

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte
Faculty of Agriculture and Food Technology



Mg.sc.ing. **Rūta Mūrniece**

**RUDZU IESALA UN PLAUCĒJUMA
RAUDZĒŠANAS IETEKME RUDZU MAIZES
RAŽOŠANĀ**

***THE INFLUENCE OF RYE MALT AND SCALD
FERMENTATION ON RYE BREAD
PRODUCTION***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
zinātnes doktora grāda (*Ph.D.*) iegūšanai

SUMMARY

Jelgava
2025

Promocijas darba vadītāja / *Scientific supervisor*

Dr.sc.ing. **Dace Kļava** – Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes asociētā profesore / *associated professor at Latvia University of Life Sciences and Technologies*

Darba recenzenti / *Official reviewers*

Dr. sc. ing. **Mārtiņš Šabovics** – Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes asociētais profesors, Starptautiskās sadarbības centra vadītājs / *associated professor, head of the International Cooperation Centre at Latvia University of Life Sciences and Technologies*

Dr. biol. **Pāvels Semjonovs** – Latvijas Universitātes vadošais pētnieks, Rūpnieciskās mikrobioloģijas un pārtikas biotehnoloģijas laboratorijas vadītājs / *leading researcher, head of the Laboratory of Industrial Microbiology and Food Biotechnology, at University of Latvia*

Dr. **Elena Bartkiene** – Lietuvas Veselības zinātņu universitātes Pārtikas drošības un kvalitātes departamenta profesore, Dzīvnieku audzēšanas tehnoloģiju institūta vadošā pētniece un vadītāja / *professor at Department of Food Safety and Quality, chief researcher and Head of Institute of Animal Rearing Technologies, Lithuanian University of Health Sciences*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Pārtikas un dzērienu tehnoloģijas nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 31.10.2025. plkst. 14.00 Pārtikas institūta 216. auditorijā, Rīgas ielā 22a, Jelgavā.

Defence of doctoral thesis in an open session of the Promotion Board of the Food and Beverage Technology of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held on 31.10.2025. at 14.00 at the Food Institute, Riga street 22a, Jelgava.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Fundamentālajā bibliotēkā, Lielajā ielā 2, Jelgavā un internetā (pieejams: www.kopkatalogs.lv). Atsauksmes sūtīt Pārtikas un dzērienu tehnoloģijas nozares promocijas padomes sekretārei asociētai profesorei Dr.sc.ing. **J. Zagorskai** (Rīgas iela 22a, Jelgava LV-3004, e-pasts jelena.zagorska@lbtu.lv).

The doctoral thesis is available at the Fundamental Library of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2 Liela Street, Jelgava, and online (www.kopkatalogs.lv). References should be sent to associated professor Dr. sc. ing. J. Zagorska, secretary of the Promotion Board of the Food and Beverage Technology, 22a Riga Street, Jelgava, LV-3004, Latvia or e-mail: jelena.zagorska@lbtu.lv.

SATURS

PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE	5
ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA	6
MATERIĀLI UN METODES.....	8
REZULTĀTI UN DISKUSIJA	12
1. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu un plaucējuma īpašībām	12
1.1. Rudzu nefermentēto iesalu aktivitātes raksturojums	12
1.2. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām	13
1.3. Rudzu iesala satura un DS ietekme uz cukuru sastāvu pēc miltu cietes hidrolīzes (pārcukurošanas) un pēc 24 h raudzēšanas	20
2. Mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņas plaucējuma pārcukurošanas un ilgstošas raudzēšanas laikā.....	27
2.1. Mikrobiotas raksturojums raudzētā plaucējumā	27
2.2. Cukuru satura izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā	30
2.3. Organisko skābju saturs rudzu plaucējumā.....	32
2.4. Raudzēšanas laika ietekme uz fitīnskābes saturu rudzu plaucējumā	34
2.5. Raudzēšanas laika ietekme uz fruktānu saturu rudzu plaucējumā.....	35
3. Rudzu maizes kvalitātes novērtējums.....	36
3.1. Cukuru saturs rudzu maizes paraugos.....	36
3.2. Organisko skābju saturs rudzu maizē	38
3.3. Rudzu maizes sensorās novērtēšanas rezultāti, maizes gatavošanā izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu.....	41
3.4. Fitīnskābes saturs maizes paraugos	42
3.5. Fruktānu saturs maizes paraugos	43
SECINĀJUMI.....	45
REKOMENDĀCIJAS	46

CONTENT

TOPICALITY OF THE RESEARCH	47
RESULTS AND DISCUSSION	50
1. Effect of Unfermented Rye Malt on the Properties of Rye Flour and Scald	50
1.1. Characterization of the Activity of Unfermented Rye Malt	50
1.2. Effect of Unfermented Rye Malt on the Technological Properties of Rye Flour	50
1.3. Effect of Rye Malt Content and Activity on the Sugar Composition after Flour Starch Hydrolysis (Saccharification) and after 24 Hours of Fermentation.....	54
2. Microbial and Chemical Composition Changes After Scald Saccharification and Prolonged Fermentation.....	57
2.1. Microbial Characterization of Fermented Scald.....	58
2.2. Changes in Sugar Content During Scald Fermentation.....	59
2.3. Organic Acid Content in Rye Scald	61
2.4. Effect of Fermentation Time on Phytic Acid Content in Rye Flour Scald	61
2.5. Effect of Fermentation Time on Fructan Content in Rye Scald	62
3. Evaluation of Rye Bread Quality.....	63
3.1. Sugar Content in Rye Bread Samples.....	63
3.2. Organic Acid Content in Rye Bread.....	64
3.3. Sensory Evaluation Results of Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations	66
3.4. Phytic Acid Content in Bread Samples	67
3.5. Fructan Content in Bread Samples	67
CONCLUSIONS	69
RECOMMENDATIONS.....	69

PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE

Rudzu maize ar plaucējumu ir tradicionāls produkts, kura ražošanā nozīmīga ir procesu stabilitāte un kvalitātes prognozējamība. Lai to nodrošinātu, nepieciešama padziļināta izpratne par plaucējuma gatavošanas un raudzēšanas procesu mijiedarbību ar izejvielu īpašībām, īpaši pilngraudu rudzu miltiem un nefermentēto iesalu. Iesala enzimatiskā aktivitāte ražošanā ir mainīga, kas apgrūtina cukuru veidošanās un viskozitātes kontroli. Pētījumā tiek izvērtēta iespēja izmantot diastātisko spēku kā praktisku rādītāju, lai pielāgotu pievienotā iesala daudzumu un stabilizētu biokīmiskos procesus plaucējumā.

Otrs būtisks faktors ir plaucējuma raudzēšanas ilgums. Praksē tas var būtiski atšķirties, bet trūkst datu par ilgstošas raudzēšanas (24–48 h) ietekmi uz cukuriem, organiskajām skābēm, mikrobiotu un maizes kvalitāti. Pētījums analizē šīs izmaiņas ar mērķi uzlabot rudzu maizes sensorās īpašības un uzturvērtību. Abu virzienu apvienojums ļauj izstrādāt praktiski pielietojamu pieeju stabilai un kvalitatīvai rudzu maizes ražošanai.

Promocijas darba hipotēze: tehnoloģiski stabilu ar plaucējumu gatavotas rudzu maizes ražošanas procesu nodrošina noteikta diastātiskā spēka nefermentētā rudzu iesala pievienošana un ilgstoša plaucējuma raudzēšana.

Pētījuma objekti: rudzu pilngraudu milti, nefermentētais rudzu iesals ar atšķirīgu diastātisko spēku, rudzu pilngraudu miltu plaucējums (pārcukurots un raudzēts), pilngraudu rudzu maize.

Tēzes.

1. Nefermentētā rudzu iesala pievienošana ietekmē rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības maizes gatavošanā atkarībā no tā satura un diastātiskā spēka.
2. Ilgstoša plaucējuma raudzēšanā notiek cukuru satura samazināšanas un skābju sastāva un satura izmaiņas.
3. Ilgstoša raudzēšana samazina fruktānu un fitīnskābes saturu raudzētā plaucējumā.
4. Ilgstoša plaucējuma raudzēšana uzlabo rudzu maizes sensorās īpašības un samazina fruktānu un fitīnskābes saturu maizē.

Promocijas darba mērķis: izvērtēt nefermentētā rudzu iesala diastātiskā spēka un plaucējuma raudzēšanas laika ietekmi uz plaucējuma mikrobioloģiskajiem un ķīmiskajiem rādītājiem, miltu tehnoloģiskajām īpašībām un rudzu maizes sensorajām īpašībām un ķīmiskajiem rādītājiem.

Uzdevumi.

1. Analizēt α -amilāzes un β -amilāzes aktivitāti rudzu nefermentētā iesala paraugos ar atšķirīgu diastātisko spēku.
2. Izvērtēt nefermentētā rudzu iesala ietekmi uz rudzu miltu enzimatisko aktivitāti un tehnoloģiskajām īpašībām.
3. Izstrādāt matemātisko modeli rudzu miltu-iesala maisījuma krišanas skaitļa stabilizēšanai.

4. Analizēt cukuru satura izmaiņas rudzu plaucējumā pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas.
5. Noteikt skābuma un mikrobiotas izmaiņu dinamiku rudzu plaucējumā ilgstošas raudzēšanas laikā.
6. Analizēt ķīmiskā sastāva izmaiņas rudzu plaucējumā ilgstošas raudzēšanas laikā.
7. Analizēt rudzu maizes ar dažādi gatavotu plaucējumu ķīmiskos rādītājus un sensorās īpašības.

Pētījuma novitāte.

1. Veikta padziļināta iesala aktivitātes izpēte rudzu plaucējuma pārcukurošanās procesā, ar mērķi stabilizēt rudzu maizes tehnoloģisko procesu un kvalitāti.
2. Pirmo reizi Latvijā veikta padziļināta pilngraudu rudzu plaucējuma ilgstošas raudzēšanas izpēte, analizējot tās ietekmi uz plaucējuma tehnoloģiskajām īpašībām, kā arī uz pilngraudu rudzu maizes sensorajām īpašībām un sastāvu, ar mērķi stabilizēt maizes ražošanas tehnoloģisko procesu.

Pētījuma tautsaimnieciskā nozīme.

1. Izstrādāts matemātiskais modelis iesala efektīvākai izmantošanai rudzu plaucējuma gatavošanā un optimizēšanā, atbilstīgas kvalitātes rudzu maizes ražošanā.
2. Pētījuma rezultāti sniedz ieteikumus ražotājiem par rudzu plaucējuma raudzēšanas posma kvalitātes rādītājiem un to ietekmi uz maizes īpašībām, dodot iespēju stabilizēt, plānot un vadīt ražošanas procesu.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

Iegūtie rezultāti publicēti starptautiski atzītos zinātniskos rakstu krājumos, kas indeksēti Scopus vai Web of Science datu bāzēs.

1. Murniece, R., Reidzane, S., Radenkovs, V., Straumite, E., Keke, A., Kobrin, E., Klava, D. (2025) Scald Fermentation Time as a Factor Determining the Nutritional and Sensory Quality of Rye Bread. *Foods*, 14, 979. DOI: 10.3390/foods1406097
2. Murniece, R., Reidzane, S., Radenkovs, V., Matisons, R., Dabina-Bicka, I., Klava, D., Galoburda, R. (2024) Impact of Rye Malt with Various Diastatic Activity on Wholegrain Rye Flour Rheology and Sugar Formation in Scalding and Fermentation Processes. *Foods*, 13, 2077. DOI: 10.3390/foods13132077
3. Klava, D., Kunkulberga, D., Duka, G., Murniece R. (2023) Traditional Latvian Sourdough Rye Bread. In: *Traditional European breads: An illustrative compendium of ancestral knowledge and cultural heritage* (eds) Switzerland: Springer Nature AG, p. 199–214. DOI: 10.1007/978-3-031-23352-4

4. Murniece, R., Reidzane, S., Galoburda, R., Radenkovs, V., Klava, D. (2023) The Impact of Fermented Scald on Rye and Hull-Less Barley Dough and Bread Structure Formation. *Foods*, 12, 4475. DOI: 10.3390/foods12244475
5. Murniece, R., Klava, D. (2022) Impact of Long-Fermented Sourdough on the Technological and Prebiotal Properties of Rye Bread. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 76(1). DOI: 10.2478/prolas-2022-0001

Par pētījumā iegūtajiem rezultātiem ziņots 7 starptautiskās konferencēs / *The results obtained in the research have been reported at 6 conferences.*

1. Murniece, R., Dabina-Bicka, I., Radenkovs, V., Klava, D. (2024) Investigation of the rye malt diastatic power impact on sugar formation during scalding and fermentation process. The 17th ICC International Cereal and Bread Congress, Nantes, France, April 22–25 (stenda referāts / *poster presentation*)
2. Murniece, R., Stalidzans, E., Dabiņa-Bicka, I., Galoburda, R., Cinkmanis, I., Klava, D. (2023) Application of mathematical modelling as a tool in the use of rye malt to balance the quality of rye flour. The 16th Baltic Conference on Food Science and Technology “Traditional Meets Non Traditional in Future Food”, Jelgava, Latvia, May 11–12 (mutiska prezentācija / *oral presentation*)
3. Murniece, R., Reidzane, S., Galoburda R., Radenkovs, V., Klava, D. (2023) The impact of fermented rye and barley scald on structure formulation, microstructure changes and physical properties of wholegrain dough and bread. International Symposium on Food Rheology and Structure 2023 (ISFRS), Wageningen, Netherland, June 12–16 (stenda referāts / *poster presentation*)
4. Murniece R., Dabina-Bicka I., Klava D. (2022) Diastatic rye malt impact on different quality rye flour enzymatic and rheological properties. The 20th ICC Conference Future Challenges for Cereal Science and Technology, University of Natural Resources and Life Sciences, BOKU University Vienna, Austria, July 5–7 (stenda referāts / *poster presentation*)
5. Murniece, R., Klava, D. (2022) Influence of diastatic malt on sugar formation and development of LAB in rye flour scalding during long fermentation. 8th International Symposium on Sourdough, Bolzano, Italy, June 14–17 (stenda referāts / *poster presentation*)
6. Murniece, R., Reidzane, S., Klava, D. (2021) Fructan, mannan, glucan evolution during long time fermentation of wholgrain rye flour. The 7th Whole Grain Summit, Vienna, Austria, October, 25–27 (stenda referāts / *poster presentation*)
7. Murniece, R., Klava, D. (2020) Impact of long-fermented sourdough on the technological and prebiotal properties of rye bread. 3rd International

Conference "Nutrition and Health", Riga, Latvia, December 9–11 (mutiskais referāts / *oral presentation*)

Pētījums veikts ar LLU programmas “Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU” projekta Z52 “Matemātiskā modeļa izstrāde rudzu miltu kvalitātes prognozēšanai, izmantojot rudzu nefermentēto iesalu” un LLU programmas “Fundamentālo pētījumu veikšana LLU” zinātniskā projekta G10 “Eksopolisaharīdu veidošanās dinamikas izpēte rudzu maizes plaucējuma ilgstošās fermentācijas laikā” atbalstu.

MATERIĀLI UN METODES

Pētījuma laiks un vieta

Pētījums veikts no 2020. gada septembra līdz 2025. gada martam Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē Pārtikas institūta laboratorijās, Biotehnoloģiju zinātniskās laboratorijas Viedo tehnoloģiju nodaļā (VTN), Pārtikas un fermentēšanas centrā Igaunijā (Center of Food and Fermentation Technologies TFTAK), uzņēmuma Šopēna tehnoloģijas laboratorijās, (Chopin Technologies) Francijā. Paraugu gatavošana un cepšana veikta maizes ceptuvē “Ķelmēni” (Gulbenes novads, Rankas pagasts, Latvija).

Materiālu raksturojums

Pētījumā izmantoti:

- 3 dažādi rudzu graudu paraugi (šķirne 'Kaupo'), kas iegūti no z/s "Ķelmēni", Gulbene, Latvija, 2021. gada ražas. Rudzu graudi samalti z/s "Kaņepītes", Kocēnos, Latvijā 2022. gadā;
- 5 dažādi rudzu nefermentētie iesali ar atšķirīgiem diastātiskā spēka (DS) rādītājiem. Iesali tika saņemti no SIA “LATMALT”, “Valmju iesalnīca”, Jaunsvirlaukas pagasts, Jelgavas novads, Latvijā;
- plaucējuma un mīklas raudzēšanai izmantots ieraugs (attieciņgi, Ieraugs P un Ieraugs M), kas saņemta no maizes ceptuves “Ķelmēni”, Latvija.

Pētījuma struktūra

Pētījums veikts trīs posms (1. tabula). Pētījuma I posmā tika analizēta rudzu nefermentētā iesala enzīmu aktivitāte un izvērtēta tā kvantitatīvā un kvalitatīvā sastāva ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām.

II posmā pētīta rudzu plaucējuma pārcukurošanās un ilgstošas raudzēšanas (24–48 h) procesa ietekme uz mikrobiotas dinamiku un metabolītu profilu.

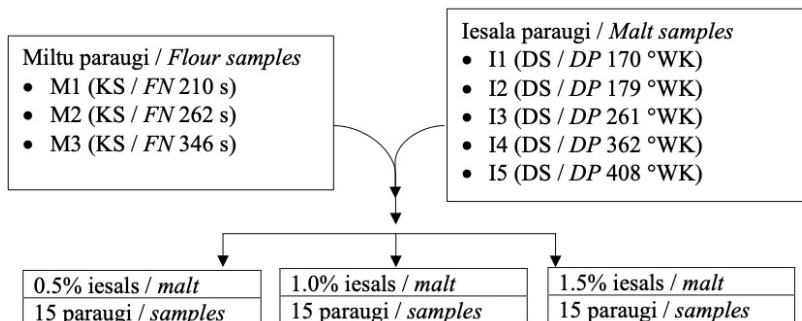
III posmā izvērtēta rudzu maizes kvalitāte, kas gatavota, izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumus.

Pētījuma shēma / Research Design

I POSMS Rudzu nefermentētā iesala ietekmes izpēte uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / STAGE I Investigation of the impact of unfermented rye malt on the physicochemical properties of rye flour	
1.	Nefermentētā rudzu iesala α -amilāzes un β -amilāzes aktivitātes noteikšana / <i>Determination of α-amylase and β-amylase activity of unfermented rye malt</i>
2.	Iesalu satura un aktivitātes ietekmes izpēte uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / <i>Investigation of the impact of malt content and activity on the technological properties of rye flour</i>
3.	Matemātiskā modeļa izveide miltu-iesala paraugiem KS stabilizēšanai / <i>Development of mathematical model for flour-malt samples to stabilize the falling number (FN)</i>
4.	Nefermentētā iesala satura un DS ietekmes izpēte uz cukuru veidošanos plaucējumā pēc pārcukurošanas un raudzēšanas (24 h) / <i>Investigation of the impact of rye malt content and activity on the sugar composition during flour starch hydrolysis (saccharification) and after 24 h of fermentation</i>
II POSMS Mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņu izvērtējums pēc plaucējuma pārcukurošanas un ilgstošas raudzēšanas (24–48 h) / STAGE II Evaluation of changes in microbiota and chemical composition after scald saccharification and prolonged fermentation (24–48 h)	
1.	Mikrobiotas izpēte plaucējuma raudzēšanas laikā / <i>Investigation of microbiota during scald fermentation</i>
2.	Cukuru satura izmaiņu izvērtēšana plaucējuma ilgstošas raudzēšanas laikā / <i>Evaluation of changes in sugar content during the prolonged fermentation of rye scald</i>
3.	Organisko skābju satura izmaiņu izvērtēšana plaucējumā ilgstošas raudzēšanas laikā / <i>Determination of organic acid content during the prolonged fermentation of rye scald</i>
4.	Fitīnskābes satura noteikšana plaucējumā / <i>Determination of phytic acid content in rye scald</i>
5.	Fruktānu satura noteikšana plaucējumā / <i>Determination of fructan content in rye scald</i>
III POSMS Rudzu maizes ar dažāda ilguma raudzētu plaucējumu kvalitātes novērtējums / STAGE III Quality assessment of rye bread with scald fermented for different duration	
1.	Cukuru satura noteikšana rudzu maizes paraugos / <i>Determination of sugar content in rye bread samples</i>
2.	Organisko skābju satura noteikšana rudzu maizē / <i>Determination of organic acid content in rye bread samples</i>
3.	Rudzu maizes paraugu sensorā novērtēšana, izmantojot dažādu ilgumu raudzētu rudzu plaucējumu / <i>Sensory evaluation of rye bread using rye flour scald of different fermentation durations</i>
4.	Fitīnskābes satura noteikšana rudzu maizes paraugos / <i>Determination of phytic acid content in rye bread samples</i>
5.	Fruktānu satura noteikšana rudzu maizes paraugos / <i>Determination of fructan content in rye bread samples</i>

Pētījuma metodes

Pētījuma I posmā sagatavoti rudzu miltu un iesala paraugi (1.att.). Katru rudzu miltu paraugu (M1; M2; M3) sajauc ar katru no 5 rudzu nefermentētā iesala paraugiem (I1; I2; I3; I4; I5). Iesalu pievieno 3 dažādos daudzumos – 0.5%, 1.0%, 1.5% no miltu masas. Miltu daudzums 3 kg.



1. att. Miltu-iesala paraugu sagatavošanas shēma /

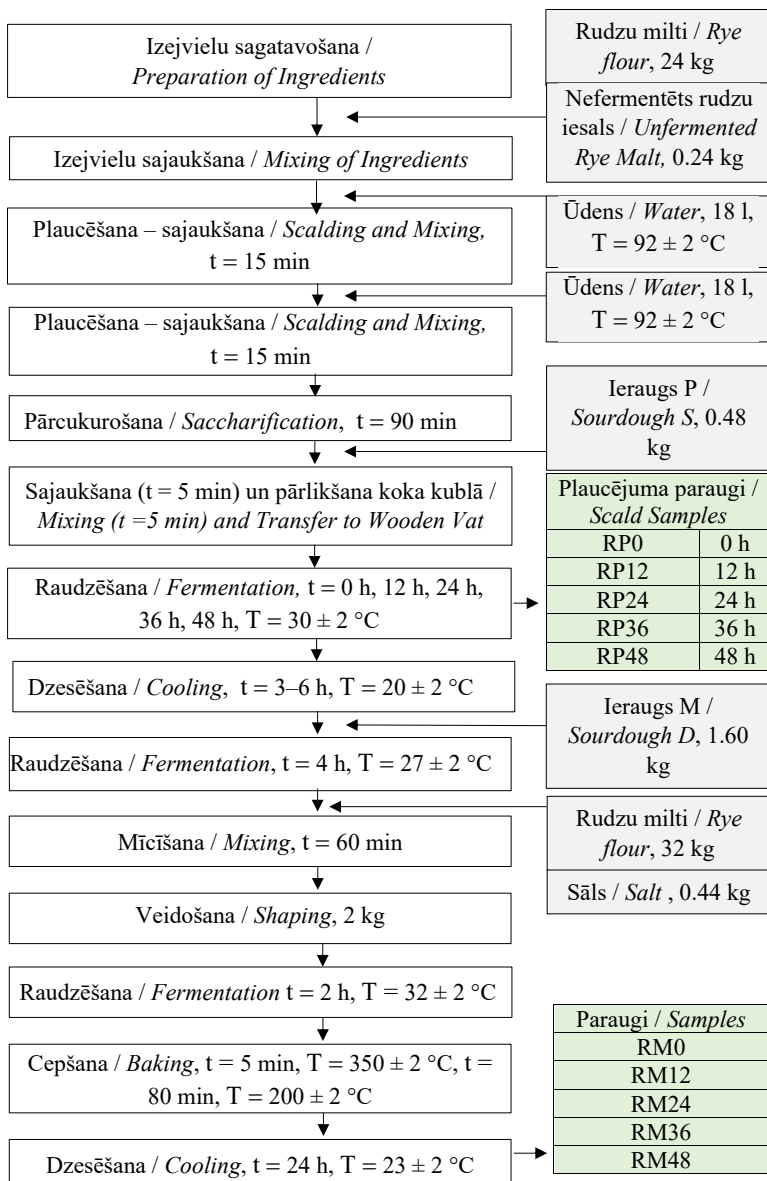
Fig. 1. Flour-Malt Samples Mixing Scheme

Plaucējuma gatavošana un raudzēšana I posmā notika saskaņā ar maizes ražošanā izmantotu tehnoloģiju, to pielāgojot laboratorijas apstākļiem. Lai pagatavotu plaucējumu, miltus un iesalu (2.tabula) sajauc ar karstu ūdeni (2.8 kg, 92 ± 2 °C), izmantojot miklas mīcīšanas iekārtu Teddy (A/S Varimixer, Brøndby, Denmark), 10 min., 2. ātrums, $150 \text{ apgr. min}^{-1}$.

