

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte
Pārtikas institūts



Mg.sc.ing. Rūta Mūrniece

Promocijas darbs

**RUDZU IESALA UN PLAUCĒJUMA RAUDZĒŠANAS IETEKME RUDZU
MAIZES RAŽOŠANĀ
*THE INFLUENCE OF RYE MALT AND SCALD FERMENTATION ON RYE
BREAD PRODUCTION***

Zinātnes doktora grāda
Zinātnes doktore (*Ph.D.*) inženierzinātnēs un tehnoloģijās
Iegūšanai

Promocijas darba autore
Mg.sc.ing. Rūta Mūrniece

Promocijas darba vadītāja
Asoc.prof. *Dr.sc.ing. Dace Kļava*

Jelgava
2025

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs “Rudzu iesala un plaucējuma raudzēšanas ietekme rudzu maizes ražošanā” izstrādāts laika posmā no 2020. līdz 2025. gadam. Pētījumi veikti Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultātes laboratorijās, Biotehnoloģiju zinātniskās laboratorijas Viedo tehnoloģiju laboratorijās, Pārtikas un fermentēšanas centrā Igaunijā (Center of Food and Fermentation Technologies, TFTAK), Šopēna tehnoloģijas (Chopin Technologies) Francijā, kā arī maizes ceptuvē “Ķelmēni” (Gulbenes novads, Rankas pagasts, Latvija).

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

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.

Pētījuma 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.

Promocijas darbs apkopots trīs nodaļās.

1. **Literatūras apskats.** Nodaļā apkopota un analizēta jaunākā zinātniskā literatūra par rudzu pilngraudu miltu ķīmisko sastāvu, enzimatisko aktivitāti un to ietekmi uz miltu tehnoloģiskajām īpašībām. Vērtētas jaunākās atziņas par rudzu nefermentētā iesala enzimatisko aktivitāti, kuru raksturo kvalitātes rādītājs diastātiskais spēks. Zinātniskajā literatūrā šis rādītājs ir maz analizēts maizes ražošanas tehnoloģisko procesu kontekstā, tāpēc būtiski ir izprast tā saistību ar cietes hidrolīzi un plaucējuma raudzēšanas procesu. Nodaļā aprakstīti plaucējuma veidi un apkopota informācija par plaucējumā notiekošajiem mikrobioloģiskajiem un ķīmiskajiem procesiem un to ietekmi maizes ķīmisko un sensoro īpašību veidošanā.
2. **Materiāli un metodes.** Nodaļā apkopoti pētījumā izmantotie materiāli un pielietotās metodes, kā arī aprakstītas izmantotās datu matemātiskās statistikas metodes.

3. **Rezultāti un diskusija.** Iegūtie rezultāti apkopoti trīs apakšnodaļās, strukturēti atbilstoši pētījuma shēmai. Rezultātu daļā raksturota rudzu iesalu diastātiskā aktivitāte, kā arī analizēta iesala aktivitātes un satura ietekme uz rudzu miltu fizikāli-ķīmiskajām un tehnoloģiskajām īpašībām, tostarp cukuru veidošanos pārcukurošanas un raudzēšanas laikā. Izstrādāts matemātiskais modelis rudzu miltu krišanas skaitļa stabilizēšanai. Izvērtētas rudzu pingraudu miltu plaucējuma mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņas ilgstošas (līdz 48 h) raudzēšanas laikā, ietverot cukuru, organisko skābju, fitīnskābes un fruktānu dinamiku. Novērtēta rudzu maizes kvalitāte atkarībā no izmantotā plaucējuma raudzēšanas ilguma, analizējot cukuru, organisko skābju saturu, sensorās īpašības un ķīmiskās izmaiņas. Iegūtie rezultāti sniedz pamatu iesala aktivitātes, satura un plaucējuma raudzēšanas ilguma nozīmes izvērtējumam ražošanas procesa stabilitātes un prognozējamības nodrošināšanai.

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.

ANNOTATION

The doctoral thesis "The influence of rye malt and scald fermentation on rye bread production" was developed during the period from 2020 to 2025. The research was carried out in the laboratories of the Faculty of Agriculture and Food Technology at the Latvia University of Life Sciences and Technologies, In the Smart Technologies Division of the Biotechnology Scientific Laboratory, the Center of Food and Fermentation Technologies (TFTAK) in Estonia, Chopin Technologies in France, as well as at the bakery "Ķelmēni" (Rankas parish, Gulbene municipality, Latvia).

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 doctoral thesis is structured into three chapters.

