004). Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *Journal of Cereal Science*, 40(3), 231-237
28. Jane, J. L., Ao, Z., Duvick, S. A., Wiklund, M., Yoo, S. H., Wong, K. S., & Gardner, C. (2003). Structures of amylopectin and starch granules: How are they synthesized?. *Journal of Applied Glycoscience*, 50(2), 167-172.

29. Jonhed, A. (2006). Properties of modified starches and their use in the surface treatment of paper. (Disertacija) Faculty of Technology and Science, Chemical Engineering, Karlstad.
30. Kaur, L., Singh, J., McCarthy, O. J., & Singh, H. (2007). Physico-chemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *Journal of Food Engineering*, 82(3), 383-394.
31. Kljak, K., Duvnjak, M., & Grbeša, D. (2019). Effect of starch properties and zein content of commercial maize hybrids on kinetics of starch digestibility in an in vitro poultry model. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6372-6379.
32. Knudsen, K. E. B., Lærke, H. N., Steenfeldt, S., Hedemann, M. S., & Jørgensen, H. (2006). In vivo methods to study the digestion of starch in pigs and poultry. *Animal feed science and technology*, 130(1-2), 114-135.
33. Langworthy, C. F., & Deuel, H. J. (1922). Digestibility of raw rice, arrowroot, canna, cassava, taro, tree-fern, and potato starches. *Journal of Biological Chemistry*, 52, 251-261.
34. Lindeboom, N., Chang, P. R., & Tyler, R. T. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch-Stärke*, 56(3-4), 89-99.
35. Magallanes-Cruz, P. A., Flores-Silva, P. C., & Bello-Perez, L. A. (2017). Starch structure influences its digestibility: a review. *Journal of Food Science*, 82(9), 2016-2023.
36. Mahasukhonthachat, K., Sopade, P. A., & Gidley, M. J. (2010). Kinetics of starch digestion and functional properties of twin-screw extruded sorghum. *Journal of Cereal Science*, 51(3), 392-401.
37. Pérez, S., & Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch-Stärke*, 62(8), 389-420.
38. Pirgozliev, V. R., Rose, S. P., & Bedford, M. R. (2010). The effect of amylose: amylopectin ratio in dietary starch on growth performance and gut morphology in broiler chickens. *Archiv für Geflügelkunde*, 74(1), 21-29.
39. Rebourg, C., Chastanet, M., Gouesnard, B., Welcker, C., Dubreuil, P., & Charcosset, A. (2003). Maize introduction into Europe: the history reviewed in the light of molecular data. *Theoretical and Applied Genetics*, 106(5), 895-903.
40. Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch—a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(1), 1-17.
41. Shukla, R., & Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial Crops and Products*, 13(3), 171-192.
42. Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(4), 168-180.
43. Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food chemistry*, 81(2), 219-231.

44. Stevnebø, A., Sahlström, S., & Svihus, B. (2006). Starch structure and degree of starch hydrolysis of small and large starch granules from barley varieties with varying amylose content. *Animal Feed Science and Technology*, 130(1-2), 23-38.
45. Svihus, B., Uhlen, A. K., & Harstad, O. M. (2005). Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 122(3-4), 303-320.
46. Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151-165.
47. Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 568-585.
48. Weurding, R. E. (2002). *Kinetics of starch digestion and performance of broiler chickens*. (Disertacija) Wageningen University, Wageningen.
49. Weurding, R. E., Veldman, A., Veen, W. A., van der Aar, P. J., & Verstegen, M. W. (2001). In vitro starch digestion correlates well with rate and extent of starch digestion in broiler chickens. *The Journal of nutrition*, 131(9), 2336-2342.
50. Xu, A., Lin, L., Guo, K., Liu, T., Yin, Z., & Wei, C. (2019). Physicochemical properties of starches from vitreous and floury endosperms from the same maize kernels. *Food Chemistry*, 291, 149-156.
51. Zhang, B., Dhital, S., & Gidley, M. J. (2015). Densely packed matrices as rate determining features in starch hydrolysis. *Trends in Food Science & Technology*, 43(1), 18-31.
52. Zhang, G., Ao, Z., & Hamaker, B. R. (2006). Slow digestion property of native cereal starches. *Biomacromolecules*, 7(11), 3252-3258.
53. Zhang, H., & Xu, G. (2019). Physicochemical properties of vitreous and floury endosperm flours in maize. *Food science & nutrition*, 7(8), 2605-2612.
54. Zhu, F. (2018). Relationships between amylopectin internal molecular structure and physicochemical properties of starch. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 234-242.

## Životopis

Doris Vlajsović rođena je 30. srpnja 1996. godine u Zagrebu. Osnovnu školu kao i prvi razred srednje škole završava u Kutini dok ostatak srednjoškolskog obrazovanja završava u Zagrebu. U Kutini 2011. godine upisuje Srednju Školu Tina Ujevića, a nakon završene prve godine prebacuje se u Gimnaziju Sesvete koju završava 2015. godine. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja stječe znanje iz engleskog i njemačkog jezika. Kako joj se otac cijeli život bavi uzgojem jabuka (OPG Vlajsović), poljoprivreda je od malih nogu prisutna u Dorisinom životu. Ipak, ljubav prema životinjama određuje njen odabir smjera na Agronomskom fakultetu. Upisuje Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu smjer Animalne znanosti 2015. godine. Godine 2018. završila je preddiplomski studij i stekla titulu prvostupnice Animalnih znanosti.

Odrasla je u izrazito sportskoj obitelji te je rukomet počela trenirati već u prvom razredu Osnovne škole. Upravo je rukomet bio glavni razlog promjene srednje škole i mjesta stanovanja s 15 godina. Nastupala je za Hrvatsku kadetsku i juniorsku rukometnu reprezentaciju na Svjetskom i Europskom prvenstvu u Makedoniji (2014.) i Španjolskoj (2015.).

Diplomski rad na temu „Čimbenici koji utječu na kinetiku probavljivosti škroba kukuruza“ izrađuje pod mentorstvom doc. dr. sc. Kristine Kljak u akademskoj godini 2019./2020. na Agronomskom fakultetu u Zagrebu.