Pārcukurošanas laikā plaucējumu iztur termostātā (klimata kamerā) Memmert ICH 110 (Memmert GmbH, Schwabach, Germany) 90 minūtes 60 ± 2 °C un relatīvajā mitrumā 80%, tādējādi nodrošinot lēnu plaucējuma dzesēšanu no 75 līdz 60 °C. Pēc pārcukurošanas, plaucējumam pievieno Ieraugu P (6% no miltu masas). Plaucējuma raudzēšanu veic termostātā 60% relatīvā mitrumā, nodrošinot pakāpenisku temperatūras samazināšanos, izmantojot šādu režīmu: 55 ± 2 °C temperatūrā 5 h, 50 ± 2 °C temperatūrā 5 h, 45 ± 2 °C temperatūrā 5 h, 35 ± 2 °C temperatūrā 5 h. Visbeidzot, raudzēto plaucējumu dzesē istabas temperatūrā (22 ± 2 °C), lai sasniegtu 30 °C (apmēram 2 h).

Pētījuma II posmā rudzu plaucējumu un mīklas gatavošana un raudzēšana veikta maizes ceptuves “Kēlmēni” ražošanas telpās. Pētījuma II posmā pagatavo un izmanto piecus plaucējumus ar dažādu raudzēšanas laiku: 0 h (neraudzēts), 12 h, 24 h, 36 h un 48 h. Detalizēta tehnoloģiskā shēma plaucējuma un mīklas pagatavošanai ir attēlota 2. attēlā.

Plaucējuma un maizes paraugi liofilizēti, izmantojot liofilizatoru FT33 (Armfield Ltd., Hampshire, Apvienotā Karaliste), ar kondensatora kameras temperatūru -40 °C un spiedienu 6.4 Pa 72 h. Pēc liofilizācijas paraugus sasmalcina, izmantojot Foss Knifetec 295 Mill laboratorijas dzirnavas (Foss Analytical Co., Ltd., Suzhou, Ķīna).



2. att. Tehnoloģiskā shēma rudzu plaucējuma un rudzu maizes gatavošanai /
Fig. 2. Technological Scheme for Rye Scald and Rye Bread Preparation

Pētījumā izmantotās analītiskās metodes un standarti apkopoti 2. tabulā.

2. tabula / Table 2

**Pētījumā izmantotās analītiskās metodes un standarti /
Analysis methods and standards used in the study**

Posms / Stage	Rādītājs / Parameter	Standarts vai metode / Standard or method
I	α -amilāze / α -amylase, CU g ⁻¹	AACC 22-02.01
I	β -amilāze / β -amylase, BU g ⁻¹	Murniece et al., 2024
II / III	pH	AACC 02-52:1999
II / III	Kopējais titrējamais skābums / Total Titratable Acidity, ml 0.1 N NaOH	AACC 02-31.01
I	Krišanas skaitlis / Falling Number, s	AACC 56-81.03
I	Maksimālā viskozitāte / Maximum Viscosity, BU	ICC – Nr.126/1
I	MixoLab tests / MixoLab test	ISO 17718:2013
I / II / III	Cukuri / Sugars, g 100 g ⁻¹ sausnas / dry weight	Murniece et al., 2024
II / III	Organiskās skābes / Organic acids, g 100 g ⁻¹ sausnas / dry weight	Murniece et al., 2025
II / III	Fitīnskābe / Phytic acid, g 100 g ⁻¹ sausnas / dry weight	Murniece et al., 2025
II / III	Fruktāni / Fructans, g 100 g ⁻¹ sausnas	AACC 32-32.01
II	Pienskābes baktērijas, KVV g ⁻¹ / Lactic acid bacteria, CFU g ⁻¹	ISO 15214:1998
II	Raugi, KVV g ⁻¹ / Yeasts, CFU g ⁻¹	ISO 21527-1:2008
II	Mikroorganismu identifikācija ar rRNS gēnu un ITS sekvencēšanu / Identification method rRNA gene and ITS of microorganisms	Reidzane et al., 2021

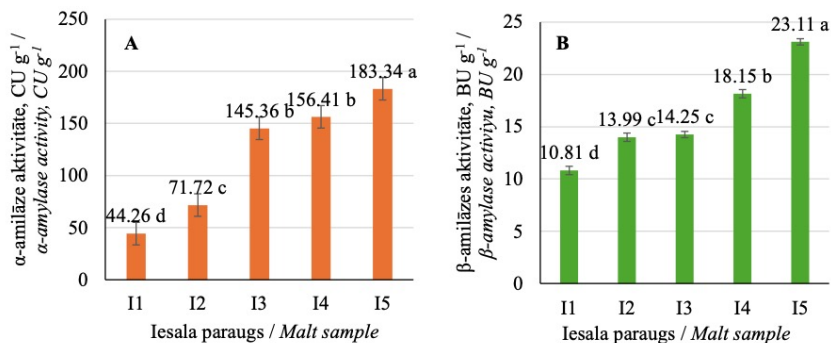
REZULTĀTI UN DISKUSIJA

1. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu un plaucējuma īpašībām

1.1. Rudzu nefermentēto iesalu aktivitātes raksturojums

Pieciem dažādas aktivitātes rudzu nefermentētajiem iesaliem (diastātiskā spēka (DS) diapazons no 170 līdz 408 °WK) tika analizēta α -amilāzes un

β -amilāzes aktivitāte. α -amilāzes aktivitāte būtiski ($p \leq 0.05$) variēja starp paraugiem – no 44.26 līdz 183.34 CU g⁻¹. Savukārt β -amilāzes aktivitāte dažādos iesala paraugos variēja no 10.81 līdz 23.11 BU g⁻¹ (3. att.).



3. att. α -Amilāzes (A) and β -amilāzes (B) aktivitāte rudzu nefermentētā iesala paraugos ar dažādu diastātisko spēku / Fig. 3. α -Amylase (A) and β -Amylase (B) Activity in Rye Unfermented Malt Samples with Different Diastatic Power

Kopumā tika novērota cieša korelācija starp α -amilāzes aktivitāti un iesala diastātisko spēku ($r = 0.87$), taču starp 13 un 14 iesala paraugiem α -amilāzes aktivitātē statistiski nozīmīgas atšķirības netika konstatētas. Līdzīgi β -amilāzes aktivitāte parādīja būtisku ($p \leq 0.05$) korelāciju ar diastātisko spēku ($r = 0.88$), taču starp 12 un 13 iesala paraugiem β -amilāzes aktivitāte būtiski neatšķīrās. Ciešā korelācija apstiprina DS kā raksturojošu lielumu rudzu nefermentētā iesala kombinētajai enzimatiskajai aktivitātei. Savukārt, būtiskās atšķirības starp paraugiem norāda uz to, ka rudzu nefermentētais iesals var būt ar atšķirīgu α -amilāzes un β -amilāzes aktivitāti, ko raksturo DS, un šim rādītājam var būt nozīmīga loma, stabilizējot rudzu miltu reoloģiskās īpašības plaucējuma gatavošanā.

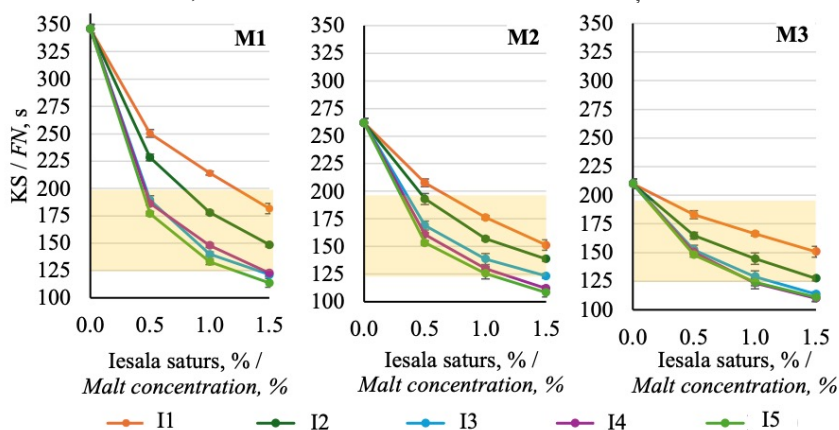
1.2. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām

Pētījumā tika analizēti rudzu miltu paraugi ar plašu KS amplitūdu (346–210 s), tiem pievienojot rudzu nefermentēto iesalu ar dažādu diastātisko spēku (DS 170–408 °WK), variējot ar pievienotā iesala saturu (0.5, 1.0, 1.5%). Analizējot krišanas skaitli, amilogrāfa noteikto maksimālo viskozitāti un Mixolab līkni rudzu miltu un iesala paraugos, tika pētītas reoloģiskās īpašības (ūdens absorbcija, cietes klisterizācijas temperatūra, viskozitāte, amilolītiskā aktivitāte), kas raksturo miltu uzvedību plaucējuma un mīklas gatavošanas laikā.

Krišanas skaitlis

Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības maizes gatavošanā ir cieši saistītas ar to krišanas skaitli (KS), kas kalpo kā enzīmu aktivitātes un cietes hidrolīzes indikators. Zemāks <200 s krišanas skaitlis norāda uz aktīvu enzīmu darbību un cietes hidrolīzi. Optimāls KS diapazons (125–200 s) nodrošina līdzsvarotu enzīmu aktivitāti, kas tālāk nosaka procesa stabilitāti rudzu plaucējuma gatavošanā un raudzēšanā (Stępniewska et al., 2021).

Rudzu miltu krišanas skaitļa (KS) izmaiņas, atkarībā no dažāda diastātiskā spēka un satura rudzu nefermentētā iesala pievienošanas, ir attēlotas 4. attēlā. Iesala pievienošana konsekventi samazināja rudzu miltu KS, un šis samazinājums bija izteiktāks, palielinoties iesala diastātiskajam spēkam un saturam. Šī tendence norāda uz saistību starp pastiprinātu enzīmu aktivitāti, kas paātrina cietes hidrolīzes procesu. Jo lielāks ir pievienotā iesala diastātiskais spēks un daudzums, jo intensīvāk darbojas amilolītiskie enzīmi un intensīvāk notiek cietes hidrolīzes process. Rezultātā samazinās cietes saturs, kas spēj noturēt viskozitāti, un līdz ar to arī samazinās krišanas skaitļa vērtība.



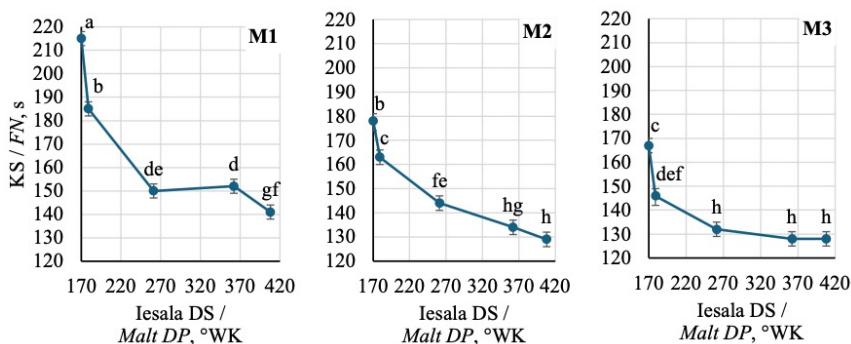
4. att. Dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) un diastātiskā spēka ietekme uz KS rudzu miltu paraugiem M1, M2, M3 / Fig. 4. The Effect of Different Malt Concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%) and Diastatic Power on FN of Rye Flour Samples M1, M2, and M3

Vidējās KS vērtības būtiski ($p \leq 0.05$) atšķīrās starp rudzu miltu paraugiem. Paraugam M1 bija visaugstākais sākotnējais KS – 346 ± 4 s, kam sekoja M2 ar 262 ± 4 s, savukārt, M3 parauga KS bija viszemākais – 210 ± 4 s. Pievienojot iesalu (no 0.5% līdz 1.5%), visiem miltu paraugiem tika novērots būtisks ($p \leq 0.05$) KS samazinājums, un šī ietekme kļuva izteiktāka, palielinoties iesala saturam. Piemēram, M1 paraugā KS samazinājās no 346 ± 4 s līdz 114 ± 5 s, kad iesala daudzums palielinājās no 0% līdz 1.5%, norādot uz tiešu saistību starp

iesala daudzumu un krišanas skaitļa samazinājumu. Līdzīgas tendences tika novērotas arī M2 un M3 paraugos, kur KS, izmantojot 1.5% iesala, samazinājās attiecīgi līdz 108 ± 4 s un 111 ± 3 s.

Visos gadījumos novērota tendence – KS samazinās, pieaugot iesala DS un pievienotajam saturam – norāda uz pastiprinātu cietes hidrolīzi, ko galvenokārt izraisa paaugstināta amilolītisko enzīmu aktivitāte (Struyf et al., 2016).

Iesala diastātiskais spēks (DS) un saturs būtiski ($p \leq 0.05$) ietekmē rudzu miltu krišanas skaitli (KS), kā redzams 5. attēlā. Tomēr, sasniedzot noteiktu DS līmeni, šī ietekme stabilizējas, norādot uz iespējamu enzīmu aktivitātes funkcionālo sliksni. M1 paraugā novērots, ka iesalu I3 un I4 pievienošana rada līdzīgas KS vērtības, kas nesniedz būtiskas ($p > 0.05$) atšķirības, lai gan to DS atšķiras. Tas liecina, ka DS pieaugums virs noteiktas robežvērtības vairs nenodrošina papildus enzīmu efektivitāti. Līdzīgu tendenci novēro arī M2 paraugā, kur I3 un I4 iesalu ietekme uz KS nav būtiski atšķirīga. M3 paraugā šī robežvērtība ir vēl izteiktāka – iesalu I3, I4 un I5 ietekme uz KS ir līdzvērtīga un statistiski būtiski neatšķiras.



5. att. Nosacītās vidējās vērtības dažāda diastātiskā spēka (DS) iesalu ietekmei uz rudzu miltu krišanas skaitli (KS) / Fig. 5. *Conditional Mean Values of the Effect of Different Diastatic Power (DP) Malts on the Falling Number (FN) of Rye Flour*

KS / FN – krišanas skaitlis / falling number; s. Rudzu miltu paraugi / Rye flour samples: M1, M2, M3. Atšķirīgie burti (a–h) uz punktiem parāda būtisku atšķirību ($p \leq 0.05$) starp rezultātiem. / Different letters (a–h) on points indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the values.

DS palielināšana virs 261 °WK nesniedz turpmāku KS samazinājumu, kas apstiprina enzimatiskās aktivitātes robežefektu. Šie rezultāti uzsver iespēju optimizēt ne tikai pievienotā iesala daudzumu, bet arī tā diastātisko raksturojumu, lai sasniegtu maksimālu enzīmu efektivitāti bez pārsātinājuma riska, vienlaikus izvairoties no lieka iesala patēriņa un nepamatotiem izmaksu pieaugumiem. Tādēļ rūpīga DS un iesala satura līdzsvarošana plaucējuma sagatavošanā ir būtiska tehnoloģiskā procesa efektivitātes uzlabošanai.

Rezultāti parādīja, ka nozīme ir gan pievienotā iesala daudzumam, gan iesala DS. Rudzu miltu paraugi ar iesalu, kuram ir zemāks diastātiskais spēks (DS), piemēram, DS 170 °WK (0.5% un 1.0%) vai DS 179 °WK (0.5%), var nenodrošināt pietiekamu enzīmu aktivitāti, lai sasniegtu optimālo krišanas skaitli (KS). Tomēr, palielinot zemāka diastātiskā spēka iesala saturu līdz 1.5% (piemēram, M2: DS 170 vai DS 179), iegūtā enzīmu aktivitāte kļuva līdzvērtīga tai, kas tika sasniegta, izmantojot 0.5% augstāka DS iesalus (piemēram, M2: DP 362 vai DP 408). Šis novērojums liecina, ka lielāks iesala saturs var kompensēt zemāka diastātiskā spēka enzīmu aktivitāti, nodrošinot līdzīgu KS samazinājumu.

Matemātiskais modelis krišanas skaitļa stabilizēšanai rudzu miltos

Lai paplašinātu pētījuma praktisko pielietojumu un nodrošinātu iespēju prognozēt KS, tika izstrādāts matemātiskais modelis kas atspoguļo prognozētās KS izmaiņas atkarībā no pievienotā iesala DS un tā pievienošanas daudzuma. Modelī izmantots rudzu iesals ar DS robežās no 170 līdz 408 °WK. Aprēķini veikti trim rudzu miltu paraugiem (M1, M2, M3) ar atšķirīgu sākotnējo KS – attiecīgi 346, 262, 210 s.

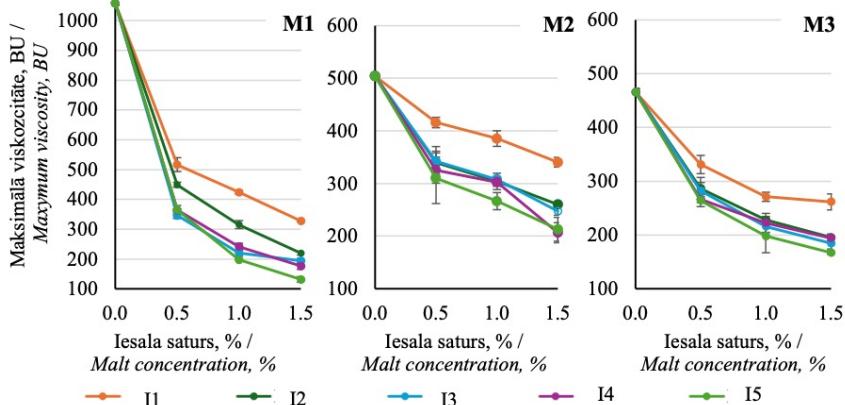
Pētījumā noteikts un modelī apstiprināts, ka lielāks rudzu nefermentētā iesala ar zemāku diastātisko spēku (DS) saturs (piemēram, 1.5%), var nodrošināt līdzvērtīgu enzīmu aktivitātes efektu un krišanas skaitļa samazinājumu kā mazāks iesala ar augstāku DS saturu (piemēram, 0.5%). Šī atziņa ir nozīmīga rudzu plaucējuma tehnoloģijas optimizācijā, jo ļauj ražošanas procesā elastīgi pielāgot iesalu un tā daudzumu atkarībā no pieejamajiem izejmateriāliem, vienlaikus nodrošinot stabilu raudzēšanas vidi un kontrolētu enzīmu aktivitāti. Rezultāti arī uzsver, ka pārmērīgi augsta DS iesala lietošana, var radīt nevēlamu pārsātinājumu, kas var ietekmēt mīklas īpašības, tādēļ būtiska ir gan DS, gan iesala satura līdzsvarota izvēle.

Maksimālā viskozitāte

Maksimālā viskozitāte (MV) ir nozīmīgs rādītājs, jo tas ir cieši saistīts ar cietes sadalīšanās pakāpi un enzimatisko aktivitāti, īpaši α - un β -amilāžu ietekmē. Augstāka MV (>600 BU) vērtība norāda uz lielāku cietes uzbriešanas spēju un mazāku tās hidrolīzi, savukārt zemāka MV (<400 BU) vērtība liecina par intensīvāku cietes hidrolīzi, ko veicina paaugstināta enzīmu aktivitāte (Verwimp et al., 2006), piemēram, nefermentēta iesala pievienošanas gadījumā. Palielinoties iesala saturam, viskozitāte visos rudzu miltu-iesala paraugos statistiski nozīmīgi samazinās (6. att.), kas norāda uz ciešu sakarību starp pievienotā iesala daudzumu un maksimālās viskozitātes samazinājumu.

Korelācijas koeficienti starp iesala saturu un maksimālo viskozitāti miltu paraugiem konstatēti šādi: M1 ($r = -0.74$), M2 ($r = -0.67$), M3 ($r = -0.78$). MV samazinājums miltu-iesala paraugos atspoguļo amilolītisko enzīmu, īpaši α -amilāžu un β -amilāžu, nozīmi polisaharīdu, īpaši cietes hidrolīzē klīsterizācijas laikā (Autio et al., 1996; Peng & Jin, 2020). Enzimātiskā hidrolīze veicina cietes sadalīšanos īsākos ķēdes fragmentos (dekstrīnos, maltozē), kas mazāk spēj

uzbriest un saistīt ūdeni, kā rezultātā samazinās kopējā viskozitāte (Hrušková et al., 2003).



6. att. Rudzu nefermentētā iesala DS un satura ietekme uz rudzu miltu (M1, M2, M3) maksimālo viskozitāti (BU) / Fig. 6. *Effect of Diastatic Power (DP) and Content of Rye Unfermented Malt on the Maximum Viscosity (BU) of Rye Flour M1, M2, M3*

BU – Brabendera vienības / *Brabender units*. Rudzu miltu paraugi / *Rye flour samples* : M1, M2, M3. Iesala paraugi / *Malt samples* I1, I2, I3, I4, I5.

Lai analizētu diastātiskā spēka (DS) ietekmi uz miltu-iesala paraugu MV, tika izveidots statistiskais modelis (3. tabula). Lai gan, palielinoties iesala DS, MV būtiski samazinājās, DS ietekme stabilizējās pēc noteikta līmeņa, kas nozīmē, ka turpmāks DS pieaugums būtiski neietekmēja viskozitātes samazinājumu.

3. tabula / *Table 3.*

Rudzu nefermentētā iesala diastātiskā spēka (DS) un satura ietekme uz rudzu miltu (M1, M2, M3) maksimālo viskozitāti (BU) / Marginally Estimated Mean Values Showing the Effect of Malt with Different Diastatic Power (DP) (°WK) on the Maximum Viscosity of Rye Flour (BU)

Iesala paraugs / Malt sample	Maksimālā viskozitāte / <i>Maximum Viscosity, BU</i>		
	M1	M2	M3
I1	423 ± 95a	381 ± 38a	288 ± 38a
I2	328 ± 115b	301 ± 40b	237 ± 46b
I3	253 ± 81c	299 ± 48b	228 ± 50bc
I4	261 ± 95c	278 ± 63bc	228 ± 36bc
I5	231 ± 120d	263 ± 49c	210 ± 50c

BU – Brabendera vienības / *Brabender units*. Rudzu miltu paraugi / *Rye flour samples* : M1, M2, M3. Iesala paraugi / *Malt samples* I1, I2, I3, I4, I5.

Vērtības, kurām kolonnā ir viens un tas pats burts, būtiski neatšķiras ($p > 0.05$). / *Values sharing the same letter within a column are not significantly different ($p > 0.05$).*

Iesala DS un satura mijiedarbības izpēte apstiprināja, ka iesals ar augstu DS (362 °WK un vairāk) ne vienmēr ir nepieciešams, lai sasniegtu vēlamu viskozitāti rudzu plaucējumā. Piemēram, lielāks iesala ar zemāku DS saturs (I1, 1.5%) samazināja maksimālo viskozitāti līdz līmenim, kas bija līdzvērtīgs, izmantojot zemāku iesala ar augstāku DS (0.5%, I5) saturu. Šis rezultāts uzsver kompensējošo attiecību starp DS un iesala saturu, norādot uz iesalu izvēles nozīmi, lai optimizētu enzīmu aktivitāti un sasniegtu mērķa viskozitāti, kā arī lai nodrošinātu stabilu ražošanas procesu un samazinātu izmaksas.

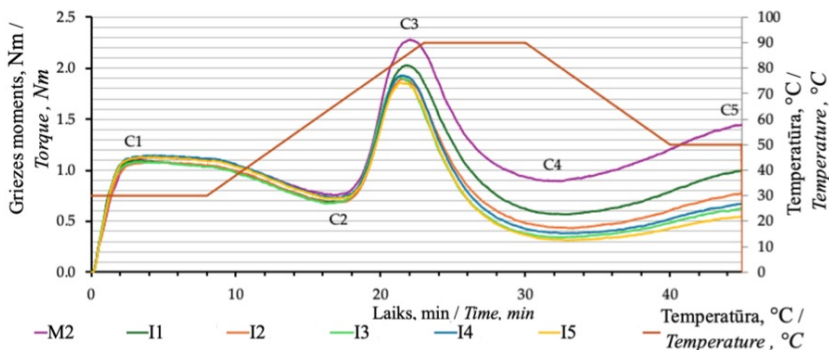
Plaucēšanas tehnoloģijā augsta viskozitāte apgrūrina apstrādes procesu, palēnina raudzēšanu un ietekmē maizes kvalitāti (Stępniewska et al., 2018). Viskozitātes samazināšana ar enzīmu palīdzību, pievienojot iesalu, uzlabo mīklas plūstamību, veicina ātrāku raudzēšanu un uzlabo apstrādi ražošanas procesā. Pētījumi liecina, ka viskozitātes samazināšana klīsterizētas cietes izmantošanā ir nozīmīgs faktors, lai efektīvizētu produktu ražošanas procesu (Xie et al., 2024).