1. **Literature Review.** This chapter compiles and analyzes the latest scientific literature on the chemical composition and enzymatic activity of wholegrain rye flour and their impact on the technological properties of the flour. Recent findings regarding the enzymatic activity of rye malt, characterized by the quality indicator diastatic power, are evaluated. As this indicator is insufficiently explained in the scientific literature in relation to bread production processes, it is important to understand its relationship with starch hydrolysis and the efficiency of scald fermentation. The chapter also describes different types of scald and summarizes information on the microbiological and chemical processes occurring in scalds and their influence on the chemical and sensory properties of bread.

2. **Materials and Methods.** This chapter presents the materials and methods used in the study, including the applied mathematical and statistical data analysis techniques.
3. **Results and Discussion.** The obtained results are compiled into three subchapters, structured according to the study design. The activity of diastatic rye malts is characterized, and the influence of malt activity and content on the physicochemical and technological properties of rye flour, including sugar formation during saccharification and fermentation, is analyzed. A mathematical model for stabilizing the falling number of rye flour–malt mixtures is developed. Changes in the microbiota and chemical composition of rye scald during prolonged fermentation (up to 48 hours) are evaluated, including the dynamics of sugars, organic acids, phytic acid, and fructans. The quality of rye bread prepared using scalds fermented for different durations is assessed by analyzing sugar and organic acid contents, sensory properties, and chemical changes. The results provide a basis for evaluating the significance of malt activity, content, and scald fermentation time in ensuring the stability and predictability of the bread production process.

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’.

Zinātniskā darba aprobācija / *Approbation of the Research*

Iegūtie rezultāti publicēti starptautiski atzītos zinātniskos rakstu krājumos, kas indeksēti Scopus vai Web of Science datu bāzēs. / *The obtained results have been published in internationally recognized scientific journals indexed in the Scopus or Web of Science databases.*

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 Prebiotical 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 6 starptautiskās konferencēs / *The results obtained in the research have been reported at 6 conferences.*

- 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*)
- 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*)
- 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*)
- 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*)
- 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*)
- 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*)
- Murniece, R., Klava, D. (2020) Impact of long-fermented sourdough on the technological and prebiotical properties of rye bread. 3rd International Conference "Nutrition and Health", Riga, Latvia, December 9–11 (mutiskais referāts / *oral presentation*)

SATURS / CONTENT

IEVADS / INTRODUCTION.....	15
1. LITERATŪRAS APSKATS / LITERATURE REVIEW.....	17
1.1. Pilngraudu rudzu miltu raksturojums / <i>Characteristics of Whole Grain Rye Flour</i>	17
1.1.1. Pilngraudu rudzu miltu ķīmiskais sastāvs / <i>Chemical Composition of Whole Rye Flour</i>	17
1.1.2. Rudzu miltu enzimatiskā aktivitāte / <i>Enzymatic Activity of Rye Flour</i>	21
1.1.3. Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības / <i>Technological Properties of Rye Flour</i> ...	23
1.2. Rudzu nefermentētais iesals / <i>Unfermented Rye Malt</i>	25
1.3. Rudzu plaucējums un tā raudzēšana / <i>Rye Flour Scald and its Fermentation</i>	27
1.3.1. Plaucējuma vedi un raksturojums / <i>Types and Characteristics of Scald</i>	27
1.3.2. Plaucējums – barības vide pienskābes baktērijām un raugiem / <i>Scald as a Substrate for Lactic Acid Bacteria and Yeasts</i>	30
1.3.3. Raudzēta plaucējuma ietekme uz rudzu maizes fizikāli-ķīmiskajām īpašībām / <i>Effect of Fermented Scald on Physicochemical Properties of Rye Bread</i>	32
2. MATERIĀLI UN METODES / MATERIALS AND METHODS	36
2.1. Pētījuma norises laiks un vieta / <i>Time and Location of the Research</i>	36
2.2. Pētījumā izmantotie materiāli / <i>Materials Used in the Research</i>	36
2.3. Pētījuma struktūra un shēma / <i>Research Structure and Design</i>	38
2.4. Pētījumā izmantoto paraugu sagatavošanas metodes / <i>Sample Preparation Methods Used in the Research</i>	39
2.4.1. Raudzēta rudzu plaucējuma gatavošana / <i>Preparation of Fermented Rye Scald</i>	40
2.4.2. Raudzēta rudzu plaucējuma un maizes gatavošana ražošanas apstākļos / <i>Preparation of Fermented Rye Flour Scald and Bread Under Production Conditions</i>	41
2.4.3. Paraugu liofilizācija un sasmalcināšana / <i>Lyophilization and Grinding of Samples</i>	43
2.5. Pētījumā izmantotās analītiskās metodes / <i>Analytical Methods Used in the Research</i> ..	43
2.5.1. Iesala diastātiskās aktivitātes noteikšanas metodes / <i>Methods for Determining the Diastatic Activity of Malt</i>	43
2.5.2. Mikrobioloģisko rādītāju noteikšanas un mikroorganismu identifikācijas metodes / <i>Methods for Determining Microbiological Indicators and Identifying the Microorganisms</i>	44
2.5.3. Fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes / <i>Methods for Determining Physicochemical Parameters</i>	44
2.5.4. Maizes paraugu sensorā novērtēšana / <i>Sensory Evaluation of Bread Samples</i> ..	47
2.5.5. Rezultātu statistiskās apstrādes metodes / <i>Methods for Statistical Data Analysis</i>	47
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA / RESULTS AND DISCUSSION	48
3.1. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / <i>Effect of Rye Unfermented Malt on the Technological Properties of Rye Flour</i>	49
3.1.1. Rudzu nefermentēto iesalu aktivitātes raksturojums / <i>Characterization of the Activity of Unfermented Rye Malt</i>	49
3.1.2. Iesala satura un aktivitātes ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / <i>Effect of Malt Content and Activity on the Technological Properties of Rye Flour</i>	50
3.1.3. Rudzu iesala satura un DS ietekme uz cukuru sastāvu pēc miltu cietes hidrolīzes (pārcukurošanas) un pēc 24 h raudzēšanas / <i>Effect of Rye Malt</i>	