Jāņem vērā, ka literatūrā bieži minētās optimālās maksimālās viskozitātes vērtības rudzu miltiem (400–600 BU) (Verwimp et al., 2006) attiecas galvenokārt uz to piemērotību tieši mīklas mīcīšanai, nevis uz plaucējuma sagatavošanu. Rudzu plaucējumam, kas kalpo kā substrāts raudzēšanai, ir nepieciešama atšķirīga – parasti zemāka – viskozitāte, lai nodrošinātu optimālus apstākļus mikroorganismu darbībai. Šķidrāka plaucējuma konsistence uzlabo enzīmu piekļuvi polisaharīdiem un veicina cietes hidrolīzi, kas, savukārt, nodrošina vienkāršo cukuru veidošanos, būtisku raudzēšanā iesaistīto pienskābes baktēriju vielmaiņai. Turklāt zemāka viskozitāte atvieglo apstrādes procesus un uzlabo raudzēšanas dinamiku, padarot plaucējuma struktūru piemērotāku mikroorganismu aktivitātei. Tādējādi, lai gan dažos paraugos maksimālā viskozitāte bija zemāka par klasiskajiem kvalitātes kritērijiem, šo novērojumu nevar vērtēt kā negatīvu, bet gan kā tehnoloģiski pamatotu iezīmi plaucējuma kontekstā.

Miltu reoloģisko īpašību analīze (Mixolab)

Lai novērtētu rudzu miltu un nefermentētā iesala maisījumu reoloģiskās īpašības, tika veikta Mixolab analīze, kas sniedza detalizētu ieskatu ūdens absorbcijas spējā, mīklas stabilitātē un cietes klīsterizācijas procesā dažādos temperatūras posmos (7.att)

C3 punkts raksturo cietes klīsterizācijas maksimumu. Visiem rudzu miltu paraugiem iesala pievienošana samazināja C3 vērtību. Piemēram, M1 kontroles paraugā C3 bija 2.45 Nm, bet pievienojot 1.5% I5 iesalu – 1.72 Nm. Līdzīgas tendences vērojamas arī M2 un M3 miltos. Šo samazinājumu izskaidro tas, ka enzimatiskās aktivitātes ietekmē ciete jau daļēji sadalās pirms pilnīgas klīsterizācijas, līdz ar to neveidojas tik augsta viskozitāte. Palielinoties iesala saturam, C3 vērtība konsekventi samazinās, piemēram, M1 miltos ar I5 iesalu C3 samazinājās no 1.99 Nm (0.5%) līdz 1.72 Nm (1.5%).



7. att. Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku un 1.0% satura ietekme uz rudzu miltu M2 Mixolab rezultātiem (līknēm) / Fig. 7.

The Effect of Rye Unfermented Malt with Various Diastatic Power and a Concentration of 1.0% on the Mixolab Results (Curves) of Rye Flour M2

Rudzu miltu paraugs / Rye flour sample: M2 – 262 s; Iesala paraugi ar dažādu diastātisko spēku / Malt samples with different diastatic power: I1 – 170 °WK; I2 – 179 °WK; I3 – 261 °WK; I4 – 362 °WK; I5 – 408 °WK.

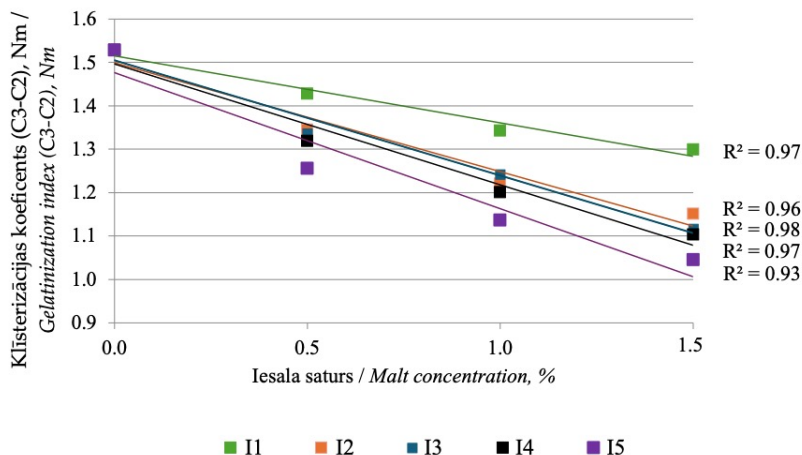
Klisterizācijas intensitāti raksturo C3–C2 koeficients, kura vērtība samazinājās, pievienojot iesalu (8.att.).

Vislielākais samazinājums novērots ar I1 un I2 (1.53 un 1.40 Nm), bet iesali ar augstāku DS (I3–I5) uzrādīja līdzīgas, nemainīgas vērtības (1.22–1.29 Nm), norādot uz enzīmu darbības piesātinājumu. Augstie determinācijas koeficienti ($R^2 = 0.93\text{--}0.98$) apliecina prognozējamu enzīmu ietekmi uz viskozitāti, kas ir būtiski tehnoloģiskā procesa kontrolei.

Sasniedzot ~90 °C, mīklas viskozitāte samazinās (C4 punkts), atspoguļojot intensīvu enzīmu darbību. Iesala pievienošana būtiski pazemināja C4 vērtību visos M1 paraugos, īpaši ar augstāka DS iesaliem (I3–I5), kuru rādītāji stabilizējās (0.54–0.59 Nm), norādot uz piesātinājuma efektu. Viskozitātes starpība starp C3 un C4 (C3–C4) raksturo cietes degradācijas intensitāti. Tā palielinājās, pievienojot iesalu, sasniedzot maksimumu ar I3 (1.331 Nm), bet I4 un I5 uzrādīja līdzīgas vērtības, kas apliecina līdzvērtīgu enzīmu ietekmi.

Iesala satura palielināšana no 0.5% līdz 1.5% kopumā pastiprināja enzīmu darbību, taču pie augsta DS efekts vairs nebija lineārs, norādot uz iespējamu substrāta ierobežojumu. Tādēļ iesala devu ieteicams pielāgot konkrēto miltu īpašībām.

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, turpmākajam pētījuma posmam, kur tiek analizēti cukuru veidošanās plaucējumā pēc pārcukurošanas fāzes un pēc 24 h raudzēšanas, izvēlēts viens rudzu miltu paraugs un trīs rudzu iesala paraugi, tos pievienojot 3 dažādos saturos (0.5%, 1.0%, 1.5%).



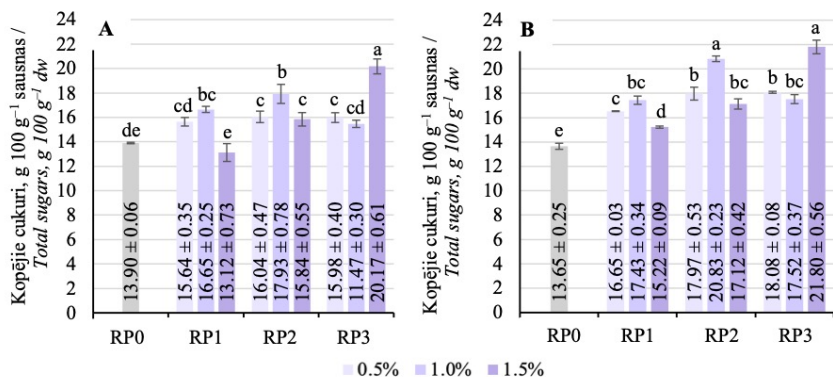
8. att. Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku (DS) un satura ietekme uz rudzu miltu M2 klīsterizācijas koeficientu (C3-C2) / Fig. 8. Effect of Rye Unfermented Malt with Different Diastatic Power (DP) and Concentration on the Gelatinization Index (C3-C2) of Rye Flour M2

1.3. Rudzu iesala satura un DS ietekme uz cukuru sastāvu pēc miltu cietes hidrolīzes (pārcukurošanas) un pēc 24 h raudzēšanas

Lai novērtētu pārcukurošanas un raudzēšanas (24 h) ietekmi uz cukura izmaiņām plaucējumā, tika sagatavoti plaucējuma paraugi RP1, RP2, RP3 ar 0.5%, 1.0% un 1.5% iesala saturu. Plaucējuma RP1 gatavošanā izmantots M2 (KS – 262 s) miltu un iesala I1 (170 °WK) maisījums, RP2 – M2 miltu un iesala I3 (261°WK), RP3 – I5 (408 °WK) maisījums. Kā kontrole tika izmantota rudzu miltu M2 plaucējuma paraugs bez pievienota iesala.

Kopējie cukuri

Kopējo cukuru saturs pēc pārcukurošanas (9.A att.) plaucējumos būtiski ($p \leq 0.05$) palielinājās salīdzinājumā ar kontroli bez iesala (RP0 13.90 ± 0.06 g 100 g⁻¹ sausas), tomēr cukuru satura pieaugums netika novērots visos gadījumos un nebija viennozīmīgi atkarīgs no pievienotā iesala proporcijas.



9. att. **Kopējo cukuru saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B)** / Fig. 9. **Total Sugar Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)**

RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / rye flour M2 scald sample without malt;

RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 un iesala I5 (RP3) maisījuma ar dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) / Samples of scald after saccharification and after 24 h fermentation prepared from different flour-malt blend in different concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%): rye flour F2 and malt I1 mixture (RP1), rye flour M2 and malt I3 mixture (RP2), rye flour M2 and malt I5 mixture (RP3).

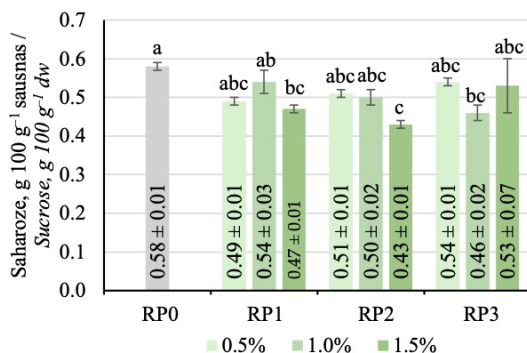
Atšķirīgie burti (attēlā A: a–d, attēlā B: a–e) uz kolonnām norāda uz būtiskām atšķirībām ($p < 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a–d in Figure A and a–e in Figure B) on bars indicate significant differences ($p < 0.05$) between the samples.

Saharoze

Rudzu plaucējuma paraugos pēc pārcukurošanas fāzes saharozes saturs svārstījās no 0.43 līdz 0.58 g 100 g⁻¹ saunas (10. att.). Augstākais saharozes saturs konstatēts kontroles paraugā (RP0 0.58 ± 0.01 g 100 g⁻¹ saunas), kuram netika pievienots iesals. Savukārt, zemākie rādītāji novēroti paraugos RP2 ar 1.5% iesala saturu (0.43 ± 0.02 g 100 g⁻¹) un RP3 ar 1.0% iesala saturu (0.43 ± 0.02 g 100 g⁻¹). Šo saharozes samazinājumu varētu skaidrot ar intensīvāku invertāzes aktivitāti no pievienotā iesala enzīmiem vai mikroorganismiem, kas veicināja saharozes hidrolīzi par glikozi un fruktozi pārcukurošanas procesā. Tā kā saharoze ir disaharīds, ko invertāze ātri šķēļ, tās zemāks līmenis var liecināt par aktīvu enzimatisku noārdīšanos nevis mazāku veidošanos.

Netika novērota skaidra saistība starp pievienoto iesala daudzumu vai tā diastātisko spēku un saharozes saturu pārcukurotā plaucējuma paraugos, kas liecina, ka saharozes saturs šajā posmā ir relatīvi stabils un to būtiski neietekmē izmantotā iesala DS un daudzums.

Pēc raudzēšanas nevienā paraugā saharoze netika konstatēta, kas norāda uz pienskābes baktēriju priekšrocību saharozes izmantošanā raudzēšanas laikā. Kā arī saharoze var sadalīties glikozē un fruktozē, kas, savukārt tālāk var izraisīt šo cukuru satura izmaiņas pēc 24 h raudzēšanas.



10. att. Saharozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas /

Fig. 10. Content of Sucrose in the Scald After Saccharification

RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / rye flour M2 scald sample without malt;

RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 un iesala I5 (RP3) maisījuma ar dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) / Samples of scald after saccharification and after 24 h fermentation prepared from different flour-malt blend in different concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%): rye flour M2 and malt I1 mixture (RP1), rye flour M2 and malt I3 mixture (RP2), rye flour M2 and malt I5 mixture (RP3).

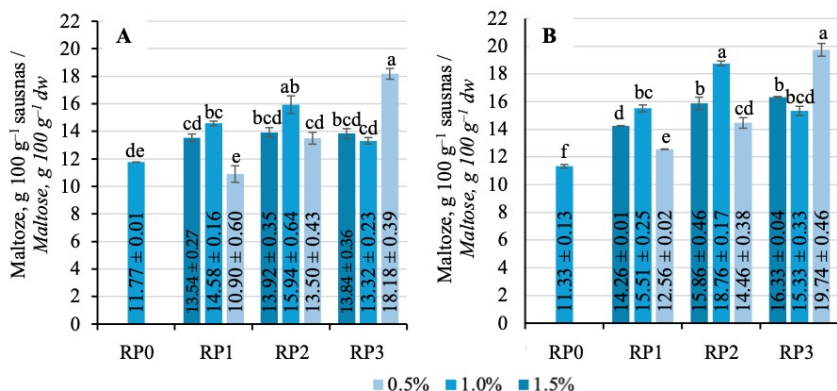
Atšķirīgie burti uz stabiņiem norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Maltoze

Pārcukurošanas rezultāti (11.A att.) parāda, ka plaucējuma paraugos maltozes saturs bija būtiski ($p \leq 0.05$) augstāks, salīdzinot ar kontroles paraugu bez iesala (RP0 11.77 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas), un svārstījās no 13.32 līdz 18.18 g 100 g⁻¹ sausnas. Visaugstākais maltozes saturs tika konstatēts paraugā RP3 ar 1.5% iesala saturu – 18.18 ± 1.39 g 100 g⁻¹ sausnas, kas norāda uz aktīvu amilāžu darbību, kuru nodrošina pievienotais iesals. Maltozes pieaugums liecina par cietes hidrolīzi enzīmu α - un β -amilāžu ietekmē pārcukurošanas procesā, kura efektivitāti veicināja kontrolētā temperatūra (55–65 °C), kas ir šo enzīmu darbības optimālais diapazons.

Pēc 24 h raudzēšanas (11.B att.) maltozes saturs visos paraugos saglabājās salīdzinoši augsts, un vairākos gadījumos pat pieauga, salīdzinot ar pārcukurošanas fāzi, īpaši paraugos RP2 un RP3. Šis pieaugums, visticamāk, ir

saistīts ar turpinātu cietes sadalīšanos raudzēšanas laikā, saglabājoties iesalā esošo amilāžu aktivitātei, īpaši β -amilāzei, kura demonstrē relatīvi augstāku stabilitāti skābākā vidē (optimālais pH 4.5–5.5). Tā turpina nošķelt maltozes vienības no nereducējošiem cietes galiem arī pazemināta pH apstākļos. Papildus tam, pienskābes baktērijas šajā raudzēšanas posmā var neizmantot maltozi tik intensīvi kā glikozi, kas arī var veicināt šī disaharīda uzkrāšanos. Vienlaikus RP1 paraugā ar 1.5% iesalu maltozes saturs saglabājās salīdzinoši zems (15.51 ± 0.25 g 100 g⁻¹ sausnas), kas atkārtoti norāda uz iespējamu enzimatiskās aktivitātes atšķirību starp dažādiem iesala paraugiem un komplekso mijiedarbību starp procesiem (gan veidojās cukuri, gan tiek patērēti, pārvērsti).



11. att. **Maltozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Fig. 11. Maltose Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours Fermentation (B)**

RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / rye flour M2 scald sample without malt;

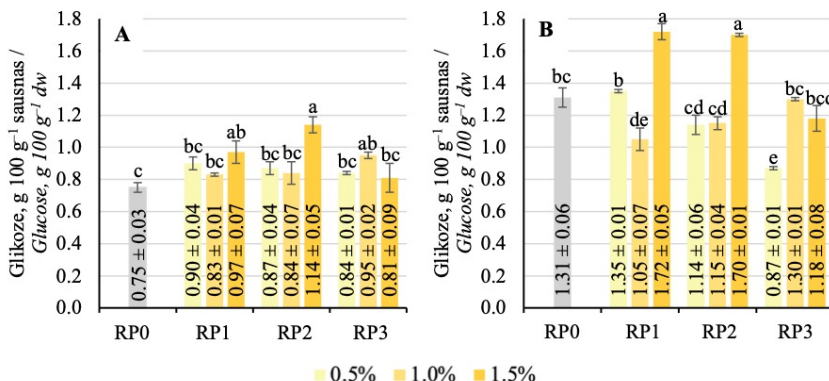
RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 un iesala I5 (RP3) maisījuma ar dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) / Samples of scald after saccharification and after 24 h fermentation prepared from different flour-malt blend in different concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%): rye flour M2 and malt I1 mixture (RP1), rye flour M2 and malt I3 mixture (RP2), rye flour M2 and malt I5 mixture (RP3).

Atšķirīgie burti (attēlā A: a–e, attēlā B: a–f) uz stabiņiem norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a–e in Figure A and a–f in Figure B) on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Maltozes daudzums pēc 24 h raudzēšanas nesamazinājās, dažos paraugos tika novērota pat tās palielināšanās, kā arī paraugos pēc pārcukurošanās vai raudzēšanas fāzes netika novērota izteikta iesala DS vai daudzuma ietekme uz maltozes saturu.

Glikoze

Pārcukurota plaucējuma paraugiem ar pievienotu iesalu bija augstāks glikozes saturs salīdzinot ar kontroli, tomēr būtiskas atšķirības tika novērotas tikai dažiem paraugiem. Paraugam ar 1.5% iesalu I3 (RP2), tika konstatēts lielākais glikozes pieaugums – 52% salīdzinājumā ar kontroles paraugu (12.A att.). Šis glikozes pieaugums ir saistīts ar pakāpenisku cietes hidrolīzi, ko veicina amilāžu enzīmu darbība, veidojot dekstrīnus, glikozi un maltozi (Akamine et al., 2023). Amilāzes, īpaši α -amilāze, sašķel cietes α -1,4-glikozīdīdās saites, pārveidojot to īsākās polisaharīdu ķēdēs un vienkāršos cukuros, tostarp glikozē (Muralikrishna & Nirmala, 2005).



12. att. **Glikozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B)** / Fig. 12. **Glucose Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)**

RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / rye flour M2 scald sample without malt;

RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 un iesala I5 (RP3) maisījuma ar dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) / Samples of scald after saccharification and after 24 h fermentation prepared from different flour-malt blend in different concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%): rye flour M2 and malt I1 mixture (RP1), rye flour M2 and malt I3 mixture (RP2), rye flour M2 and malt I5 mixture (RP3).

Atšķirīgie burti (attēlā A: a–c, attēlā B (a–e) uz kolonnām norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a–c in Figure A and a–e in Figure B) on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

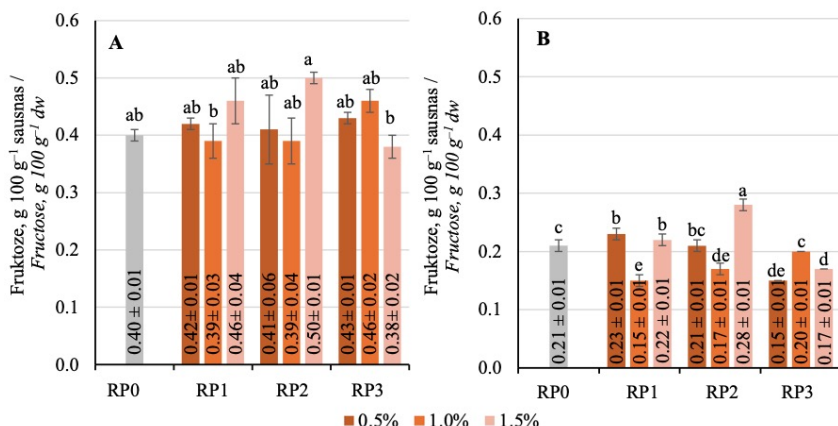
Pēc 24 h raudzēšanas glikozes saturs visos paraugos palielinājās (12.B att.), taču joprojām netika novērota viennozīmīga DS vai pievienotā daudzuma ietekme šajā procesā. Šie rezultāti saskan ar Klupsaite et al. (2023) pētījumu, kurā pēc 24 h raudzēšanas rudzu plaucējumā glikozes saturs pieauga par 13.2%, liecinot, ka raudzēšana var pastiprināt glikozes veidošanos. Šo pieaugumu

iespējams skaidrot ar β -amilāzes un glikoamilāzes saglabāto aktivitāti skābākā vidē, kas turpina šķelt dekstrīnus un oligosaharīdus.

Fruktoze

Pārcukurošanas posmā, kad ciete tiek intensīvi hidrolizēta, amilāžu (īpaši α - un β -amilāzes) ietekmē galvenokārt veidojas maltoze, dekstrīni un glikoze. Fruktozes veidošanās šajā posmā notiek minimāli, jo ciete pati par sevi nesatur fruktozes vienības. Tomēr fruktoze var rasties netiešā ceļā. Ja rudzu miltos vai iesalā ir pieejama saharoze, to var šķelt invertāze – enzīms, kas sadala saharozi glikozē un fruktozē. Šis process visbiežāk norit raudzēšanas laikā, kad aktivizējas raugi un pienskābes baktērijas (Gänzle, 2014).

Pēc pārcukurošanās fruktozes saturs paraugos svārstījās no 0.38 ± 0.02 g 100 g⁻¹ (RP3, 1.5%) līdz 0.50 ± 0.0 g 100 g⁻¹ (RP2, 1.5%), savukārt kontroles paraugā tas novērots 0.40 ± 0.01 g 100 g⁻¹ (3.11.A att.).



13. att. Fruktozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Fig. 13. Fructose Content in Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)

RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / rye flour M2 scald sample without malt;

RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanās un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 un iesala I5 (RP3) maisījuma ar dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) / Samples of scald after saccharification and after 24 h fermentation prepared from different flour-malt blend in different concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%): rye flour M2 and malt I1 mixture (RP1), rye flour M2 and malt I3 mixture (RP2), rye flour M2 and malt I5 mixture (RP3).

Atšķirīgie burti (attēlā A: a, b, attēlā B (a–e) uz kolonnām norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a, b in Figure A and a–e in Figure B) on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Tomēr izteikta iesala aktivitātes (DS) vai satura ietekme uz fruktozes saturu pārcukurotā plaucējumā netika novērota.

Pēc 24 h raudzēšanas tika novērots būtisks ($p \leq 0.05$) fruktozes satura samazinājums visos paraugos (13.B att.) salīdzinot ar paraugiem pēc pārcukurošanās. Šis samazinājums ir saistīts ar pienskābes baktēriju spēju izmantot fruktozi kā substrātu saviem vielmaiņas procesiem. PB fruktozes metabolisma rezultātā veidojas pienskābe, kas būtiski veicina mīklas kopējā titrējamā skābuma palielināšanos.

Kopējo cukuru saturs rudzu plaucējumā būtiski ($p \leq 0.05$) atšķīrās starp kontroles paraugu (bez pievienota iesala) un paraugiem ar atšķirīgu iesala saturu. Plaucēšana un iesala izmantošana ir efektīvs veids, kā iegūt cukurus raudzēšanas procesam un barības vides nodrošināšanai ieraugam bez papildu cukura pievienošanas. Augstāks cukuru saturs pēc pārcukurošanas norāda uz intensīvu cietes sadalīšanos, radot labvēlīgus apstākļus mikroorganismu attīstībai. Pēc 24 h raudzēšanas saharoze netika konstatēta, kas norāda, ka tā pilnībā tika hidrolizēta par vienkāršajiem cukuriem – glikozi un fruktozi, kurus PB izmanto kā primāros enerģijas avotus. Lai gan fruktozes saturs samazinājās, tā joprojām saglabājās nozīmīgā daudzumā, nodrošinot mikroorganismiem barības vidi turpmākai vielmaiņai. Interesanti, ka maltozes un glikozes saturs pēc 24 h raudzēšanas nedaudz palielinājās, kas varētu būt saistīts ar cietes turpmāku hidrolīzi vai enzīmu aktivitāti plaucējumā. Šī cukuru pieejamība liecina, ka raudzēšanas procesam nepieciešamās barības vielas vēl ir, un turpmākas mikrobioloģiskās aktivitātes laikā cukuru sadalīšanās un pārveidošanās var turpināties, ietekmējot gan maizes garšu, gan skābumu un struktūru. Pētījuma turpinājumā tiek pētīta ilgstošas raudzēšanas ietekme uz cukuru saturu, mikroorganismu attīstību un to metabolītu veidošanos.

Turpmākā pētījuma veikšanai tika izvēlēta optimāla miltu-iesala kombinācija – rudzu milti M2 (KS – 262 s) un 1% iesals I3 (DS – 261 °WK). Iesala pievienošana būtiski ietekmē cukuru veidošanos pārcukurošanās laikā, taču iesala aktivitātei un pievienotajam iesala daudzumam nebija būtiska nozīme cukuru daudzumā pārcukurotā plaucējumā. Iesala aktivitāte šajā paraugā bija vidēja, taču pietiekoši intensīva, lai hidrolizētu cieti. Šāda iesala aktivitāte sakrīt ar pieejamo un rekomendējamo plaucējuma gatavošanā. Tas nodrošina pietiekamu, bet ne pārmērīgu diastātisko aktivitāti, kas varētu negatīvi ietekmēt mīklas stabilitāti un maizes struktūru. Šim paraugam KS bija 139 ± 3 s, maksimālā viskozitāte 308 ± 5 BU – norāda uz vairāk zemu viskozitāti un labāku šķidrumu dispersiju plaucējumā, kas var labi ietekmēt tālāko raudzēšanas procesu, it īpaši, ja tiek izmantoti pilngraudu un rupja maluma rudzu milti. Paraugam, kuram pēc pārcukurošanas posma konstatēts augstākais kopējo cukuru saturs (17.92 ± 0.78 g uz 100 g^{-1} sausas), ir potenciāls nodrošināt optimālu barības vielu vidi raudzēšanai. Tas izvēlēts kā piemērotākais, jo nodrošina līdzsvarotu cietes hidrolīzi, labu raudzēšanas potenciālu un atbilstīgu rudzu maizes kvalitāti, saskaņā ar literatūrā aprakstītajiem kritērijiem.

Nefermentētā rudzu iesala pievienošana kopumā veicināja cukuru satura palielināšanos plaucējumā, apstiprinot tēzi par iesala ietekmi uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām un cukuru veidošanās veicināšanu, taču netika novērota konsekventa sakarība starp iesala diastātisko spēku vai pievienotā daudzuma palielināšanu un cukuru veidošanās intensitāti.

2. Mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņas plaucējuma pārcukurošanas un ilgstošas raudzēšanas laikā

Mikroorganismu vairošanās raudzēšanas laikā ir cieši saistīta ar barības vides sastāvu un raudzēšanas apstākļiem, galvenokārt, temperatūru un laiku. PB raudzēšanas procesā pamatā veido pienskābi, kas pazemina pH un ietekmē gan mīklas īpašības, maizes struktūru, gan raudzēšanas dinamiku.

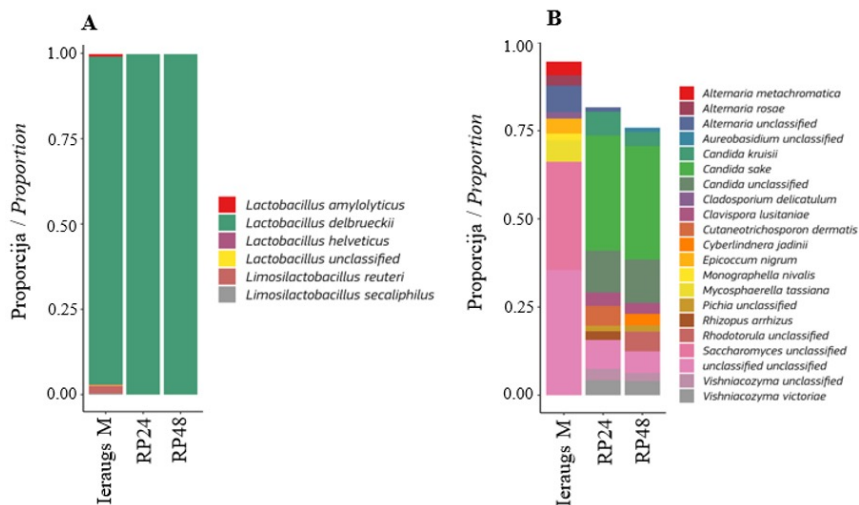
Pētījuma II posmā plaucējuma gatavošanai tika izmantots rudzu miltu M2 paraugs un iesals I3 (1%). Ilgstošas raudzēšanas ietekmes analīzei gatavoti paraugi – neraudzēts plaucējums (RP0) un 12, 24, 36, 48 h raudzēts plaucējums (RP12, RP24, RP36, RP48).

2.1. Mikrobiotas raksturojums raudzētā plaucējumā

Mikroorganismu identifikācijas rezultāti uzrādīja, ka Ieraugā P un raudzētā plaucējumā (24 h) dominēja *Lactobacillus delbrueckii* un saglabāja dominanci arī pēc 48 h raudzēšanas (14.A att.).

Ierauga P un 24 h raudzēta plaucējuma mikrobiotas līdzība ir skaidrojama ar to, ka Ieraugs P iegūts no 24 h raudzēta plaucējuma. Līdzīgi kā raudzētā plaucējumā Ieraugā M starp biežāk sastopamajām pienskābes baktērijām konstatēta *Lactobacillus delbrueckii*, taču identificētas arī *Lactobacillus amylolyticus*, *Limosilactobacillus reuteri* un *Lactobacillus helveticus*.

Ieraugā P un raudzētā plaucējumā starp biežāk sastopamajām raugveida sēnēm konstatētas *Candida sake* un *Candida kruisii*, taču novērota arī *Saccharomyces* spp. (14.B att.). Ieraugā M dominēja *Saccharomyces* spp. un ar retāku pārstāvniecību konstatēja *Alternaria* spp., *Mycosphaerella tassiana* mikroskopiskās sēnes.

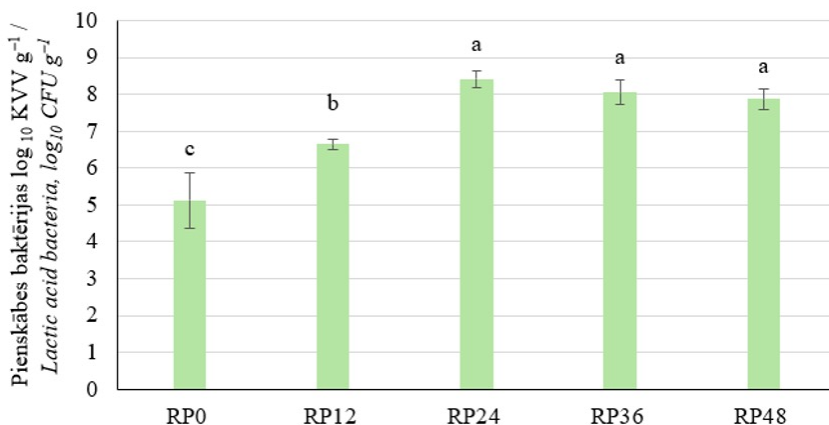


14. att. Pienskābes baktēriju (A) un mikroskopisko sēņu (B) daudzveidība ieraugā un raudzētā plaucējumā / Fig. 14. Diversity of Lactic Acid Bacteria (A) and Microscopic Fungi (B) in Sourdough and Fermented Scald

Ieraugs M / Sourdough D; RP24 – 24 h raudzēts plaucējums / 24 h fermented scald; RP48 – 48h raudzēts plaucējums / 48 h fermented scald.

Analizējot mikroorganismu vairošanos plaucējuma raudzēšanas laikā, tika novērots ($p \leq 0.05$) pienskābes baktēriju skaita pieaugums (15. att.). PB skaits ievērojami palielinājās pirmajās 12 raudzēšanas stundās no 5.1 līdz 6.7 $\log_{10}$ KVV g^{-1} . No 24. līdz 48. raudzēšanas stundai netika konstatētas būtiskas izmaiņas, sasniedzot maksimālo vērtību 8.4 $\log_{10}$ KVV g^{-1} pēc 24 stundām. Rezultāti parāda, ka raudzētā plaucējumā pienskābes baktērijas dominē un tām ir galvenā loma plaucējuma raudzēšanas procesā. Raudzētā plaucējumā raugu KVV skaits palielinājās līdz 2.9 $\log_{10}$ KVV g^{-1} pēc 48 h raudzēšanas. Raudzētā plaucējumā novērots nepietiekams raugu KVV skaits mīklas irdināšanas nodrošināšanai, tāpēc mīklas raudzēšanai nepieciešams papildus rauga avots, ko nodrošina ar Ieraugu M. Ieraugā P raugu KVV g^{-1} nepārsniedza 2.6 $\log_{10}$ KVV g^{-1} , kamēr Ieraugā M – 8.5 $\log_{10}$ KVV g^{-1} , kas liecina par pietiekamu mīklas irdināšanas kapacitāti.

Pienskābes baktēriju vairošanās dinamika liecina, ka *Lactobacillus delbrueckii* spēj augt vidēs ar paaugstinātu temperatūru (40–55 °C). *Lactobacillus delbrueckii* izmanto piena produktu raudzēšanā un kā barības vielas tās var izmantot glikozi, fruktozi, mannozi un saharozi (Rizzello & De Angelis, 2022). Pārcukurošanās fāzē plaucējumā veidojas cukuri (fruktoze, glikoze un maltoze), kas kalpo kā barības vide pienskābes baktērijām (Klupsaite et al., 2023). Var secināt, ka plaucējumā esošie cukuri pozitīvi ietekmē *Lactobacillus delbrueckii* vairošanos.

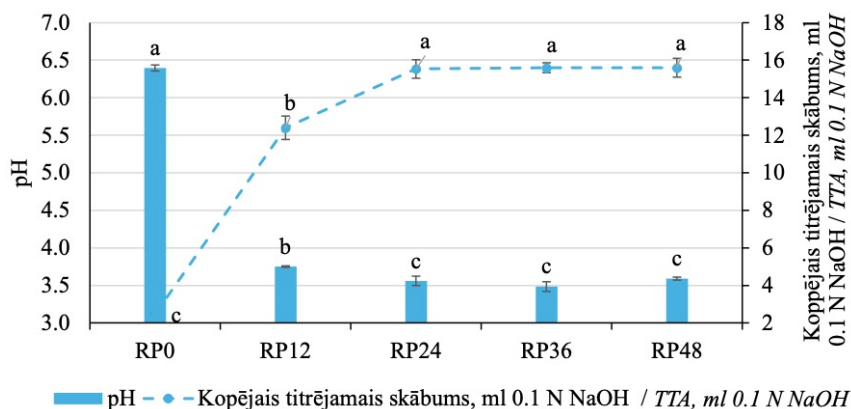


15. att. Pieniskābes baktēriju KVV skaita izmaiņas neraudzētā un raudzētā plaucējumā 48 h raudzēšanas laikā / Fig 15. *Changes in Lactic Acid Bacteria CFU During Fermentation in Unfermented and Fermented Scald over 48 Hours*

RP0 – neraudzēts plaucējums / *unfermented scald*; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / *fermented scald*; a–c norāda uz būtiskām atšķirībām starp paraugiem ($p \leq 0.05$); a–c indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$).

pH vērtība 48 h raudzēšanas periodā samazinājās no 6.40 ± 0.04 līdz 3.59 ± 0.02 , un visievērojamākais kritums tika novērots pirmajās 12 stundās (16. att.). Pēc 24 h raudzēšanas pH un kopējais titrējamais skābums saglabājās stabils, un starp paraugiem netika konstatētas būtiskas atšķirības – pH bija 3.5, bet kopējais titrējamais skābums sasniedza 15.6 ml NaOH.

pH diapazonā no 3.5 līdz 4.3 tiek uzskatīts par labi attīstītu ierauga indikatoru. Optimālās temperatūras un pietiekams cukuru saturs ir veicinājis strauju PB vairošanos, ko apliecina ievērojams pH samazinājums un kopējā titrējamā skābuma pieaugums raudzēšanas laikā. Atšķirībā no pētījuma rezultātiem, Klupšaitē et al. (2023) konstatēja, ka plaucējuma raudzēšanā ar *Lactiplantibacillus paracasei* pēc 24 h ierauga raudzēšanas pH bija 4.57. Tas norāda uz *Lactobacillus delbrueckii* spēju produktīvi ražot pienskābi.



16. att. Raudzēta plaucējuma pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, raudzējot dažādu ilgumu / Fig 16. pH and TTA (ml 0.1 N NaOH) Values of Fermented Scald at Different Duration

RP0 – neraudzēts plaucējums / *unfermented scald*; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / *fermented scald*.

Atšķirīgie burti (a–c) virs stabiņiem/punktiem katrā mērījumu kopā norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) / Different letters (a–c) above the bars/points within each measurement set indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

2.2. Cukuru satura izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā

Raudzēšanas laikā notiekošās cukuru satura izmaiņas atspoguļo mikroorganismu darbību un barības vides pārveides dinamiku (5. tabula). Kopējo cukuru saturs neraudzētā plaucējumā pēc pārcukurošanās fāzes bija 30.78 ± 0.09 g 100 g⁻¹ sausnas (0 h). Pēc 12 h raudzēšanas tika novērots kopējo cukuru satura palielinājums, sasniedzot 33.25 ± 0.63 g 100 g⁻¹ sausnas, kas atbilst 4.8% pieaugumam no sākotnējās vērtības. Tomēr ilgākā raudzēšanā (24 h, 36 h, 48 h) kopējā cukuru saturā būtiskas izmaiņas vairs netika novērotas, kas apstiprina līdzsvara sasniegšanu raudzēšanas procesā, līdzīgi kā pH un titrējamā skābuma rezultātiem un iespējams, saistītu ar enzimatisko reakciju un mikroorganismu metabolisma stabilizēšanos.

Pēc plaucējuma pārcukurošanas fruktozes saturs bija 0.40 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas. Savukārt pēc 12 h raudzēšanas fruktoze vairs netika konstatēta. Tas ir skaidrojams ar to, ka raudzēšanas sākuma posmā *Lactobacillus delbrueckii*, kas tika identificēts plaucējumā, metabolismā izmanto fruktozi, veicinot tās pilnīgu patēriņu (Loponen & Gänzle, 2018).

Glikozes saturs neraudzētā plaucējumā samazinājās no 0.99 ± 0.05 g 100 g⁻¹ sausnas (0 h) līdz 0.72 ± 0.08 g 100 g⁻¹ sausnas pēc 12 stundām, taču turpmāk raudzēšanas laikā palielinājās, sasniedzot maksimumu 1.08 ± 0.01 g 100 g⁻¹

sausnas pēc 48 stundām (5. tabula). Sākotnējais glikozes samazinājums var būt saistīts ar tās izmantošanu mikroorganismu metabolisma procesos, savukārt vēlāks pieaugums iespējams raudzēšanas laikā notiekošās cietes hidrolīzes rezultātā.

Visaugstākais saharozes saturs novērots uzreiz pēc pārcukurošanas fāzes ($1.01 \pm 0.09 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas), taču raudzēšanas gaitā tas būtiski samazinājās, sasniedzot $0.25 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas pēc 48 stundām (5. tabula). Šis kritums liecina par saharozes sadalīšanos, ko veicina mikroorganismu aktivitāte, pārveidojot saharozi par vienkāršajiem cukuriem raudzēšanas procesā.

Savukārt maltozes saturs raudzēšanas laikā saglabājās stabils, ar nelielu pieaugumu no $25.33 \pm 0.62 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas sākotnēji (0 h) līdz $27.56 \pm 0.12 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas pēc 12 stundām (4. tabula).

4. tabula / Table 4

**Cukuru saturs ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) neraudzētā un raudzētā rudzu
plaucējumā / Sugar Content ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ dw}$) in Rye Scald Fermented for
Different Time Periods**

Cukuri / Sugars	Rudzu plaucējuma paraugos / Rye scald sample				
	RP0	RP12	RP24	RP36	RP48
KOPĀ TOTAL	$30.78 \pm 0.09\text{b}$	$33.25 \pm 0.63\text{a}$	$32.64 \pm 0.54\text{ab}$	$33.44 \pm 1.42\text{ab}$	$33.53 \pm 0.39\text{ab}$
Saharoze Sucrose	$1.01 \pm 0.09\text{a}$	$0.50 \pm 0.03\text{b}$	$0.31 \pm 0.04\text{bc}$	$0.36 \pm 0.02\text{bc}$	$0.25 \pm 0.01\text{c}$
Maltoze Maltose	$25.33 \pm 0.62\text{b}$	$27.56 \pm 0.12\text{a}$	$26.6 \pm 0.15\text{ab}$	$27.31 \pm 1.06\text{ab}$	$26.99 \pm 0.03\text{ab}$
Glikoze Glucose	$0.99 \pm 0.05\text{ab}$	$0.72 \pm 0.08\text{b}$	$0.87 \pm 0.15\text{ab}$	$0.88 \pm 0.01\text{ab}$	$1.08 \pm 0.01\text{a}$
Fruktoze Fructose	0.40 ± 0.01	ND	ND	ND	ND
Pārējie Other	$3.05 \pm 0.13\text{b}$	$4.47 \pm 0.40\text{a}$	$4.86 \pm 0.21\text{a}$	$4.89 \pm 0.32\text{a}$	$4.21 \pm 0.34\text{a}$

RP0 – neraudzēts plaucējums / *unfermented scald*; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / *fermented scald*;

dw – sausna / *dry weight*; ND – nav noteikts / *not detected*; a–c norāda uz būtiskām atšķirībām starp paraugiem vienā rindā ($p \leq 0.05$) / a–c indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$) in a row.

Kopumā cukuru satura izmaiņas ilgstošas raudzēšanas laikā bija nelielas, novērotas dažas svārstības. Pēc raudzēšanas saglabājās ievērojams cukuru atlikums, kas saskan ar iepriekšējās pētījuma daļas rezultātiem – pēc pārcukurošanas fāzes un 24 h raudzēšanas cukura satura samazinājums bija neliels.

Ravyts et al. (2011) konstatēja līdzīgu tendenci – pēc 24 h rudzu ierauga raudzēšanas saharoze vairs netika konstatēta, savukārt tika novērots augsts glikozes, fruktozes un maltozes saturs. Saharozes satura samazināšanās norāda, ka tā ir būtisks substrāts pienskābes baktēriju metabolismā, kura efektivitāte ir atkarīga no baktēriju celma, substrāta pieejamības, temperatūras, skābuma un raudzēšanas ilguma (Bartkiene et al., 2020). Augstais maltozes un glikozes atlikums var būt saistīts ar substrāta sarežģīto struktūru un ar to, ka pilngraudu rudzu miltos esošie polisaharīdi (piemēram, ciete) tiek pakāpeniski enzimatiski hidrolizēti. Šī procesa intensitāti nosaka enzīmu aktivitāte, kas atkarīga no pieejamā substrāta, pH, temperatūras un PB spējas sintezēt amilolītiskos enzīmus (Klupsaite et al., 2023).

Raudzēšanas laikā konstatētās cukuru svārstības norāda uz aktīviem metabolisma procesiem, kuros cukuri var tikt gan patērēti mikroorganismu metabolismā, gan pārveidoti dažādu enzimatisko reakciju ietekmē. Pienskābes baktērijas, kas dominē plaucējuma raudzēšanas laikā, izmanto dažādus cukurus kā substrātu enerģijas iegūšanai un metabolītu sintēzei.

Papildus disaharīdu šķelšanai raudzēšanas laikā turpina darboties arī amilolītiskie enzīmi, piemēram, β -amilāze un glukoamilāze, kas šķēļ cieti un dekstrīnus, veidojot glikozi un maltozi arī vēlākās raudzēšanas stadijās. Šo enzīmu aktivitāte palielina brīvo cukuru saturu raudzēšanas vidē, nodrošinot papildu substrātus mikroorganismu metabolismam. Tādējādi, papildus sākotnēji pieejamajiem cukuriem, raudzēšanas gaitā iespējama arī jaunu cukuru veidošanās no polisaharīdiem un oligosaharīdiem. Šīs vielmaiņas izmaiņas izskaidro sākotnējo cukuru satura samazināšanos mikroorganismu patēriņa dēļ, kā arī iespējamo cukuru satura stabilizāciju vai pat pieaugumu vēlākos raudzēšanas posmos. Šie procesi ietekmē ne tikai substrātu pieejamību mikroorganismiem, bet arī skābuma veidošanos, kā arī ietekmē gala produkta garšu un aromātu.

Kopumā cukuru dinamika raudzēšanas procesā ir komplekss, daudzfaktoru process, kurā vienlaikus notiek gan cukuru patērēšana mikroorganismu enerģijas iegūšanai, gan to pārveidošanās enzīmu darbības ietekmē. Šo procesu līdzsvars ir atkarīgs no ierauga mikrobiotas sugu sastāva, substrāta sākotnējā ķīmiskā sastāva, raudzēšanas apstākļiem, tostarp temperatūras un pH, kā arī raudzēšanas ilguma. Šīs izmaiņas tieši ietekmē galaprodukta sensorās īpašības un uzturvērtību, nosakot skābuma pakāpi, garšu un struktūru.

2.3. Organisko skābju saturs rudzu plaucējumā

Organiskās skābes veidojas plaucējuma un mīklas raudzēšanas laikā, taču arī rudzu milti satur dažādas organiskās skābes, kas var ietekmēt garšas profilu. Rudzu miltos konstatēts neliels organisko skābju saturs, galvenokārt hīnskābe (0.64 ± 0.05 g 100 g⁻¹ sausnas) un ābolskābe (0.16 ± 0.06 g 100 g⁻¹ sausnas), kā

arī nelielos daudzumos pienskābe, etiķskābe, skābeņskābe un dzintarskābe. Raudzētā plaucējuma organisko skābju profils parādīts 5. tabulā.

5. tabula / Table 5

**Organisko skābju saturs neraudzētā un raudzētā rudzu plaucējumā /
Organic Acid Content in Unfermented and Fermented Scald**

Organiskās skābes / Organic acids	Organisko skābju saturs (g 100 g ⁻¹ sausnas) rudzu plaucējuma paraugos / Organic acid content (g 100 g ⁻¹ dw) in rye scald samples				
	RP0	RP12	RP24	RP36	RP48
Pienskābe / Lactic acid	0.27 ±0.01c	2.83 ± 0.07b	3.74 ± 0.16a	3.85 ± 0.03a	3.72 ± 0.32a
Etiķskābe / Acetic acid	0.03 ± 0.01b	0.12 ± 0.02a	0.01 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b
Propionskābe / Propionic acid	ND	ND	0.01 ± 0.00a	0.01 ± 0.00a	0.01 ± 0.00a
Sviestskābe / Butyric acid	0.09 ± 0.02b	0.18 ± 0.01a	0.01 ± 0.00c	0.01 ± 0.00c	0.01 ± 0.00c
Succinic acid / Dzintarskābe	0.07 ± 0.01b	0.16 ± 0.01a	0.14 ± 0.00a	0.14 ± 0.02a	0.13 ± 0.01a
Oxalic acid / Skābeņskābe	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.01a	0.03 ± 0.01a	0.04 ± 0.02a
Hīnskābe / Quinic acid	0.55 ± 0.03a	0.76 ± 0.07a	0.72 ± 0.16a	0.78 ± 0.13a	0.74 ± 0.21a
Vīnskābe / Tartaric acid	0.21 ± 0.02a	0.25 ± 0.03a	0.24 ± 0.06a	0.28 ± 0.06a	0.25 ± 0.06a
Ābolskābe / Malic acid	0.20 ± 0.01a	0.12 ± 0.01b	0.11 ± 0.00b	0.10 ± 0.01b	0.11 ± 0.01b
KOPĀ / TOTAL	1.45 ± 0.04b	4.46 ± 0.16a	5.01 ± 0.40a	5.22 ± 0.20a	5.02 ± 0.02a

dw – sausna / dry weight /; ND – nav noteikts / not detected/;

RP0 – neraudzēts plaucējums / unfermented scald; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / fermented rye scald.