<i>Content and Activity on the Sugar Composition after Flour Starch Hydrolysis (Saccharification) and after 24 Hours of Fermentation</i>	<i>59</i>
3.1. Nodaļas kopsavilkums / <i>Summary of Chapter 3.1</i>	<i>66</i>
3.2. Mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņas plaucējuma pārcukurošanas un ilgstošas raudzēšanas laikā / <i>Microbial and Chemical Composition Changes After Scald Saccharification and Prolonged Fermentation</i>	<i>68</i>
3.2.1. Mikrobiotas raksturojums raudzētā plaucējumā / <i>Microbial Characterization of Fermented Scald</i>	<i>68</i>
3.2.2. Cukuru satura izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā / <i>Changes in Sugar Content During Scald Fermentation.....</i>	<i>71</i>
3.2.3. Organisko skābju saturs rudzu plaucējumā / <i>Organic Acid Content in Rye Scald</i>	<i>73</i>
3.2.4. Raudzēšanas laika ietekme uz fitīnskābes saturu rudzu plaucējumā / <i>Effect of Fermentation Time on Phytic Acid Content in Rye Flour Scald.....</i>	<i>74</i>
3.2.5. Raudzēšanas laika ietekme uz fruktānu saturu rudzu plaucējumā / <i>Effect of Fermentation Time on Fructan Content in Rye Scald</i>	<i>75</i>
3.2. Nodaļas kopsavilkums / <i>Summary of Chapter 3.2.....</i>	<i>76</i>
3.3. Rudzu maizes kvalitātes novērtējums / <i>Evaluation of Rye Bread Quality</i>	<i>78</i>
3.3.1. Cukuru saturs rudzu maizes paraugos / <i>Sugar Content in Rye Bread Samples..</i>	<i>78</i>
3.3.2. Organisko skābju saturs rudzu maizē / <i>Organic Acid Content in Rye Bread.....</i>	<i>80</i>
3.3.3. Rudzu maizes sensorās novērtēšanas rezultāti, maizes gatavošanā izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu / <i>Sensory Evaluation Results of Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations.....</i>	<i>82</i>
3.3.4. Fitīnskābes saturs maizes paraugos / <i>Phytic Acid Content in Bread Samples ...</i>	<i>83</i>
3.3.5. Fruktānu saturs maizes paraugos / <i>Fructan Content in Bread Samples.....</i>	<i>84</i>
3.3. Nodaļas kopsavilkums / <i>Summary of Chapter 3.3.....</i>	<i>86</i>
SECINĀJUMI / CONCLUSIONS.....	88
REKOMENDĀCIJAS / RECOMMENDATIONS.....	88
LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES.....	89
PIELIKUMI / APPENDICES.....	101