Atšķirīgi burti (a–c) norāda uz būtiskām atšķirībām starp paraugiem rindā ($p \leq 0.05$) / Letters a–c indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$) within a row.

Raudzētā plaucējumā organisko skābju profils, galvenokārt, sastāvēja no pienskābes, kuras saturs strauji (18 reizes) pieauga pirmajās 12 stundās, sasniedzot maksimumu pēc 24 stundām.

Pēc 24 h raudzēšanas pienskābes līmenis saglabājās stabils, un 48 h raudzēšanā būtiskas izmaiņas netika novērotas. Pārējās organiskās skābes bija mazākā daudzumā. Hīnskābes un vīnskābes saturs raudzēšanas laikā nemainījās, savukārt ābolskābes un sviestskābes saturs būtiski samazinājās pēc 12 stundām. Svārstības etiķskābes saturā dažādos raudzēšanas laikos skaidrojamas ar vides izmaiņām un PB metabolisma norisi. Pienskābes veidošanās raudzēšanas laikā

izskaidro pH samazināšanos un kopējā titrējamā skābuma pieaugumu raudzētā plaucējumā.

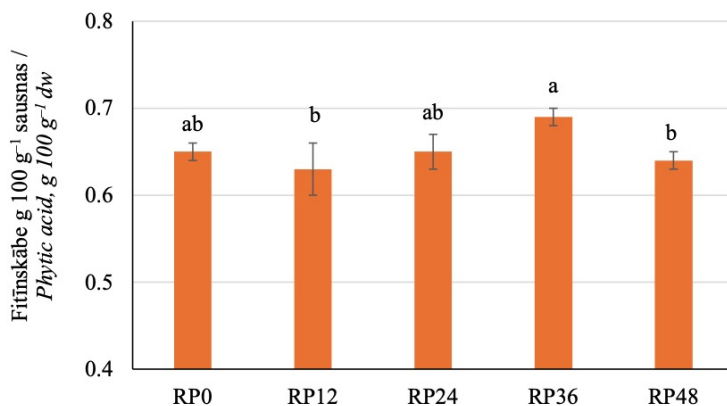
2.4. Raudzēšanas laika ietekme uz fitīnskābes saturu rudzu plaucējumā

Fitīnskābes klātbūtne rudzu miltos ir nozīmīgs faktors to uzturvērtības kontekstā, jo tā spēj veidot nešķīstošus kompleksus ar minerālvielām, samazinot to biopieejamību. Raudzēšanas process var veicināt fitīnskābes degradāciju, ja tajā aktīvi iesaistās fitāzi producējoši mikroorganismi vai fitāzes enzīmi tiek aktivizēti piemērotos apstākļos. Tomēr raudzēšanas efektivitāte fitīnskābes noārdīšanā ir atkarīga no vairākiem faktoriem, tostarp raudzēšanas vides pH, temperatūras un mikroorganismu daudzveidības vai sugas.

Fitīnskābes saturs rudzu plaucējumā pēc pārcukurošanas fāzes bija $0.65 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausas (17. att.). Raudzēšanas laikā tika novērotas nelielas svārstības fitīnskābes saturā, taču būtisks tās samazinājums netika konstatēts. Plaucējuma raudzēšanas laikā strauja fitīnskābes noārdīšanās netika novērota, kas liecina par fitāzes aktivitātes neesamību.

Lai gan pienskābes baktērijas spēj veicināt fitīnskābes degradāciju noteiktos apstākļos, pētījuma apstākļos, kur raudzētā plaucējumā dominēja *Lactobacillus delbrueckii*, netika novērota būtiska tās noārdīšanās. Fitāze ir enzīms, kas spēj šķelt fitīnskābi, un tā var būt lokalizēta baktēriju šūnas iekšienē (šūnu jeb intracelulārā vai šūnas sienīgai piesaistītā formā) vai izdalīta ārējā vidē (ārpusšūnu jeb ekstracelulārā formā). Ārpusšūnu fitāze darbojas tieši vidē, kur atrodas substrāts – fitīnskābe –, un tādēļ ir efektīvāka šīs molekulas noārdīšanā. Šūnu fitāze, savukārt, var darboties tikai tad, ja substrāts nonāk tiešā kontaktā ar šūnas virsmu vai tiek internalizēts, kas var ierobežot tās efektivitāti. Nuobariene et al. (2015) konstatēja *Limosilactobacillus panis*, *Limosilactobacillus reuteri* un *Limosilactobacillus fermentum*, kas izolētas no kviešu un rudzu ieraugiem, šūnu un ārpusšūnu fitāzes aktivitāti. Cizeikiene et al. (2020) atklāja ārpusšūnu fitāzes aktivitāti ieraugā ar termofilām pienskābes baktērijām *L.bulgaricus*, *L.acidophylus* un *L.rossiae* vidē, kurā $\text{pH} < 3.5$ 40 °C temperatūrā.

Fitāzes aktivitāti ietekmē arī raudzēšanas apstākļi, temperatūra un pH. Tomēr iegūtie rezultāti liecina, ka fitīnskābes saturs rudzu plaucējumā raudzēšanas laikā būtiski nemainījās, norādot uz fitāzes aktivitātes ierobežotību šajos apstākļos. Tas var būt saistīts ar optimālu raudzēšanas apstākļu trūkumu fitāzes aktivitātes nodrošināšanai vai specifisku mikroorganismu, kas spēj efektīvi hidrolizēt fitīnskābi, neesamību.



17. att. **Fitīnskābes saturs neraudzētā un raudzētā plaucējuma** / Fig. 17. ***Phytic Acid Content in Unfermented Scald and Scald Fermented for Different Duration***

RP0 – neraudzēts plaucējums / *unfermented scald*; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / *fermented scald*.

Atšķirīgi burti (a, b) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) / *Different letters (a, b) indicate significant differences ($p \leq 0.05$).*

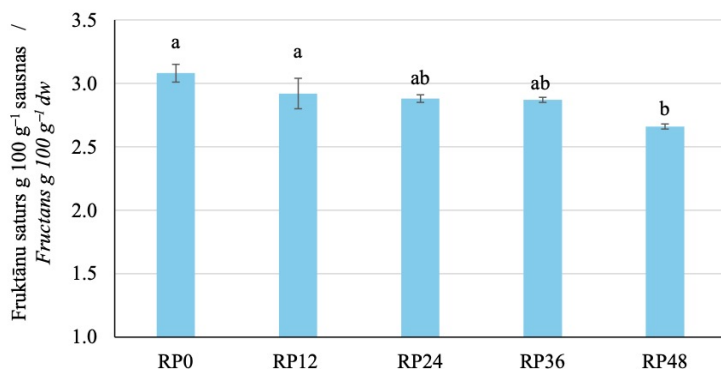
2.5. Raudzēšanas laika ietekme uz fruktānu saturu rudzu plaucējuma

Raudzēšanas laikā fruktānu degradācija notiek mikroorganismu un enzīmu darbības rezultātā, un tās intensitāte ir atkarīga no raudzēšanas apstākļiem un iesaistīto mikroorganismu metabolītiem.

Fruktānu saturs rudzu plaucējuma pēc pārcukurošanās fāzes noteikts 3.08 ± 0.07 g 100 g⁻¹ sausnas (18. att.). Raudzēšanas laikā tika novērots pakāpenisks fruktānu satura samazinājums – pēc 12 stundām tas samazinājās līdz 2.92 ± 0.12 g uz 100 g⁻¹ sausnas. Šī tendence turpinājās, un pēc 48 stundām fruktānu saturs bija 2.66 ± 0.02 g uz 100 g⁻¹ sausnas. Lai gan fruktānu saturs visā raudzēšanas procesā samazinājās vienmērīgi, pēc 24 stundām tas būtiski neatšķīrās ($p > 0.05$) kā pēc 36 h, kas norādīja uz fruktānu hidrolīzes tempa samazināšanos.

Raudzēšanas laikā darbojas enzīmi un mikroorganismi, kas var veicināt fruktānu hidrolīzi, noārdot tos līdz monosaharīdiem. Raudzēšanas laikā fruktānu šķelšanā iesaistītie enzīmi ir inulīnāze, fruktozidāze, levānāze un β-fruktofuranozidāze, un to aktivitāte ir atkarīga no konkrētajiem pienskābo baktēriju celmiem, kas iesaistīti raudzēšanas procesā. Fruktānu noārdīšanās rezultātā veidojas fruktoze, kas var ietekmēt cukuru kopējo profilu (Pejcz et al., 2024). Pejcz et al. (2024) pētījumā tika konstatēts, ka fruktānu saturs rudzu miltu ieraugā būtiski samazinās, un šo samazinājumu ietekmē gan izmantotās

pienskābo baktēriju sugas, gan raudzēšanas ilgums. Pejcz et al. (2024) konstatēja, ka pēc 48 h ierauga raudzēšanas fruktānu saturs samazinājās no 3.7 g 100 g⁻¹ sausnas līdz 1.2 g, ja tika izmantota *Lactiplantibacillus plantarum*, un līdz 1.06 g 100 g⁻¹ sausnas, ja raudzēšana notika ar *Lacticaseibacillus casei*. Iegūtie rezultāti norāda, ka *L.delbrueckii* nepiemīt izteiktas fruktānu degradācijas īpašības, kas rudzu plaucējuma raudzēšanas laikā varētu nozīmīgi samazināt fruktānu daudzumu.



18. att. **Fruktānu saturs neraudzētā un raudzētā plaucējumā atkarībā no raudzēšanas ilguma / Fig. 18. Fructan Content in Unfermented Scald and Scald Fermented for Different Duration**

RP0 – neraudzēts plaucējums / *unfermented scald*; RP12 – 12 h, RP – 24 h, RP – 36 h, RP – 48 h raudzēts plaucējums / *fermented scald*. Atšķirīgi burti (a, b) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$). / *Different letters (a, b) indicate significant differences ($p \leq 0.05$).*

3. Rudzu maizes kvalitātes novērtējums

Rudzu maizes kvalitāti nosaka virkne bioķīmisku un tehnoloģisku faktoru, tostarp raudzēšanas ilgums un izejvielu mijiedarbība. Plaucējums šajā kontekstā kalpo kā būtiska sastāvdaļa – tas ne vien nodrošina noteiktu struktūru un cukuru saturu, bet arī veido vidi mikroorganismu attīstībai un vielmaiņas procesiem.

3.1. Cukuru saturs rudzu maizes paraugos

Cukuru saturs rudzu maizē ir komplekss parametrs, kuru nosaka izejvielu sastāvs, enzimatiskie un mikrobioloģiskie procesi visā ražošanas ciklā. Plaucējuma un ierauga mikrobiota un to sintezētie enzīmi var būtiski ietekmēt ogļhidrātu hidrolīzi un turpmāko cukuru profilu, nosakot galaprodukta sensorās un tehnoloģiskās īpašības. Cukuru izmaiņas maizē saistītas gan ar izmantotā

plaucējuma raudzēšanas laiku, ieraugu, ko pievieno mīklas raudzēšanai, kā arī ar miltu pievienošanu mīklai. Papildus cukuru (saharozi) mīklai nepievieno.

Mīklas pamatu veido plaucējums, kura cukuru saturs tika apskatīts iepriekš (5. tabula). Gatavojot mīklu, papildus tiek pievienoti rudzu pilngraudu milti – tajos esošie cukuri (kopējie cukuri $2.04 \pm 0.03 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) var papildināt gala produkta cukuru saturu, kā arī miltu enzīmu darbības rezultātā var notikt cietes hidrolīze un veidoties jauni cukuri. Papildus tam, mīklas raudzēšanai tiek pievienots ieraugs, kura sastāvā ir gan pienskābes baktērijas, gan raugi. To metabolisma aktivitātes rezultātā daļa cukuru var tikt patērēta rūgšanas procesos, veidojot organiskās skābes un citus raudzēšanas blakusproduktus. Cukuru satura izmaiņas maizes paraugos apkopotas 6. tabulā.

Fruktozes saturs maizes paraugos pieauga, palielinoties plaucējuma raudzēšanas ilgumam, sākot no $0.37 \pm 0.04 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas RB0 un sasniedzot maksimumu $0.89 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas RB24. Glikozes saturs uzrādīja nebūtiskas ($p = 0.076$) svārstības raudzēšanas gaitā, ar visaugstāko saturu RM36 ($0.56 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) un zemāko saturu RM48 ($0.43 \pm 0.03 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas). Šīs izmaiņas var būt saistītas ar cukuru dinamiku raudzēšanas procesā, kurā mikroorganismi patērē un sintezē dažādus monosaharīdus atkarībā no substrāta pieejamības un metabolisma aktivitātes.

6. tabula / Table 6

Cukuru saturs rudzu maizes paraugos, izmantojot plaucējumu ar dažādu raudzēšanas ilgumu / Content of Sugars in Rye Bread Prepared with Scald Fermented for Different Durations

Cukuri/ Sugars	Cukuru saturs ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) rudzu maizes paraugos / Content of sugars ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ dw}$) in rye bread samples				
	RM0	RM12	RM24	RM36	RM48
KOPĒJIE / TOTAL	$16.58 \pm 0.42a$	$16.82 \pm 0.37a$	$16.56 \pm 0.47a$	$16.54 \pm 0.26a$	$16.41 \pm 0.45a$
Saharoze / Sucrose	$0.50 \pm 0.05a$	$0.32 \pm 0.06ab$	$0.31 \pm 0.05b$	$0.37 \pm 0.06ab$	$0.30 \pm 0.03b$
Maltoze / Maltose	$13.32 \pm 0.14a$	$12.62 \pm 0.15ab$	$12.20 \pm 0.18b$	$12.11 \pm 0.12b$	$12.12 \pm 0.27b$
Glikoze / Glucose	$0.49 \pm 0.06a$	$0.45 \pm 0.03a$	$0.46 \pm 0.01a$	$0.56 \pm 0.01a$	$0.43 \pm 0.03a$
Fruktoze / Fructose	$0.37 \pm 0.04d$	$0.63 \pm 0.01bc$	$0.89 \pm 0.01a$	$0.57 \pm 0.02c$	$0.67 \pm 0.01b$
Pārējie / Other	$1.33 \pm 0.01b$	$2.13 \pm 0.10a$	$2.03 \pm 0.22a$	$2.27 \pm 0.05a$	$2.23 \pm 0.10a$

dw – dry weight; Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald

used. Atšķirīgi burti (a–d) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem rindā / a–d indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$) in a row.

Saharozes saturs pakāpeniski samazinājās, palielinoties raudzēšanas ilgumam, sākot no 0.50 ± 0.05 g 100 g⁻¹ sausnas RM0 un sasniedzot zemāko līmeni 0.30 ± 0.03 g 100 g⁻¹ sausnas RM48. Saharozes samazināšanās ir saistīta ar tās hidrolīzi par glikozi un fruktozi, procesu, ko veicina ne tikai pienskābes baktēriju enzimatiskā aktivitāte, bet arī rauga darbība mīklas raudzēšanas laikā. Šāds cukuru pārveides mehānisms ir būtisks raudzēšanas gaitā, jo nodrošina substrātu mikroorganismu metabolismam un ietekmē maizes sensorās īpašības (Sahin et al., 2019).

Maltoze, kas bija dominējošais cukurs maizes paraugos, uzrādīja nelielu samazināšanos, sākot no 13.32 ± 0.14 g 100 g⁻¹ sausnas RM0 un stabilizējoties 12.11–12.12 g 100 g⁻¹ sausnas diapazonā no RM24 līdz RM48.

Kopējais cukuru saturs saglabājās bez būtiskām izmaiņām visos maizes paraugos ($p = 0.694$). Kopējais cukuru saturs rudzu maizē nodrošina salduma skābuma balansu maizes garšas profilā.

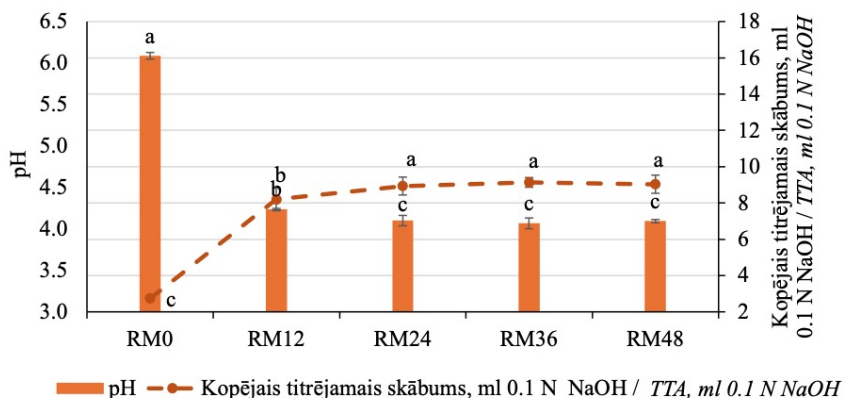
Plaucējuma raudzēšanas ilgums ietekmēja maizes cukuru profilu, īpaši attiecībā uz fruktozi un saharozi, savukārt maltozes un glikozes saturs saglabājās relatīvi stabils. Maizes cukuru saturs bija ievērojami zemāks nekā plaucējumā, kas norāda, ka cukuri bagātīgi veidojas plaucējuma pārcukurošanas fāzē, taču tikai neliela daļa tiek patērēta pienskābes baktēriju un raugu rūgšanas procesā. Turklāt maizes pagatavošanā tiek pievienoti papildus milti, un mīklas raudzēšanas laiks ir īsāks nekā plaucējuma raudzēšanas process, kas arī ietekmē cukuru saturu un veidu maizē.

3.2. Organisko skābju saturs rudzu maizē

Organisko skābju saturs un sastāvs rudzu maizē ir nozīmīgs rādītājs, kas ietekmē gan tās garšu un aromātu, gan struktūru un uzglabāšanas īpašības. Gan kopējo skābju daudzums (kopējais titrējamais skābums), gan skābuma intensitāte (pH), kā arī organisko skābju sastāvu galvenokārt nosaka vielmaiņas procesi, kas norisinās raudzēšanas laikā plaucējuma un ierauga mikrobiotas darbības rezultātā.

Maizes paraugiem tika novērota līdzīga skābuma izmaiņu tendence kā plaucējumā raudzēšanas laikā. Maizes paraugs RM0, kurā plaucējums netika raudzēts, uzrādīja augstāko pH 6.09 ± 0.04 un zemāko titrējamo skābumu 2.7 ± 0.12 ml 0.1 N NaOH (19. att.). Izmantojot 12 h raudzētu plaucējumu, rudzu maizes paraugu pH bija 4.26 ± 0.06 , savukārt paraugos ar 24–48 h raudzēšanas procesu nebija būtisku izmaiņu ($p = 0.655$) un pH vērtība bija vidēji 4.10. Līdzīgi bija kopējā titrējamā skābuma rezultāti – izmantojot 12 h raudzētu plaucējumu, tas bija 8.20 ± 0.20 , savukārt starp paraugiem ar plaucējumu, kas raudzēts 24, 36 un 48 h, būtiska atšķirība nepastāvēja ($p = 0.644$) un bija vidēji 9.03 ml 0.1 N

NaOH. Iegūtie rezultāti atbilst kvalitatīvas rudzu maizes prasībām un apstiprina iepriekš konstatēto, ka, izmantojot plaucējumu, kas raudzēts 24, 36 un 48 h, iespējams nodrošināt vienmērīgu rudzu maizes gatavošanas procesu un gala rezultātu.



19. att. Rudzu maizes pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, izmantojot dažādu ilgumu raudzētu plaucējumu / Fig 19. *pH and TTA (ml 0.1 N NaOH) Values of Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations*

Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Atšķirīgi burti (a–c) virs stabiņiem / punktiem katrā mērījumu kopā norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp vērtībām / *Different letters (a–c) above the bars/points within each measurement set indicate significant differences ($p \leq 0.05$), analyzed separately for each parameter separate for scald and bread.*

Skābuma variācijas raudzētajā plaucējumā un maizē ir saistītas ar pienskābes baktēriju producētajām organiskajām skābēm un veido skābju profilu, kam ir būtiska nozīme maizes sensoro īpašību veidošanā. Skābumu rudzu maizes paraugos ietekmē organisko skābju kvalitatīvais un kvantitatīvais sastāvs. Organisko skābju veidošanos ietekmē mikroorganismu metabolīti, savukārt organisko skābju saturs un sastāvs ietekmē maizes sensorās īpašības.

Maizes paraugos dominējošā organiskā skābe bija pienskābe, un tās saturs palielinājās, palielinoties izmantotā plaucējuma raudzēšanas laikam (7. tabula). Pienkābes saturs pieauga no 0.81 ± 0.06 g 100 g⁻¹ sausnas maizē ar neraudzētu plaucējumu (RM0) līdz 2.06 ± 0.12 g 100 g⁻¹ sausnas RM36, un turpmākas būtiskas ($p \leq 0.05$) izmaiņas RM48 (2.00 ± 0.13 g 100 g⁻¹ sausnas) netika novērotas. Tomēr pienskābes saturs maizē bija zemāks nekā plaucējumā, jo mīklai tika pievienota jauna miltu porcija un tā tika raudzēta īsāku laiku. Etiķskābes, propionskābes un sviestskābes saturs būtiski neatšķīrās starp maizes

paraugiem, kas liecina, ka šo skābju saturs nebija atkarīgs no plaucējuma raudzēšanas ilguma. Taču šo skābju saturs maizē bija ievērojami augstāks nekā plaucējuma paraugos. Šis pieaugums saistīts ar metabolītu veidošanos mīklas raudzēšanas laikā ar Ieraugu M, kur papildus rauga rūgšanas procesiem organiskās skābes, tostarp etiķskābe, veidojas arī citu mīklā esošo mikroorganismu aktivitātes rezultātā.

7. tabula / Table 7

Organisko skābju saturs rudzu maizē, kas gatavota ar dažādu ilgumu raudzētu plaucējumu / Content of Organic Acids in Rye Bread Prepared with Scald Fermented for Different Durations

Organiskās skābes / <i>Organic acids</i>	Organisko skābju saturs (g 100 g ⁻¹ sausnas) rudzu maizes paraugos / <i>Content of organic acids (g 100 g⁻¹ dw) in rye bread samples</i>				
	RM0	RM12	RM 24	RM36	RM48
Pienskābe / <i>Lactic acid</i>	0.81 ± 0.06c	1.54 ± 0.04b	1.91 ± 0.13ab	2.06 ± 0.12a	2.00 ± 0.13ab
Etiķskābe / <i>Acetic acid</i>	0.23 ± 0.03a	0.17 ± 0.03a	0.19 ± 0.01a	0.16 ± 0.02a	0.21 ± 0.03a
Propionskābe / <i>Propionic acid</i>	0.08 ± 0.02a	0.01 ± 0.00a	0.07 ± 0.03a	0.06 ± 0.02a	0.04 ± 0.03a
Sviestskābe / <i>Butyric acid</i>	0.41 ± 0.05a	0.29 ± 0.01a	0.36 ± 0.03a	0.30 ± 0.01a	0.38 ± 0.03a
Dzintarskābe / <i>Succinic acid</i>	0.03 ± 0.01b	0.13 ± 0.01a	0.16 ± 0.00a	0.15 ± 0.00a	0.17 ± 0.03a
Skābenāskābe / <i>Oxalic acid</i>	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.01a	0.03 ± 0.01a	0.03 ± 0.01a	0.03 ± 0.01a
Hīnskābe / <i>Quinic acid</i>	0.84 ± 0.08a	0.77 ± 0.23a	0.82 ± 0.16a	0.86 ± 0.11a	0.84 ± 0.17a
Vīnskābe / <i>Tartaric acid</i>	0.24 ± 0.05a	0.19 ± 0.05a	0.20 ± 0.04a	0.20 ± 0.01a	0.21 ± 0.03a
Ābolskābe / <i>Malic acid</i>	0.27 ± 0.02b	0.30 ± 0.03ab	0.34 ± 0.03ab	0.36 ± 0.02a	0.35 ± 0.01ab
KOPĀ / TOTAL	2.94 ± 0.10b	3.43 ± 0.33ab	4.08 ± 0.31ab	4.17 ± 0.20a	4.23 ± 0.40a

Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Atšķirīgi burti (a–c) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem rindā / a–c indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$) in a row.

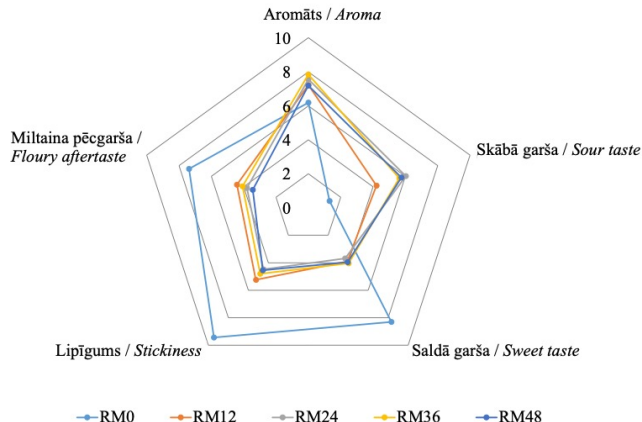
Rezultāti liecina, ka plaucējuma raudzēšanas laiks būtiski ietekmē organisko skābju saturu maizē. Tomēr citas skābes, piemēram, etiķskābe, propionskābe un sviestskābe, lielā mērā paliek nemainīgas, izmantojot plaucējumus ar dažādu raudzēšanas ilgumu. Tas norāda, ka to veidošanās var būt vairāk atkarīga no mīklai pievienotā ierauga un mīklas raudzēšanas procesiem. Organiskās skābes

ir viens no faktoriem, kas nosaka maizes garšas un aromāta īpašības. Pienskābes un etiķskābes saturs maizē būtiski ietekmē tās skābumu un kopējo garšas profilu. Etiķskābe veido asāku, izteiktāku aromātu (Limbad et al., 2020; Pérez-Alvarado et al., 2022; Plessas et al., 2008), savukārt pienskābei raksturīgs maigāks skābums. Pienskābe kā dominējošā skābe tika konstatēta arī (Plessas et al., 2008) pētījumā, kur mīklas raudzēšanai tika izmantotas *L. bulgaricus* un *L. helveticus*.

Maizes paraugos, kas gatavoti no 24 h un ilgāk raudzēta plaucējuma, skābju saturā netika novērotas būtiskas atšķirības, kas norāda uz to, ka 24 h ir pietiekams raudzēšanas laiks, lai iegūtu stabilu skābju saturu un to varētu izmantot rudzu maizes gatavošanai. Rezultāti arī parāda, ka raudzēšanas ilguma palielināšana no 24 līdz 48 stundām būtiski nemaina organisko skābju sastāvu, bet stabilizē to proporcijas. Šī tendence var tikt izmantota ražošanas plānošanā, nodrošinot vienmērīgu produktu kvalitāti un tehnoloģisko procesu prognozējamību, kā arī pielāgojot raudzēšanas ilgumu nepieciešamajam ražošanas apjomam un kapacitātei.

3.3. Rudzu maizes sensorās novērtēšanas rezultāti, maizes gatavošanā izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu

Maizes paraugu (RM0, RM12, RM24, RM36 un RM48) sensorajā vērtēšanā tika analizētas izmaiņas aromāta, skābās garšas, saldās garšas, lipīguma un miltainās pēcgaršas intensitātē (20. att.).



20. att. Vidējais sensorās intensitātes novērtējums rudzu maizes paraugiem, kas gatavoti, izmantojot dažādu ilguma raudzētu plaucējumu / Fig. 20.

Mean Sensory Intensity Scores for Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations

Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Salīdzinot ar maizi, kas tika cepta, izmantojot neraudzētu plaucējumu, raudzēta plaucējuma izmantošana uzlaboja aromātu, samazināja saldumu un lipīgumu, kā arī mazināja miltaino pēcgaršu. Turklāt, ja plaucējums tika raudzēts 24 h vai ilgāk, maizes skābā garša kļuva stabilāka. Maizei ar ilgāk raudzētu plaucējumu (RM12–RM48) aromāta intensitāte bija izteiktāka nekā kontroles paraugam (RM0), un visaugstāko vērtību sasniedza RM36. Skābās garšas intensitāte pieauga līdz ar raudzēšanas laiku, bet pēc 24 h būtiskas atšķirības vairs netika konstatētas, kas liecina par fermentācijas stabilizēšanos. Tas saskan ar organisko skābju rezultātiem, kur dominēja pienskābe.

Salduma intensitāte samazinājās, palielinoties raudzēšanas ilgumam – no augstākās RM0 līdz zemākajai RM48, ko ietekmēja maltozes un saharozes satura samazināšanās. Lipīgums un miltainā pēcgarša bija visizteiktākie RM0 paraugā, bet samazinājās pēc fermentācijas, uzlabojot maizes sensoros rādītājus.

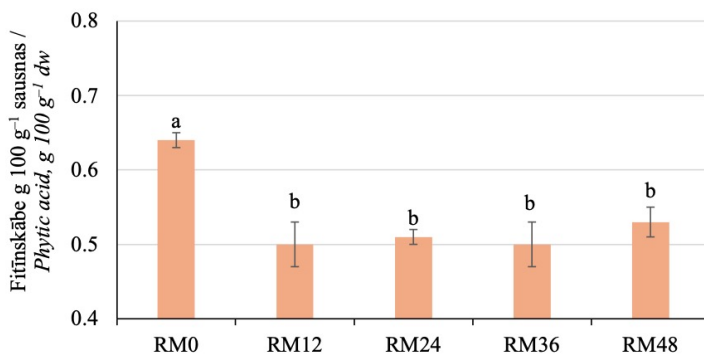
Kopumā 24 h plaucējuma raudzēšana nodrošina līdzsvarotu saldās un skābās garšas intensitāti, kā arī stabilas sensorās īpašības, kas ir nozīmīgi vienmērīgas kvalitātes rudzu maizes ražošanā.

3.4. Fitīnskābes saturs maizes paraugos

Maizes paraugos tika novērota būtiska ($p \leq 0.05$) fitīnskābes satura samazināšanās (21. att.) atkarībā no izmantotā plaucējuma raudzēšanas ilguma. Augstākais fitīnskābes saturs tika konstatēts maizē, kas tika gatavota ar neraudzētu plaucējumu (RM0) – 0.64 ± 0.01 g uz 100 g^{-1} sausnas. Jau pēc 12 h plaucējuma raudzēšanas (RM12) fitīnskābes saturs ievērojami samazinājās līdz 0.50 ± 0.03 g uz 100 g^{-1} sausnas (samazinājums par 22%), un šis līmenis saglabājās arī maizes paraugos ar ilgāk raudzētiem plaucējumiem (RM24–RM48), bez statistiski nozīmīgām izmaiņām. Šie rezultāti norāda, ka raudzēta plaucējuma pievienošana maizei veicināja efektīvāku fitātu noārdīšanos, salīdzinot ar neraudzētu plaucējumu.

Fitīnskābes hidrolīzi galvenokārt nodrošina enzīms fitāze, kas sastopams divos veidos – graudaugu (*plant based*, angļu val.) un mikrobiālās izcelsmes. Lai gan graudaugos sastopamajai fitāzei optimālais pH ir augstāks, mikrobiālā fitāze (no ierauga raugiem) spēj darboties arī zemākā pH (pH 4.5) (Nielsen et al., 2007).

Rezultāti saskan ar citu pētnieku konstatēto, ka dažādu miltu maizē fitīnskābes saturs var svārstīties no 0.15 līdz $0.75 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, norādot uz grauda ārējo daļu ietekmi uz fitīnskābes saturu maizē (García-Esteva et al., 1999). Fitātu noārdīšanās efektivitāti būtiski ietekmē raudzēšanas apstākļi, īpaši pH un temperatūra. Vides paskābināšanās veicina enzīmu aktivitāti, jo pH pietuvojas fitāzes optimālajam darbības diapazonam (~ 5.5). Rezultātā paātrinās fitātu noārdīšanās ierauga matricā (Leenhardt et al., 2005). Rodriguez-Ramiro et al. (2017) pētījumi liecina, ka maizē, kas gatavota ar ieraugu fitāzes aktivitāte konstatēta par 25% augstāka kā maizē, kas gatavota bez ierauga.



21. att. **Fitīnskābes saturs maizē ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu** / Fig. 21. **Phytic Acid Content in Bread with Different Fermentation Times of Scald**

Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Atšķirīgi burti (a, b) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) / Different letters (a, b) indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

Sākotnējā plaucējuma raudzēšanas laikā, izmantojot Ieraugu P, fitīnskābes saturs būtiski nemainījās, savukārt mīklas raudzēšanas laikā, pievienojot Ieraugu M, tika novērota izteikta fitīnskābes samazināšanās, kas norāda uz ierauga M mikrobiotas augstāku enzimatisko aktivitāti un spēju veicināt fitātu hidrolīzi.

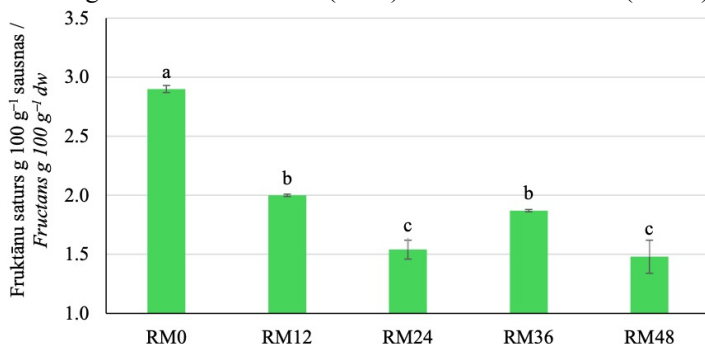
3.5. Fruktānu saturs maizes paraugos

Fruktāni ietekmē rudzu maizes uzturvērtību un potenciālo ietekmi uz gremošanas sistēmu. Pētījumi liecina, ka fruktānu degradāciju raudzēšanas laikā galvenokārt ietekmē vides pH, raudzēšanas ilgums un izmantoto mikroorganismu īpašības, īpaši to spēja izdalīt specifiskus enzīmus. Pienskābes baktērijas, raudzēšanas laikā producējot organiskās skābes, pazemina vides pH, kas var veicināt noteiktu enzīmu – tostarp fruktanāžu – aktivāciju. Šie apstākļi veicina ogļhidrātu, tostarp fruktānu, hidrolīzi. Turklāt dažas pienskābes baktēriju sugas spēj arī tieši noārdīt fruktānus (Borowska et al., 2023), izmantojot enzīmus (fruktanāzes), kas noārda fruktānu ķēdes līdz vienkāršākiem cukuriem, piemēram, fruktozei. Būtiska ietekme ir vides pH, kas rodas raudzēšanas laikā, un tas var uzlabot invertāzes aktivitāti (Menezes et al., 2021). Pētījumi norāda, ka fruktānu satura samazināšanās iespējama arī *Saccharomyces cerevisiae* invertāzes ietekmē (Struyf et al., 2017).

Sākotnējais fruktānu saturs maizē (22. att.), kas tika gatavota no neraudzēta rudzu plaucējuma, bija 2.90 ± 0.03 g 100 g⁻¹ sausas. Tika novērots būtisks

($p \leq 0.05$) fruktānu satura samazinājums, un, izmantojot 12 h raudzētu plaucējumu, tas samazinājās līdz $2.00 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas. Palielinoties plaucējuma raudzēšanas ilgumam, fruktānu saturs maizē turpināja samazināties, sasniedzot $1.54 \pm 0.08 \text{ g uz } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas, izmantojot RP24, $1.87 \pm 0.01 \text{ g uz } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas, izmantojot RP36, un $1.48 \pm 0.14 \text{ g uz } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas, izmantojot RP48. Mīklai pievienotā raudzētā plaucējuma pH varētu būt viens no faktoriem, kas ietekmēja būtisku ($p \leq 0.05$) fruktānu satura samazināšanos maizes paraugā, kuram pievienots 12 h raudzēts plaucējums.

Rezultāti liecina, ka fruktānu samazinājums plaucējumā bija salīdzinoši neliels – vidēji 14% pēc 48 h raudzēšanas, kas varētu būt skaidrojams ar ierobežotu mikrobioloģisko aktivitāti, jo plaucējuma raudzēšanā dominēja pienskābes baktērijas, bet raugam raksturīgās invertāzes aktivitātes klātbūtne bija niecīga vai nenozīmīga. Savukārt maizes paraugos fruktānu saturs ievērojami samazinājās – vidēji par 49%, ko var saistīt ar daudzveidīgāku mikrobiotu mīklā, kuru bagātināja pievienotā ierauga un rudzu miltu mikrobiota, turpmākos tehnoloģiskos procesos. PB un raugu simbioze, īpaši raugam raksturīgā invertāzes aktivitāte, veicināja intensīvāku fruktānu hidrolīzi mīklas raudzēšanas laikā. Visiem maizes paraugiem (RM0–RM48) tika pievienots ieraugs M un izmantots vienāds raudzēšanas laiks, tomēr izmantotais plaucējums atšķīrās pēc raudzēšanas ilguma – no neraudzēta (RM0) līdz 48 h raudzētam (RM48).



22. att. **Fruktānu saturs maizē ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu** / Fig. 22. **Fructan Content in Bread with Different Fermentation Time of Scald**

Rudzu maize gatavota ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu: RM0 – neraudzētu, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h raudzētu plaucējumu / Rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM0 – unfermented, RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Atšķirīgi burti (a–c) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) / Different letters (a–c) indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

Veiktajā pētījumā apstiprinājās, ka rudzu maizes ražošanas tehnoloģiskajiem un ķīmiskajiem raksturlielumiem ir būtiska nozīme fruktānu satura samazināšanā

gatavajā produktā. Fruktānu saturs rudzu maizē var būt mainīgs un ir cieši saistīts ar izmantoto raudzēšanas veidu, ilgumu.

SECINĀJUMI

1. Enzīmu α -amilāzes un β -amilāzes aktivitāte ir būtiski ($p \leq 0.05$) atšķirīga rudzu iesala paraugos ar dažādu diastātisko spēku. Rudzu iesala α -amilāzes un β -amilāzes aktivitātei ir pozitīva korelācija ar iesala diastātisko spēku ($r = 0.87$ un $r = 0.88$, attiecīgi), kas apstiprina diastātiskā spēka piemērotību iesala amilolītiskās aktivitātes raksturošanai maizes ražošanā.
2. Nefermentētā rudzu iesala satura un diastātiskā spēka palielināšana būtiski ($p \leq 0.05$) ietekmēja rudzu miltu enzīmātisko aktivitāti un tehnoloģiskās īpašības pētījumā analizētajās koncentrācijās. Tika noskaidrots, ka DS 261 °WK un lielāks būtiski nepalielināja cietes hidrolīzi, norādot uz enzīmu aktivitātes plato šādā diastātiskā spēkā.
3. Nosakot kopējo cukuru saturu pēc pārcukurošanas posma rudzu plaucējuma paraugos ar dažādu iesala DS un saturu, netika novērota sakarība starp pievienotā –iesala daudzumu vai tā diastātisko spēku un cukuru saturu.
4. Plaucējuma raudzēšanai nepieciešamas vismaz 24 h, lai sasniegtu mikrobioloģisko rādītāju maksimumu un pH. Plaucējuma raudzēšana līdz 48 h uzrādīja stabilus mikrobioloģiskos un fizikāli-ķīmiskos rādītājus, kas ļauj to izmantot kvalitatīvas maizes ražošanā.
5. Rudzu plaucējuma raudzēšanas laikā pienskābes saturs saglabājās stabils līdz 48 h, kas norāda uz plaucējuma kvalitātes stabilitāti ilgstošā raudzēšanā.
6. Rudzu maizei gatavotai ar 24 h raudzētu plaucējumu ir novērota fitīnskābes samazināšanās par 20%, kas var uzlabot maizes sagremojamību un maizes uzturvielu biopieejamību. Ilgstoša plaucējuma raudzēšana (24–48 h) nesamazināja fitīnskābes saturu maizē.
7. Rudzu maizei gatavotai ar 24 h raudzētu plaucējumu novērota fruktānu satura samazināšanās par 49%, kas var mazināt kuņģa-zarnu trakta diskomforta risku jutīgiem patērētājiem. Ilgstoša plaucējuma raudzēšana (24–48 h) nesamazināja fruktānu saturu maizē.
8. 24 h plaucējuma raudzēšana uzlabo rudzu maizes sensorās īpašības. Pētījumā novērots, ka ilgstošas raudzēšanas (24–48 h) periodā iegūtais plaucējums nodrošina stabilas kvalitātes rudzu maizi.
9. Iegūtie rezultāti apstiprina hipotēzi, ka tehnoloģiski stabilu ar plaucējumu gatavotas rudzu maizes ražošanas procesu nodrošina noteikta diastātiskā spēka nefermentētā rudzu iesala pievienošana un ilgstoša plaucējuma raudzēšana.

REKOMENDĀCIJAS

1. Diastātiskais spēks korelē ar amilāžu aktivitāti iesalā un raksturo iesala spēju hidrolizēt cieti, apstiprinot, ka ir praktiski pielietojams parametrs iesala partiju novērtēšanai ražošanas vajadzībām.
2. Pievienojamo iesala daudzumu iespējams precizēt, ievērtējot miltu krišanas skaitli un iesala partijas diastātisko spēku.
3. Zemākas aktivitātes iesals pievienots lielākā daudzumā var nodrošināt līdzvērtīgu efektu kā aktīvāks iesals mazākā daudzumā. Šāda pieeja var stabilizēt ar plaucējumu gatavotas rudzu maizes ražošanas procesu, neatkarīgi no piegādātā iesala mainīgā diastātiskā spēka.
4. Plaucējuma raudzēšanai ieteicamas vismaz 24 h, lai sasniegtu stabilus mikrobioloģiskos un fizikāli-ķīmiskos rādītājus, un nodrošinātu gatavojamai rudzu maizei raksturīgās sensorās īpašības.
5. Raudzējot plaucējumu līdz 48 h, būtiskas ķīmiskās un mikrobioloģiskās izmaiņas plaucējumā nenotiek, nodrošinot līdzvērtīgu tā kvalitāti maizes ražošanai.

TOPICALITY OF THE RESEARCH

Rye bread made with scald is a traditional product, where process stability and quality predictability are of key importance. To ensure this, an in-depth understanding of the interactions between scald preparation, fermentation, and raw material properties – particularly whole grain rye flour and unfermented malt – is essential. The enzymatic activity of malt can vary significantly in production, making it difficult to control sugar formation and viscosity. This study evaluates the potential of using diastatic power as a practical indicator to adjust the amount of added malt and stabilize the biochemical processes in the scald.

Another important factor is the duration of scald fermentation. In practice, fermentation time can vary considerably, but there is a lack of data on the impact of prolonged fermentation (24–48 h) on sugar composition, organic acids, microbiota development, and bread quality. The study analyzes these changes with the aim of improving the sensory properties and nutritional value of rye bread. The combination of both research directions enables the development of a practically applicable approach for stable and high-quality rye bread production.

The hypothesis of the doctoral thesis: a technologically stable and predictable production process for rye bread prepared with scald can be achieved by the precise addition of unfermented rye malt, considering its diastatic power, and by prolonged scald fermentation.

Theses.

1. The addition of unfermented rye malt affects the technological properties of rye flour depending on its content and diastatic power, promoting sugar formation in the scald.
2. During prolonged scald fermentation, a reduction in sugar content and changes in the composition and concentration of acids produced by lactic acid bacteria occur.
3. Prolonged fermentation reduces the content of fructans and phytic acid in the fermented scald.
4. Extended scald fermentation improves the sensory properties of rye bread and reduces the content of fructans and phytic acid.

Aim of the doctoral thesis: to evaluate the effect of the diastatic power of unfermented rye malt and the scald fermentation time on the microbiological and chemical parameters of the scald, the technological properties of the flour, and the sensory and chemical characteristics of rye bread.

Research tasks.

1. To analyze the activity of the enzymes α -amylase and β -amylase in unfermented rye malt samples with different diastatic power.
2. To evaluate the effect of the content and activity (diastatic power) of unfermented rye malt on the enzymatic activity and technological properties of rye flour.

3. To develop a mathematical model for stabilizing the falling number of rye flour–malt mixtures.
4. To analyze changes in the sugar content of rye scald after saccharification and after 24 hours of fermentation.
5. To evaluate the dynamics of microbiota changes and acidity development in rye flour scald during prolonged fermentation.
6. To analyze changes in the chemical composition of rye flour scald during prolonged fermentation.
7. To analyze the chemical composition and sensory properties of rye bread prepared with differently processed scalds.

The study was conducted with the support of the Latvia University of Life Sciences and Technologies (LLU) program “Strengthening Scientific Capacity at LLU” within the project Z52 “Development of a Mathematical Model for Predicting Rye Flour Quality Using Unfermented Rye Malt” and the LLU program “Implementation of Fundamental Research at LLU” within the scientific project G10 “Investigation of Exopolysaccharide Formation Dynamics During the Long-Time Fermentation of Rye Scald”.

Research Period and Location.

The study was conducted from September 2020 to March 2025 at the laboratories of the Institute of Food at the Latvia University of Life Sciences and Technologies, in the Smart Technologies Department of the Scientific Laboratory of Biotechnology, at the Center of Food and Fermentation Technologies (TFTAK) in Estonia, and at the laboratories of Chopin Technologies in France. Sample preparation and bread baking were carried out at the “Ķelmēni” bakery (Rankas parish, Gulbene region, Latvia).

Materials description.

- Three different rye grain samples (variety ‘Kaupo’), harvested in 2021 from the farm “Ķelmēni” in Gulbene, Latvia. The grains were milled in 2022 at the farm “Kaņepītes” in Kocēni, Latvia.
- Five different unfermented rye malts with varying diastatic power (DP), provided by SIA “LATMALT”, “Valmju maltings”, Jaunsvirlauka parish, Jelgava region, Latvia.
- Sourdough starters (designated as Starter P and Starter M) obtained from the “Ķelmēni” bakery, used for scald and dough fermentation.

Research structure.

The study was conducted in three stages (Table 1).

In Stage I, the enzymatic activity of unfermented rye malt was analyzed, and the effect of its quantitative and qualitative composition on the technological properties of rye flour was evaluated.

Stage II focused on the saccharification of the rye scald and the impact of prolonged fermentation (24–48 h) on microbiota dynamics and metabolite profiles.

In Stage III, the quality of rye bread produced using scalds fermented for different durations was assessed.

Research methods.

In Stage I of the study, rye flour and malt samples were prepared (Figure 1). Each rye flour sample (M1, M2, M3) was mixed with each of the five unfermented rye malt samples (I1, I2, I3, I4, I5). Malt was added at three different concentrations – 0.5%, 1.0%, and 1.5% of the flour weight.

Scald preparation and fermentation in Stage I were carried out according to a bread production technology adapted for laboratory conditions. To prepare the scald, flour and malt were mixed with hot water (2.8 kg , $92 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) using a dough kneading machine (Teddy, A/S Varimixer, Brøndby, Denmark) for 10 minutes at speed 2 (150 rpm).

During saccharification, the scald was held in a thermostat (climatic chamber) Memmert ICH 110 (Memmert GmbH, Schwabach, Germany) for 90 minutes at $60 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 80% relative humidity, allowing the scald to cool slowly from $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. After saccharification, Starter P (6% of the flour weight) was added to the scald. Fermentation was carried out in the thermostat at 60% relative humidity with gradual temperature reduction using the following regime: $55 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 5 hours, $50 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 5 hours, $45 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 5 hours, and $35 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 5 hours. Finally, the fermented scald was cooled at room temperature ($22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) until it reached $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (approximately 2 hours).

In Stage II of the study, the preparation and fermentation of rye scald and dough were carried out at the production facilities of the “*Çelmēni*” bakery. Five scalds with different fermentation durations were prepared and used: 0 h (unfermented), 12 h, 24 h, 36 h, and 48 h. A detailed technological scheme for scald and dough preparation is shown in Figure 2.

Scald and bread samples were freeze-dried using a lyophilizer FT33 (Armfield Ltd., Hampshire, United Kingdom) at a condenser chamber temperature of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a pressure of 6.4 Pa for 72 hours. After lyophilization, the samples were ground using a Foss Knifetec 295 Mill laboratory grinder (Foss Analytical Co., Ltd., Suzhou, China).

The analytical methods and standards used in the study are summarized in Table 2.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of Unfermented Rye Malt on the Properties of Rye Flour and Scald

1.1. Characterization of the Activity of Unfermented Rye Malt

The α -amylase and β -amylase activities were analyzed for five unfermented rye malts with varying activity levels, with diastatic power (DP) ranging from 170 to 408 °WK. The α -amylase activity differed significantly ($p \leq 0.05$) between samples, ranging from 44.26 to 183.34 CU g⁻¹. In turn, β -amylase activity varied from 10.81 to 23.11 BU g⁻¹ across the different malt samples (Figure 3).

A strong overall correlation was observed between α -amylase activity and diastatic power ($r = 0.87$); however, no statistically significant differences in α -amylase activity were found between malt samples I3 and I4. Similarly, β -amylase activity showed a significant correlation with diastatic power ($r = 0.88$; $p \leq 0.05$), though no significant differences were observed between samples I2 and I3. The strong correlations confirm diastatic power as a representative indicator of the combined enzymatic activity unfermented rye malt. At the same time, the significant differences between samples indicate that unfermented rye malt can vary in its α -amylase and β -amylase activity, which is reflected by the diastatic power. This parameter may therefore play an important role in stabilizing the rheological properties of rye flour during scald preparation.

1.2. Effect of Unfermented Rye Malt on the Technological Properties of Rye Flour

In this study, rye flour samples with a wide range of falling number (FN) values (346–210 s) were analyzed after the addition of unfermented rye malt with varying diastatic power (DP 170–408 °WK) at different concentrations (0.5%, 1.0%, and 1.5%). The rheological properties – such as water absorption, starch gelatinization temperature, viscosity, and amylolytic activity – were evaluated by analyzing the falling number, amylograph peak viscosity, and Mixolab curves for the flour-malt combinations, to assess flour behaviour during scald and dough preparation.

Falling Number

The technological properties of rye flour in breadmaking are closely related to its falling number (FN), which serves as an indicator of enzymatic activity and starch hydrolysis. A lower FN (<200 s) suggests high enzymatic activity and intense starch breakdown. An optimal FN range (125–200 s) ensures balanced enzyme activity, supporting process stability during scald and fermentation stages (Stępniewska et al., 2021).

Changes in the falling number depending on the addition of unfermented rye malt with different diastatic power and concentrations are shown in Figure 4. The addition of malt consistently reduced the FN of rye flour, with a more pronounced decrease observed as malt DP and dosage increased. This trend indicates a strong relationship with increased enzymatic activity that accelerates starch hydrolysis. The higher the diastatic power and the amount of added malt, the more intensive the amylolytic activity, resulting in reduced starch content capable of maintaining viscosity – and consequently, a lower FN value.

The average FN values differed significantly ($p \leq 0.05$) between the rye flour samples. Sample M1 had the highest initial FN – 346 ± 4 s, followed by M2 with 262 ± 4 s, while M3 had the lowest value – 210 ± 4 s. The addition of malt (from 0.5% to 1.5%) resulted in a significant ($p \leq 0.05$) decrease in FN for all flour samples, with the effect becoming more pronounced as the malt content increased. For example, in sample M1, the FN dropped from 346 ± 4 s to 114 ± 5 s when malt content increased from 0% to 1.5%, indicating a direct relationship between malt dosage and FN reduction. Similar trends were observed in M2 and M3, where FN decreased to 108 ± 4 s and 111 ± 3 s, respectively, with 1.5% malt.

In all cases, a decrease in FN was observed with increasing malt diastatic power (DP) and content, indicating intensified starch hydrolysis driven by elevated amylolytic enzyme activity (Struyf et al., 2016).

Malt DP and content significantly ($p \leq 0.05$) affected the FN of rye flour, as shown in Figure 5. However, once a certain DP level was reached, this effect stabilized, suggesting a possible threshold for enzymatic activity. In sample M1, the addition of malts I3 and I4 resulted in similar FN values with no significant differences ($p > 0.05$), despite differences in their DP. This indicates that increasing DP beyond a certain level does not further enhance enzymatic effectiveness. A similar trend was observed in sample M2, where I3 and I4 had comparable effects on FN. In M3, this threshold was even more apparent, as the effects of I3, I4, and I5 on FN were equivalent and showed no statistically significant differences.

Increasing diastatic power (DP) beyond 261°WK did not result in further FN reduction, confirming a threshold effect in enzymatic activity. These findings highlight the possibility of optimizing not only the amount of added malt but also its diastatic characteristics to achieve maximum enzymatic efficiency without the risk of oversaturation – while avoiding excessive malt usage and unnecessary cost increases. Therefore, carefully balancing malt DP and dosage in scald preparation is essential for improving process efficiency.

The results showed that both malt quantity and DP are important. Rye flour samples supplemented with malt of lower diastatic power – e.g., DP 170°WK (0.5% and 1.0%) or DP 179°WK (0.5%) – may not provide sufficient enzymatic activity to reach the optimal falling number (FN). However, increasing the dosage of low-DP malt to 1.5% (e.g., M2 with DP 170 or DP 179) achieved an

enzymatic effect comparable to that obtained with 0.5% of higher-DP malt (e.g., M2 with DP 362 or DP 408). This suggests that a higher malt content can compensate for lower diastatic power, resulting in a similar FN reduction.

Mathematical Model for Stabilizing the Falling Number in Rye Flour.

To expand the practical application of the study and enable prediction of FN values, a mathematical model was developed to reflect projected FN changes depending on the added malt's diastatic power (DP) and dosage. The model incorporates rye malt with DP ranging from 170 to 408 °WK. Calculations were performed for three rye flour samples (M1, M2, M3) with different initial FN values – 346, 262, and 210 seconds, respectively.

The study confirmed, and the model supported, that a higher dosage (e.g., 1.5%) unfermented rye malt with lower diastatic power can produce an enzymatic activity effect and FN reduction comparable to a lower dosage (e.g., 0.5%) of malt with higher DP. This finding is significant for optimizing rye scald technology, as it allows flexible adjustment of malt type and dosage based on available raw materials, while ensuring a stable fermentation environment and controlled enzymatic activity. The results also highlight that excessive use of high-DP malt can lead to unwanted oversaturation, potentially affecting dough properties. Therefore, a balanced selection of both malt DP and dosage is crucial.

Maximum Viscosity

Maximum viscosity (MV) is an important parameter, as it is closely related to the degree of starch breakdown and enzymatic activity, particularly the action of α - and β -amylases. A higher MV (>600 BU) indicates greater starch swelling capacity and lower hydrolysis, while a lower MV (<400 BU) suggests more intensive starch hydrolysis, promoted by increased enzymatic activity (Verwimp et al., 2006), such as in the case of unfermented malt addition. As malt content increases, viscosity significantly decreases in all rye flour-malt samples (Figure 6), indicating a strong relationship between the amount of added malt and the reduction in maximum viscosity.

Correlation and Modeling of Maximum Viscosity

The correlation coefficients between malt content and maximum viscosity (MV) in flour samples were as follows: M1 ($r = -0.74$), M2 ($r = -0.67$), and M3 ($r = -0.78$). The reduction in MV in the flour-malt samples reflects the role of amylolytic enzymes, particularly α - and β -amylases, in the hydrolysis of polysaccharides – mainly starch – during gelatinization (Autio et al., 1996; Peng & Jin, 2020). Enzymatic hydrolysis breaks starch into shorter-chain fragments (dextrins, maltose), which have reduced swelling and water-binding capacity, resulting in decreased overall viscosity (Hrušková et al., 2003).

To analyze the effect of diastatic power (DP) on the MV of flour-malt samples, a statistical model was developed (Table 2). Although MV significantly decreased with increasing malt DP, the effect plateaued beyond a certain threshold, indicating that further increases in DP did not lead to additional viscosity reduction.

The interaction between malt DP and dosage confirmed that high-DP malt (≥ 362 °WK) is not always necessary to achieve the desired viscosity in rye scald. For instance, a higher dosage of low-DP malt (1.5%, I1) reduced MV to a level comparable to that achieved using a lower dosage (0.5%) of high-DP malt (I5). This result highlights the compensatory relationship between DP and malt content, emphasizing the importance of malt selection for optimizing enzymatic activity, achieving target viscosity, ensuring process stability, and reducing production costs.

In scald preparation technology, high viscosity complicates processing, slows fermentation, and affects bread quality (Stępniewska et al., 2018). Reducing viscosity through enzymatic action – by adding malt – improves dough flow properties, accelerates fermentation, and facilitates handling during production. Research shows that reducing the viscosity of gelatinized starch is an important factor for improving the efficiency of the production process (Xie et al., 2024).

It should be noted that the commonly cited optimal maximum viscosity values for rye flour (400–600 BU) (Verwimp et al., 2006) primarily refer to suitability for dough kneading and not for scald preparation. In rye scald, which serves as a substrate for fermentation, a different – typically lower – viscosity is needed to provide optimal conditions for microbial activity. A more fluid scald consistency improves enzyme access to polysaccharides and promotes starch hydrolysis, resulting in the formation of simple sugars essential for the metabolism of lactic acid bacteria involved in fermentation. Moreover, lower viscosity facilitates processing and enhances fermentation dynamics, making the scald structure more favorable for microbial activity.

Therefore, although maximum viscosity in some samples was lower than traditional quality benchmarks, this should not be viewed negatively, but rather as a technologically justified characteristic in the context of scald preparation.

Analysis of Flour Rheological Properties (Mixolab).

The C3 point represents the peak of starch gelatinization. In all rye flour samples, the addition of malt reduced the C3 value. For example, in the M1 control sample, the C3 value was 2.45 Nm, whereas with the addition of 1.5% I5 malt, it decreased to 1.72 Nm. Similar trends were observed in M2 and M3 flour samples. This reduction can be explained by partial starch degradation caused by enzymatic activity before full gelatinization occurs, resulting in a lower peak viscosity. As malt content increased, the C3 value consistently decreased – for instance, in M1 flour with I5 malt, C3 dropped from 1.99 Nm (0.5%) to 1.72 Nm (1.5%).

The intensity of gelatinization is characterized by the C3-C2 coefficient, which decreased with the addition of malt (Figure 8). The greatest reduction was observed with I1 and I2 (1.53 and 1.40 Nm), while malts with higher diastatic power (I3–I5) showed similar, stabilized values (1.22–1.29 Nm), indicating a saturation point in enzymatic activity. The high determination coefficients

($R^2 = 0.93\text{--}0.98$) confirm the predictability of enzyme influence on viscosity, which is essential for process control.

At approximately 90 °C, dough viscosity decreases (C4 point), reflecting intense enzymatic activity. The addition of malt significantly reduced the C4 value in all M1 samples, particularly with higher-DP malts (I3–I5), whose values stabilized between 0.54 and 0.59 Nm – again indicating a saturation effect. The viscosity difference between C3 and C4 (C3–C4) represents the intensity of starch degradation. This difference increased with malt addition, peaking with I3 (1.331 Nm), while I4 and I5 showed similar values, confirming a comparable enzymatic effect.

Increasing the malt content from 0.5% to 1.5% generally enhanced enzymatic activity; however, at high diastatic power (DP), the effect was no longer linear, indicating a potential substrate limitation. Therefore, the malt dosage should be adjusted according to the specific properties of the flour.

Based on the obtained results, one rye flour sample and three rye malt samples were selected for the next stage of the study, which analyzes sugar formation in the scald after the saccharification phase and after 24 hours of fermentation. Each malt was added at three different concentrations (0.5%, 1.0%, and 1.5%).

1.3. Effect of Rye Malt Content and Activity on the Sugar Composition after Flour Starch Hydrolysis (Saccharification) and after 24 Hours of Fermentation

To evaluate the effect of saccharification and fermentation (24 h) on sugar changes in the scald, scald samples RP1, RP2, and RP3 were prepared with malt concentrations of 0.5%, 1.0%, and 1.5%, respectively. For the preparation of RP1, a mixture of M2 rye flour (FN – 262 s) and malt I1 (170 °WK) was used; RP2 consisted of M2 flour and malt I3 (261 °WK); RP3 – of M2 flour and malt I5 (408 °WK). The control sample consisted of rye flour M2 scald without added malt.

Total sugars

The total sugar content after saccharification (Fig. 9.A) increased significantly ($p \leq 0.05$) in the scald samples compared to the control without malt (RP0 13.90 ± 0.06 g 100 g⁻¹ dry weight). However, the increase in sugar content was not observed in all cases and was not clearly dependent on the proportion of added malt.

Sucrose

In the rye scald samples after the saccharification phase, the sucrose content ranged from 0.43 to 0.58 g 100 g⁻¹ dry weight (Fig. 10). The highest sucrose content was observed in the control sample (RP0 0.58 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight), which did not contain any added malt. In contrast, the lowest levels were found in RP2 with 1.5% malt (0.43 ± 0.02 g 100 g⁻¹, dry weight) and RP3 with

1.0% malt (0.43 ± 0.02 g 100 g⁻¹, dry weight). This reduction in sucrose may be explained by more intense invertase activity from malt-derived enzymes or microorganisms, which promoted the hydrolysis of sucrose into glucose and fructose during saccharification. Since sucrose is a disaccharide rapidly broken down by invertase, its lower level likely reflects active enzymatic degradation rather than reduced formation.

No clear relationship was observed between the amount of added malt or its diastatic power and the sucrose content in the saccharified scald samples, indicating that sucrose levels at this stage are relatively stable and not significantly affected by the malt's DP or concentration.

After fermentation, sucrose was not detected in any sample, suggesting that lactic acid bacteria preferentially utilized sucrose during fermentation. Additionally, sucrose may have broken down into glucose and fructose, which in turn could lead to changes in the levels of these sugars after 24 h of fermentation.

Maltose

The saccharification results (Fig. 11.A) show that the maltose content in the scald samples was significantly higher ($p \leq 0.05$) compared to the control sample without malt (RP0 11.77 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight), ranging from 13.32 to 18.18 g 100 g⁻¹ dry weight. The highest maltose content was observed in sample RP3 with 1.5% malt (18.18 ± 1.39 g 100 g⁻¹ dry weight), indicating active amylase activity provided by the added malt. The increase in maltose reflects starch hydrolysis by α - and β -amylase during the saccharification process, which was enhanced by the controlled temperature (55–65 °C), the optimal range for these enzymes.

After 24 h of fermentation (Fig. 11.B), the maltose content remained relatively high in all samples and even increased in several cases compared to the saccharification phase, particularly in samples RP2 and RP3. This increase is most likely due to continued starch degradation during fermentation, with residual amylase activity from the malt, especially β -amylase, which is relatively stable in acidic environments (optimal pH 4.5–5.5). It continues to cleave maltose units from the non-reducing ends of starch chains even under lowered pH conditions. Additionally, lactic acid bacteria may not utilize maltose as readily as glucose during this stage, contributing to its accumulation.

At the same time, in sample RP1 with 1.5% malt, the maltose content remained relatively low (15.51 ± 0.25 g 100 g⁻¹ dw), further indicating possible differences in enzymatic activity between malt samples and the complex interplay of concurrent processes – sugar formation, consumption, and transformation.

The amount of maltose did not decrease after 24 h of fermentation; in some samples, an increase was even observed. Moreover, neither the diastatic power (DP) nor the concentration of malt showed a clear effect on maltose content after saccharification or fermentation.

Glucose

The saccharified scald samples with added malt showed higher glucose content compared to the control; however, significant differences were observed only in some samples. The highest increase in glucose – by 52% compared to the control—was recorded in the sample with 1.5% malt I3 (RP2) (Fig. 12.A). This glucose increase is associated with the gradual hydrolysis of starch promoted by amylase enzyme activity, resulting in the formation of dextrins, glucose, and maltose (Akamine et al., 2023). Amylases, particularly α -amylase, cleave the α -1,4-glycosidic bonds in starch, breaking it down into shorter polysaccharide chains and simple sugars, including glucose (Muralikrishna & Nirmala, 2005).

After 24 h of fermentation, glucose content increased in all samples (Fig. 12.B), although no clear effect of diastatic power (DP) or added malt concentration was observed during this phase. These results are in line with the study by Klupšaitė et al. (2023), which reported a 13.2% increase in glucose content in rye scald after 24 h of fermentation, indicating that fermentation can enhance glucose formation. This increase can be explained by the retained activity of β -amylase and glucoamylase in the acidic environment, which continue to break down dextrins and oligosaccharides.

Fructose

During the saccharification phase, when starch is intensively hydrolyzed under the action of amylases (particularly α - and β -amylases), the main products are maltose, dextrins, and glucose. Fructose formation at this stage is minimal, as starch itself does not contain fructose units. However, fructose can be formed indirectly. If sucrose is present in rye flour or malt, it can be cleaved by invertase – an enzyme that splits sucrose into glucose and fructose. This process most often occurs during fermentation, when yeasts and lactic acid bacteria become active (Gänzle, 2014).

After saccharification, fructose content in the samples ranged from 0.38 ± 0.02 g 100 g⁻¹ (RP3, 1.5%) to 0.50 ± 0.0 g 100 g⁻¹ (RP2, 1.5%), while the control sample showed 0.40 ± 0.01 g 100 g⁻¹ (Fig. 3.11.A).

However, no clear effect of malt activity (diastatic power, DP) or concentration on fructose content in the saccharified scald was observed.

After 24 hours of fermentation, a significant decrease ($p \leq 0.05$) in fructose content was observed in all samples (Fig. 13.B) compared to those after the saccharification phase. This reduction is associated with the ability of lactic acid bacteria (LAB) to utilize fructose as a substrate in their metabolic processes. As a result of fructose metabolism by LAB, lactic acid is produced, which significantly contributes to the increase in total titratable acidity of the dough.

The total sugar content in rye scald differed significantly ($p \leq 0.05$) between the control sample (without added malt) and those with varying levels of malt addition. Scalding and malt application proved to be effective methods for generating fermentable sugars and providing a nutrient-rich environment for sourdough starters without the need for additional sugar supplementation. Higher

sugar levels after saccharification indicate intensive starch breakdown, creating favorable conditions for microbial development.

After 24 h of fermentation, sucrose was no longer detected, indicating its complete hydrolysis into simple sugars – glucose and fructose – which are the primary energy sources for LAB. Although fructose levels decreased, it remained present in substantial amounts, continuing to support microbial metabolism. Interestingly, both maltose and glucose contents increased slightly after 24 h of fermentation, possibly due to ongoing starch hydrolysis or residual enzymatic activity in the scald. This availability of sugars suggests that essential nutrients for fermentation remain accessible, and further microbial activity may continue to transform and utilize these sugars, potentially affecting the flavor, acidity, and structure of the bread.

For the continuation of the study, the optimal rye flour–malt combination was selected: rye flour M2 (FN – 262 s) and 1% malt I3 (DP – 261 °WK). The addition of malt significantly influenced sugar formation during saccharification; however, neither the malt's diastatic activity nor its concentration had a decisive effect on the sugar levels in the saccharified scald. The selected malt showed medium enzymatic activity, which was sufficiently intense to hydrolyze starch effectively. This level of activity aligns with practical and recommended levels for scald preparation—providing adequate, but not excessive, diastatic activity that could otherwise negatively affect dough stability and bread structure.

This sample showed a falling number of 139 ± 3 s and a maximum viscosity of 308 ± 5 BU, indicating relatively low viscosity and good dispersion of the liquid phase in the scald, which can favor the subsequent fermentation process – especially when using wholegrain or coarsely ground rye flour. The sample that exhibited the highest total sugar content after saccharification (17.92 ± 0.78 g 100 g⁻¹ dry weight) has the potential to provide an optimal nutrient environment for fermentation. It was selected as the most suitable due to its balanced starch hydrolysis, strong fermentation potential, and ability to support desirable rye bread quality in accordance with criteria described in the literature.

Overall, the addition of unfermented rye malt promoted an increase in sugar content in the scald, confirming the role of malt in enhancing the technological properties of rye flour and sugar formation. However, no consistent correlation was observed between the malt's diastatic power or added quantity and the intensity of sugar formation.

2. Microbial and Chemical Composition Changes After Scald Saccharification and Prolonged Fermentation

The growth of microorganisms during fermentation is closely related to the composition of the nutrient medium and fermentation conditions, primarily temperature and time.

During lactic acid bacteria (LAB) fermentation, lactic acid is mainly produced, which lowers the pH and affects not only dough properties and bread structure but also the dynamics of fermentation itself.

In the second phase of the study, rye flour sample M2 and malt I3 (1%) were used for scald preparation. To analyze the effect of prolonged fermentation, samples were prepared as follows: unfermented scald (RP0), and scalds fermented for 12, 24, 36, and 48 hours (RP12, RP24, RP36, RP48).

2.1. Microbial Characterization of Fermented Scald

Microbial identification results showed that *Lactobacillus delbrueckii* dominated in both Starter P and the fermented scald (24 h), and it remained dominant even after 48 h of fermentation (Fig. 14.A).

The similarity between the microbiota of Starter P and the 24 h fermented scald can be explained by the fact that Starter P was derived from the 24 h fermented scald. Similarly, in Starter M, *Lactobacillus delbrueckii* was among the most prevalent lactic acid bacteria, but *Lactobacillus amylolyticus*, *Limosilactobacillus reuteri*, and *Lactobacillus helveticus* were also identified.

Among the most frequently detected yeasts in both Starter P and the fermented scald were *Candida sake* and *Candida krusei*, while *Saccharomyces* spp. were also observed (Fig. 14.B). In contrast, *Saccharomyces* spp. dominated in Starter M, with lower occurrence of filamentous fungi such as *Alternaria* spp. and *Mycosphaerella tassiana* also being detected.

Analysis of microbial growth during scald fermentation revealed a significant increase ($p \leq 0.05$) in the number of lactic acid bacteria (LAB) (Fig. 15).

LAB counts increased markedly during the first 12 hours of fermentation, rising from 5.1 to 6.7 $\log_{10}$ CFU g^{-1} . From 24 to 48 hours, no significant changes were observed, with the maximum value of 8.4 $\log_{10}$ CFU g^{-1} reached after 24 hours. These results indicate that LAB dominate the microbial population in fermented scald and play a key role in the fermentation process.

Yeast counts in the fermented scald increased to 2.9 $\log_{10}$ CFU g^{-1} after 48 hours of fermentation. However, this level was insufficient to ensure proper dough leavening, indicating the need for an additional yeast source, which is provided by Starter M. In Starter P, yeast counts did not exceed 2.6 $\log_{10}$ CFU g^{-1} , while in Starter M, they reached 8.5 $\log_{10}$ CFU g^{-1} , confirming its adequate leavening capacity.

The growth dynamics of LAB suggest that *Lactobacillus delbrueckii* is capable of thriving in environments with elevated temperatures (40–55 °C). This species is commonly used in the fermentation of dairy products and can utilize glucose, fructose, mannose, and sucrose as substrates (Rizzello & De Angelis, 2022). During the saccharification phase, sugars such as fructose, glucose, and maltose are formed in the scald, providing a nutrient-rich environment for LAB growth (Klupšaitė et al., 2023). It can be concluded that the presence of these

sugars in the scald positively supports the proliferation of *Lactobacillus delbrueckii*.

During the 48-hour fermentation period, the pH value decreased from 6.40 ± 0.04 to 3.59 ± 0.02 , with the most pronounced drop observed within the first 12 hours (Fig. 16).

After 24 hours of fermentation, both pH and total titratable acidity (TTA) remained stable, and no significant differences were detected between the samples – pH stabilized at around 3.5, while TTA reached 15.6 ml NaOH.

A pH range of 3.5 to 4.3 is considered indicative of a well-developed sourdough. Optimal temperature and sufficient sugar availability promoted rapid LAB proliferation, as evidenced by the significant pH drop and increase in TTA during fermentation. In contrast to the present findings, Klupšaitė et al. (2023) reported a pH of 4.57 after 24 h of sourdough fermentation using *Lactiplantibacillus paracasei*, highlighting the efficient lactic acid production capacity of *Lactobacillus delbrueckii*.

2.2. Changes in Sugar Content During Scald Fermentation

Changes in sugar content during fermentation reflect the activity of microorganisms and the dynamics of nutrient medium transformation (Table 4).

The total sugar content in the unfermented scald after the saccharification phase was 30.78 ± 0.09 g 100 g⁻¹ dry weight (0 h). After 12 hours of fermentation, an increase in total sugar content was observed, reaching 33.25 ± 0.63 g 100 g⁻¹ dry weight, corresponding to a 4.8% rise from the initial value. However, during longer fermentation (24 h, 36 h, 48 h), no significant changes in total sugar content were observed, indicating that a balance had been reached in the fermentation process – similar to the stabilization seen in pH and titratable acidity values – and likely related to the stabilization of enzymatic reactions and microbial metabolism.

After saccharification, the fructose content was 0.40 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight. However, after 12 hours of fermentation, fructose was no longer detected. This can be explained by the fact that *Lactobacillus delbrueckii*, which was identified in the scald, utilizes fructose during the initial stages of fermentation, resulting in its complete depletion (Loponen & Gänzle, 2018).

Glucose content in the unfermented scald decreased from 0.99 ± 0.05 g 100 g⁻¹ dry weight (0 h) to 0.72 ± 0.08 g 100 g⁻¹ dry weight after 12 hours but then increased during the course of fermentation, reaching a maximum of 1.08 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight after 48 hours (Table 4). The initial drop in glucose may be attributed to its utilization by microorganisms for metabolic processes, while the later increase is likely due to ongoing starch hydrolysis during fermentation.

The highest sucrose content was recorded immediately after the saccharification phase (1.01 ± 0.09 g 100 g⁻¹ dry weight), but it significantly

decreased during fermentation, reaching 0.25 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight after 48 hours (Table 4). This decline indicates the breakdown of sucrose, facilitated by microbial activity that converts sucrose into simple sugars during fermentation.

In contrast, maltose content remained stable during fermentation, with a slight increase from 25.33 ± 0.62 g 100 g⁻¹ dry weight at the beginning (0 h) to 27.56 ± 0.12 g 100 g⁻¹ dry weight after 12 hours (Table 4).

Overall, changes in sugar content during prolonged fermentation were minor, with some fluctuations observed.

A considerable amount of residual sugars remained after fermentation, which is consistent with the previous part of the study – only a slight reduction in sugar content was observed after the saccharification phase and 24 hours of fermentation.

Ravyts et al. (2011) reported a similar trend: after 24 hours of rye sourdough fermentation, sucrose was no longer detected, while high levels of glucose, fructose, and maltose were observed. The decrease in sucrose content indicates that it serves as a key substrate for lactic acid bacteria metabolism, the efficiency of which depends on the bacterial strain, substrate availability, temperature, acidity, and fermentation duration (Bartkiene et al., 2020).

The high residual levels of maltose and glucose may be related to the complex structure of the substrate and the fact that polysaccharides (e.g., starch) present in wholegrain rye flour are enzymatically hydrolyzed gradually. The intensity of this process depends on enzyme activity, which is influenced by substrate availability, pH, temperature, and the ability of lactic acid bacteria to synthesize amylolytic enzymes (Klupsaite et al., 2023).

The fluctuations in sugar content observed during fermentation indicate active metabolic processes in which sugars may be both consumed by microorganisms and transformed through various enzymatic reactions. Lactic acid bacteria, which dominate during scald fermentation, utilize different sugars as substrates for energy production and metabolite synthesis.

In addition to disaccharide hydrolysis, amylolytic enzymes such as β -amylase and glucoamylase remain active during fermentation, continuing to break down starch and dextrins into glucose and maltose in later stages. This enzymatic activity increases the concentration of free sugars in the fermentation medium, providing additional substrates for microbial metabolism. Therefore, beyond the initially available sugars, new sugars may also be generated from polysaccharides and oligosaccharides during fermentation.

These metabolic changes explain the initial decrease in sugar content due to microbial consumption, as well as the stabilization or even increase in sugar levels at later fermentation stages. These processes influence not only substrate availability for microorganisms but also acid formation, and ultimately affect the taste and structure of the final product.

In summary, sugar dynamics during fermentation represent a complex, multifactorial process, involving both the consumption of sugars for microbial energy production and their transformation via enzymatic activity. The balance of these processes depends on the composition of the sourdough microbiota, the initial chemical composition of the substrate, fermentation conditions – including temperature and pH – and the duration of fermentation. These changes have a direct impact on the sensory properties and nutritional value of the final product, determining its acidity, flavor, and texture.

2.3. Organic Acid Content in Rye Scald

Organic acids are formed during the fermentation of scald and dough, but rye flour also naturally contains various organic acids that can influence the flavor profile.

Rye flour has been found to contain small amounts of organic acids, primarily phytic acid ($0.64 \pm 0.05 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ dry weight}$) and malic acid ($0.16 \pm 0.06 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ dry weight}$), as well as minor amounts of lactic, acetic, oxalic, and succinic acids. The organic acid profile of the fermented scald is presented in Table 5.

The organic acid profile of the fermented scald consisted primarily of lactic acid, the content of which increased rapidly (18-fold) during the first 12 hours and reached its maximum after 24 hours.

After 24 hours of fermentation, the lactic acid level remained stable, with no significant changes observed at 48 hours. Other organic acids were present in smaller amounts. The levels of phytic acid and tartaric acid remained unchanged throughout fermentation, while the content of malic acid and butyric acid decreased significantly after 12 hours. Variations in acetic acid content at different fermentation times can be attributed to changes in environmental conditions and the ongoing metabolism of lactic acid bacteria (LAB). The formation of lactic acid during fermentation explains the observed pH decrease and the increase in total titratable acidity in the fermented scald.

2.4. Effect of Fermentation Time on Phytic Acid Content in Rye Flour Scald

The presence of phytic acid in rye flour is a significant factor in terms of nutritional value, as it can form insoluble complexes with minerals, thereby reducing their bioavailability.

Fermentation may promote the degradation of phytic acid if phytase-producing microorganisms are active or if phytase enzymes are activated under suitable conditions. However, the effectiveness of fermentation in degrading phytic acid depends on several factors, including pH, temperature, and the diversity or species of the involved microorganisms.

The phytic acid content in rye scald after the saccharification phase was 0.65 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight (Fig. 17). During fermentation, slight fluctuations in phytic acid levels were observed, but no significant decrease was detected. No rapid degradation of phytic acid occurred during scald fermentation, suggesting the absence of active phytase.

Although lactic acid bacteria are capable of contributing to phytic acid degradation under specific conditions, no significant breakdown was observed in this study, where *Lactobacillus delbrueckii* dominated the microbial population of the fermented scald. Phytase is the enzyme responsible for phytic acid hydrolysis, and it may be located intracellularly (within the bacterial cell or associated with the cell wall) or secreted into the extracellular environment. Extracellular phytase acts directly in the medium where the substrate – phytic acid – is located, and is therefore more effective at degrading it. In contrast, cell-associated phytase functions only when the substrate comes into direct contact with the cell surface or is internalized, which may limit its efficiency.

Nuobariene et al. (2015) identified both cell-bound and extracellular phytase activity in *Limosilactobacillus panis*, *Limosilactobacillus reuteri*, and *Limosilactobacillus fermentum* strains isolated from wheat and rye sourdoughs. Cizeikiene et al. (2020) reported extracellular phytase activity in sourdoughs fermented with thermophilic lactic acid bacteria, including *Lactobacillus bulgaricus*, *L. acidophilus*, and *L. rossiae*, in conditions with pH<3.5 at 40 °C.

Phytase activity is also influenced by fermentation conditions, such as temperature and pH.

However, the obtained results indicate that the phytic acid content in rye scald did not change significantly during fermentation, suggesting limited phytase activity under these conditions. This may be due to the absence of optimal fermentation conditions required for phytase activation or the lack of specific microorganisms capable of effectively hydrolyzing phytic acid.

2.5. Effect of Fermentation Time on Fructan Content in Rye Scald

During fermentation, fructan degradation occurs as a result of microbial and enzymatic activity, and its intensity depends on fermentation conditions and the metabolites of the involved microorganisms.

The fructan content in rye scald after the saccharification phase was determined to be 3.08 ± 0.07 g 100 g⁻¹ dry weight (Fig. 18). A gradual decrease in fructan content was observed during fermentation – after 12 hours it had decreased to 2.92 ± 0.12 g 100 g⁻¹ dry weight. This trend continued, and after 48 hours the fructan content had dropped to 2.66 ± 0.02 g 100 g⁻¹ dry weight. Although fructan levels steadily declined throughout the fermentation process, no significant difference ($p > 0.05$) was observed between the values at 24 and 36 hours, indicating a slowdown in the rate of fructan hydrolysis.

During fermentation, enzymes and microorganisms act to promote the hydrolysis of fructans, breaking them down into monosaccharides.

Enzymes involved in fructan degradation during fermentation include inulinase, fructosidase, levanase, and β -fructofuranosidase, and their activity depends on the specific lactic acid bacteria (LAB) strains present in the fermentation process. As a result of fructan breakdown, fructose is released, which may affect the overall sugar profile (Pejcz et al., 2024).

In the study by Pejcz et al. (2024), a significant decrease in fructan content was observed in rye flour sourdough, influenced by both the LAB species used and the fermentation duration. They reported that after 48 hours of sourdough fermentation, fructan content decreased from 3.7 g 100 g⁻¹ dry weight to 1.2 g when *Lactiplantibacillus plantarum* was used, and to 1.06 g 100 g⁻¹ dry weight with *Lactiacaseibacillus casei*.

The results of the present study suggest that *Lactobacillus delbrueckii* does not possess strong fructan-degrading capabilities, which may explain the limited reduction in fructan content during rye scald fermentation.

3. Evaluation of Rye Bread Quality

The quality of rye bread is determined by a range of biochemical and technological factors, including fermentation duration and the interaction of raw materials.

In this context, the scald serves as a key component – not only providing specific structure and sugar content, but also creating an environment that supports microbial growth and metabolic activity.

3.1. Sugar Content in Rye Bread Samples

The sugar content in rye bread is a complex parameter determined by the composition of raw materials, as well as enzymatic and microbiological processes throughout the production cycle.

The microbiota of the scald and sourdough, along with their synthesized enzymes, can significantly affect carbohydrate hydrolysis and the resulting sugar profile, thus influencing the sensory and technological properties of the final product. Changes in sugar content in bread are related to the fermentation duration of the scald used, the type of sourdough added to the dough, and the flour incorporated into the dough. No additional sugars (such as sucrose) are added during dough preparation.

The dough is primarily based on scald, the sugar content of which was discussed previously (Table 4). In addition, wholegrain rye flour is added when preparing the dough – the sugars present in the flour (total sugars 2.04 ± 0.03 g 100 g⁻¹ dry weight) may contribute to the final sugar content of the bread, and flour enzymes may further hydrolyze starch to generate new sugars.

Moreover, the sourdough added to the dough contains both lactic acid bacteria and yeasts. As a result of their metabolic activity, part of the sugars may be consumed during fermentation, forming organic acids and other byproducts.

Changes in sugar content in bread samples are summarized in Table 6.

Fructose content in the bread samples increased with longer scald fermentation time, rising from 0.37 ± 0.04 g 100 g⁻¹ dry weight in RB0 to a maximum of 0.89 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight in RB24. Glucose content showed minor ($p = 0.076$) fluctuations during fermentation, with the highest level observed in RM36 (0.56 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight) and the lowest in RM48 (0.43 ± 0.03 g 100 g⁻¹ dry weight). These variations may be linked to the dynamics of sugar transformation during fermentation, where microorganisms consume and produce various monosaccharides depending on substrate availability and metabolic activity.

Sucrose content gradually decreased with increasing fermentation time, starting from 0.50 ± 0.05 g 100 g⁻¹ dry weight in RM0 and reaching the lowest level of 0.30 ± 0.03 g 100 g⁻¹ dry weight in RM48.

This decrease in sucrose is attributed to its hydrolysis into glucose and fructose, a process driven not only by the enzymatic activity of lactic acid bacteria but also by yeast during dough fermentation. This sugar transformation mechanism is essential in fermentation, as it provides substrates for microbial metabolism and influences the sensory characteristics of the bread (Sahin et al., 2019).

Maltose, the predominant sugar in the bread samples, showed a slight decrease, starting from 13.32 ± 0.14 g 100 g⁻¹ dry weight in RM0 and stabilizing within the range of 12.11–12.12 g 100 g⁻¹ dry weight from RM24 to RM48.

Total sugar content remained unchanged across all bread samples ($p = 0.694$). The total sugar content in rye bread contributes to the balance between sweetness and acidity in the bread's flavor profile.

The fermentation duration of the scald influenced the sugar profile in the bread, particularly with respect to fructose and sucrose, while maltose and glucose levels remained relatively stable. Sugar content in the final bread was considerably lower than in the scald, indicating that sugars are abundantly formed during the saccharification phase of the scald, but only a fraction is utilized by lactic acid bacteria and yeasts during fermentation.

Furthermore, additional flour is incorporated during dough preparation, and the fermentation time for dough is shorter than for the scald, both of which also affect the sugar content and composition in the bread.

3.2. Organic Acid Content in Rye Bread

The content and composition of organic acids in rye bread are important indicators that affect not only its taste and aroma but also its structure and shelf-life properties.

Both the total amount of acids (total titratable acidity), the intensity of acidity (pH), and the specific composition of organic acids are primarily determined by metabolic processes occurring during fermentation, driven by the activity of the microbiota in the scald and sourdough.

The bread samples exhibited a similar trend in acidity changes to that observed during scald fermentation. The bread sample RM0, in which the scald had not been fermented, showed the highest pH (6.09 ± 0.04) and the lowest titratable acidity (2.7 ± 0.12 ml 0.1 N NaOH) (Fig. 19). Using a 12-hour fermented scald, the pH of the rye bread dropped to 4.26 ± 0.06 . In samples prepared with scalds fermented for 24–48 hours, no significant pH changes were observed ($p = 0.655$), with an average pH of approximately 4.10.

A similar pattern was observed for total titratable acidity: with a 12-hour scald, it reached 8.20 ± 0.20 ml 0.1 N NaOH, while no significant differences ($p = 0.644$) were found among samples using scalds fermented for 24, 36, and 48 hours, where the acidity averaged 9.03 ml 0.1 N NaOH.

The results meet the quality requirements for rye bread and confirm previous findings that scalds fermented for 24–48 hours can ensure a consistent rye bread production process and final product quality.

Variations in acidity in the fermented scald and bread are related to the organic acids produced by lactic acid bacteria and form an acid profile that plays a key role in shaping the sensory characteristics of the bread.

The acidity of rye bread samples is influenced by both the qualitative and quantitative composition of organic acids. The formation of organic acids is affected by microbial metabolites, while the content and composition of these acids influence the sensory properties of the bread.

In the bread samples, lactic acid was the dominant organic acid, and its content increased with longer fermentation time of the scald used (Table 7). Lactic acid content rose from 0.81 ± 0.06 g 100 g⁻¹ dry weight in bread with unfermented scald (RM0) to 2.06 ± 0.12 g 100 g⁻¹ dry weight in RM36, with no further significant changes ($p \leq 0.05$) observed in RM48 (2.00 ± 0.13 g 100 g⁻¹ dry weight). However, the lactic acid content in bread was lower than in the scald, as an additional portion of flour was added during dough preparation and the dough was fermented for a shorter time.

The contents of acetic, propionic, and butyric acids did not differ significantly between bread samples, indicating that their levels were not affected by the fermentation duration of the scald. However, the levels of these acids in the bread were significantly higher than in the scald samples. This increase is associated with the formation of additional metabolites during dough fermentation with Starter M, where, alongside yeast fermentation processes, organic acids – including acetic acid – are also produced by other microorganisms present in the dough.

The results indicate that the fermentation time of the scald significantly affects the organic acid content in the bread.

However, other acids such as acetic, propionic, and butyric acids remained largely unchanged when scalds fermented for different durations were used. This suggests that their formation may be more dependent on the added sourdough and the dough fermentation process. Organic acids are one of the key factors influencing the flavor and aroma characteristics of bread. The content of lactic and acetic acids in bread has a strong impact on its acidity and overall flavor profile. Acetic acid contributes to a sharper, more pronounced aroma (Limbad et al., 2020; Pérez-Alvarado et al., 2022; Plessas et al., 2008), while lactic acid is associated with a milder sourness. Lactic acid was also identified as the dominant acid in the study by Plessas et al. (2008), in which *L. bulgaricus* and *L. helveticus* were used for dough fermentation.

In bread samples made with scalds fermented for 24 hours or more, no significant differences were observed in acid content, indicating that 24 hours is a sufficient fermentation time to achieve a stable acid profile suitable for rye bread production. The results also show that extending the fermentation from 24 to 48 hours does not significantly alter the composition of organic acids but helps to stabilize their proportions. This trend can be applied in production planning to ensure consistent product quality and process predictability, as well as to adjust fermentation time based on production volume and capacity requirements.

3.3. Sensory Evaluation Results of Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations

In the sensory evaluation of bread samples (RM0, RM12, RM24, RM36, and RM48), changes in aroma, sour taste, sweet taste, stickiness, and floury aftertaste intensity were analyzed.

Compared to bread made with unfermented scald, the use of fermented scald improved the aroma, reduced sweetness and stickiness, and diminished the floury aftertaste. Furthermore, when the scald was fermented for 24 hours or longer, the sour taste of the bread became more consistent (Fig. 20).

Bread made with longer-fermented scald (RM12–RM48) showed more pronounced aroma intensity compared to the control sample (RM0), with the highest score observed in RM36.

Sour taste intensity increased with fermentation time, but no significant differences were observed beyond 24 hours, indicating stabilization of the fermentation process. This aligns with the organic acid results, where lactic acid was dominant.

Sweetness intensity decreased with longer fermentation – from the highest in RM0 to the lowest in RM48 – corresponding to reductions in maltose and sucrose content. Stickiness and floury aftertaste were most pronounced in the RM0 sample but diminished after fermentation, improving the bread's overall sensory characteristics.

Overall, 24-hour scald fermentation provides a balanced sweet-sour flavor profile and stable sensory properties, which are essential for producing rye bread with consistent quality.

3.4. Phytic Acid Content in Bread Samples

A significant decrease ($p \leq 0.05$) in phytic acid content was observed in bread samples (Fig. 21), depending on the fermentation duration of the scald used.

The highest phytic acid content was found in bread made with unfermented scald (RM0) – 0.64 ± 0.01 g 100 g⁻¹ dry weight. After just 12 hours of scald fermentation (RM12), the phytic acid content dropped significantly to 0.50 ± 0.03 g 100 g⁻¹ dry weight (a 22% reduction), and this level remained stable in bread samples made with longer-fermented scalds (RM24–RM48), with no statistically significant changes. These results suggest that the inclusion of fermented scald in bread production promotes more efficient phytate degradation compared to unfermented scald.

Phytic acid hydrolysis is primarily driven by the enzyme phytase, which exists in two forms – plant-based (from cereals) and microbial. While cereal-derived phytase has a higher optimal pH, microbial phytase (e.g., from sourdough yeasts) can remain active at lower pH levels (around pH 4.5) (Nielsen et al., 2007).

The findings align with previous research indicating that phytic acid content in various flour-based breads may range from 0.15 to 0.75 g 100 g⁻¹, reflecting the influence of the grain's outer layers (García-Esteva et al., 1999). The efficiency of phytate degradation is strongly influenced by fermentation conditions, particularly pH and temperature. A decrease in environmental pH enhances enzymatic activity by approaching the phytase optimal pH (~5.5), thereby accelerating phytate breakdown within the sourdough matrix (Leenhardt et al., 2005). Rodríguez-Ramiro et al. (2017) also reported that bread made with sourdough exhibited 25% higher phytase activity compared to bread made without sourdough.

During the initial fermentation of the scald using Starter P, no significant changes in phytic acid content were observed.

However, during dough fermentation with the addition of Starter M, a pronounced reduction in phytic acid was detected, indicating the higher enzymatic activity of the Starter M microbiota and its greater capacity to promote phytate hydrolysis.

3.5. Fructan Content in Bread Samples

Fructans affect the nutritional value of rye bread and its potential impact on the digestive system.

Studies show that fructan degradation during fermentation is primarily influenced by environmental pH, fermentation duration, and the properties of the microorganisms used – particularly their ability to secrete specific enzymes. During fermentation, lactic acid bacteria produce organic acids that lower the pH, which can enhance the activity of certain enzymes, including fructanases. These conditions promote the hydrolysis of carbohydrates, including fructans. Additionally, some lactic acid bacteria species can directly degrade fructans (Borowska et al., 2023) using enzymes (fructanases) that break down fructan chains into simpler sugars such as fructose. A key factor is the pH shift during fermentation, which may also enhance invertase activity (Menezes et al., 2021). Research also suggests that fructan degradation can occur due to invertase activity from *Saccharomyces cerevisiae* (Struyf et al., 2017).

The initial fructan content in bread made from unfermented rye scald was $2.90 \pm 0.03 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ dry weight (Fig. 22). A significant decrease ($p \leq 0.05$) in fructan content was observed after using a 12-hour fermented scald, where it dropped to $2.00 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ dry weight. With increasing scald fermentation time, the fructan content in bread continued to decrease, reaching $1.54 \pm 0.08 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (RP24), $1.87 \pm 0.01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (RP36), and $1.48 \pm 0.14 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (RP48). The pH of the fermented scald added to the dough may have been one of the factors contributing to the significant ($p \leq 0.05$) reduction in fructan content in the bread sample made with the 12-hour fermented scald.

The results show that fructan reduction in the scald was relatively small – on average 14% after 48 hours of fermentation – which may be explained by limited microbial activity, as lactic acid bacteria dominated the scald fermentation, and yeast-associated invertase activity was likely minimal or absent. In contrast, a much greater reduction in fructan content was observed in the bread samples – an average of 49% – which can be attributed to the more diverse microbiota in the dough, enriched by the added sourdough and rye flour microbiota throughout subsequent technological steps. The symbiosis between LAB and yeasts, particularly the invertase activity typical of yeasts, promoted more intensive fructan hydrolysis during dough fermentation.

All bread samples (RM0–RM48) were prepared with the same sourdough (Starter M) and underwent the same fermentation time, but the scalds used differed in fermentation duration – from unfermented (RM0) to 48-hour fermented (RM48).

The study confirmed that the technological and chemical parameters of rye bread production play a crucial role in reducing fructan content in the final product.

Fructan levels in rye bread can vary and are closely linked to the type and duration of fermentation used.

CONCLUSIONS

1. The activities of the enzymes α -amylase and β -amylase differed significantly ($p \leq 0.05$) among rye malt samples with varying diastatic power. A strong positive correlation was found between rye malt diastatic power and the activities of α -amylase and β -amylase ($r = 0.87$ and $r = 0.88$, respectively), confirming the suitability of diastatic power as an indicator of amylolytic activity in malt for bread production.
2. Increasing the content and diastatic power of unfermented rye malt significantly ($p \leq 0.05$) affected the enzymatic activity and technological properties of rye flour within the concentrations studied. It was determined that a diastatic power of 261 °WK or higher did not significantly enhance starch hydrolysis, indicating a plateau in enzymatic activity at this level.
3. No relationship was observed between the amount of added malt or its diastatic power and total sugar content in scald samples after the saccharification step, regardless of the malt DS and concentration.
4. At least 24 hours of scald fermentation is required to reach the peak in microbiological activity and pH. Fermentation for up to 48 hours resulted in stable microbiological and physicochemical parameters, making the scald suitable for high-quality bread production.
5. During rye scald fermentation, lactic acid content remained stable up to 48 hours, indicating the overall quality stability of the scald during prolonged fermentation.
6. Rye bread prepared with 24-hour fermented scald showed a 20% reduction in phytic acid content, which may improve digestibility and increase nutrient bioavailability. However, prolonged scald fermentation (24–48 h) did not further reduce phytic acid levels in the bread.
7. Rye bread made with 24-hour fermented scald showed a 49% reduction in fructan content, which may help reduce gastrointestinal discomfort for sensitive consumers. Extended scald fermentation (24–48 h) did not further reduce fructan content in the bread.
8. Scald fermentation for 24 hours improved the sensory properties of rye bread. The study showed that scald fermented for 24–48 hours yielded rye bread with consistently high quality.
9. The results confirm the hypothesis that the addition of unfermented rye malt with a specific diastatic power, combined with prolonged scald fermentation, ensures a technologically stable rye bread production process.

RECOMMENDATIONS

1. Diastatic power correlates with amylase activity in malt and reflects the malt's ability to hydrolyze starch, confirming its practical applicability as a parameter for evaluating malt batches for production purposes.

2. The amount of malt to be added can be optimized by taking into account the falling number of the flour and the diastatic power of the malt batch.
3. Malt with lower enzymatic activity, when used in higher amounts, can produce an effect equivalent to that of a more active malt used in smaller quantities. This approach can help stabilize the rye bread production process involving scald, regardless of variability in the diastatic power of supplied malt.
4. A scald fermentation time of at least 24 hours is recommended to achieve stable microbiological and physicochemical parameters, as well as the sensory properties characteristic of high-quality rye bread.
5. Extending scald fermentation up to 48 hours does not cause significant chemical or microbiological changes, ensuring consistent scald quality for bread production.

Mg.sc.ing. Rūta Mūrniece
e-pasts / *e-mail*: rutapau@gmail.com
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte /
Latvia University of Life Sciences and Technologies
Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte, Pārtikas institūts /
Faculty of Agriculture and Food Technology, Food Institute