Darbā iekļauto tabulu saraksts / *List of Tables*

Tabulas Nr. / Table No	Tabulas nosaukums / Title of the Table	Lpp. / Page
2.1.	Rudzu miltu kvalitātes rādītāji / <i>Quality Indicators of Rye Flour</i>	36
2.2.	Rudzu nefermentētā iesala kvalitātes rādītāji / <i>Quality Indicators of Unfermented Rye Malt</i>	37
2.3.	Ieraugu kvalitātes rādītāji / <i>Sourdough Quality Indicators</i>	37
2.4.	Pētījuma shēma / <i>Research Design</i>	38
2.5.	Miltu-iesala paraugu gatavošanas parametri maisījumu sagatavošanai plaucējumu gatavošanai nefermentētā iesala ietekmes analizēšanai / <i>Parameters for the Preparation of Flour-Malt Samples for Mixture for Scald Production to Analyze the Effect of Unfermented Malt</i>	40
2.6.	Plaucējuma sagatavošanai izmantotās izejvielas / <i>Ingredients Used for Scald Preparation</i>	40
2.7.	Plaucējuma un mīklas gatavošanas receptūra / <i>Recipe for Scald and Dough Preparation</i>	41
3.1.	Rudzu nefermentētā iesala diastātiskā spēka (DS) un satura ietekme uz rudzu miltu (M1, M2, M3) maksimālo viskozitāti (BU) / <i>Marginally Estimated Mean Values Showing the Effect of Malt with Different Diastatic Power (DP) (°WK) on the Maximum Viscosity of Rye Flour (BU)</i>	55
3.2.	Cukuru saturs rudzu miltu un iesala paraugos / <i>Sugar Content in Rye Flour and Malt Samples</i>	59
3.3.	Cukuru saturs (g 100 g ⁻¹ sausas) neraudzētā un raudzētā rudzu plaucējumā / <i>Sugar Content (g 100 g⁻¹ dw) in Rye Scald Fermented for Different Time Periods</i>	72
3.4.	Organisko skābju saturs neraudzētā un raudzētā rudzu plaucējumā / <i>Organic Acid Content in Unfermented and Fermented Scald</i>	73
3.5.	Cukuru saturs rudzu maizes paraugos, izmantojot plaucējumu ar dažādu raudzēšanas ilgumu / <i>Content of Sugars in Rye Bread Prepared with Scald Fermented for Different Durations</i>	79
3.6.	Organisko skābju saturs rudzu maizē, kas gatavota ar dažādu ilgumu raudzētu plaucējumu / <i>Content of Organic acids in Rye Bread Prepared with Scald Fermented for Different Durations</i>	81

Darbā iekļauto attēlu saraksts

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of the Figure	Lpp. / Page
1.1.	Rudzu miltu A un B tipa cietes graudi / <i>A- and B-Type Starch Granules in Rye Flour</i> (Osman et al., 2022)	18
1.2.	Šķiedrvielu izvietojums (zilā krāsā iekrāsoti β-glikāni) rudzu (A) un kviešu (B) graudā / <i>Distribution of Dietary Fibers (β-glucans stained in blue) in Rye (A) and Wheat (B) Grain</i> (Jonsson et al., 2018)	19
1.3.	Bojātā ciete (attēlā dzeltenajā aplī) pēc miltu malšanas / <i>Damaged Starch (Highlighted in the Yellow Circle) after Flour Milling</i> (Wu et al., 2017)	24
1.4.	Rudzu nefermentētā iesala gatavošanas tehnoloģija / <i>Technology for the Preparation of Unfermented Rye Malt</i> (Bera et al., 2018; Wang et al., 2018)	25

Darbā iekļauto attēlu saraksta turpinājums /
Continuation of list of inserted tables used in the thesis

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of the Figure	Lpp. / Page
1.5.	Plaucējuma gatavošanas shematiskais attēlojums / <i>Schematic Representation of Scald Preparation</i>	28
1.6.	Cietes hidrolīze α - un β -amilāzes ietekmē un tās galaprodukti / <i>Starch Hydrolysis Under the Influence of α- and β-Amylase and Its End Products</i>	29
1.7.	pH un kopējā titrējamā skābuma izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā / <i>Changes in pH and Total Titratable Acidity (TTA) During Scald Fermentation</i>	32
1.8.	Raudzēts plaucējums (24 h) mīklas struktūrā uzreiz pēc samīcīšanas (A) un pēc 4 h raudzēšanas (B) / <i>Fermented Scald (24 h) in Dough Structure Immediately After Mixing (A) and After 4 Hours of Fermentation (B)</i> (Murniece et al., 2023)	33
2.1.	Ierauga P atjaunošanas shēma / <i>Preparation Scheme of Sourdough S</i>	37
2.2.	Miltu-iesala paraugu sagatavošanas shēma / <i>Flour-malt samples mixing scheme</i>	39
2.3.	Rudzu plaucējums pēc pārcukurošanas (A) un 24 h raudzēšanas (B) laboratorijas apstākļos / <i>Rye Flour Scald after Saccharification (A) and 24-hour Fermentation (B) under Laboratory Conditions</i>	41
2.4.	Tehnoloģiskā shēma rudzu plaucējuma un rudzu maizes gatavošanai / <i>Technological Scheme for Rye Scald and Rye Bread Preparation</i>	42
3.1.	α -Amilāzes (A) and β -amilāzes (B) aktivitāte rudzu nefermentētā iesala paraugos ar dažādu diastātisko spēku / <i>α-Amylase (A) and β-Amylase (B) Activity in Rye Unfermented Malt Samples with Different Diastatic Power</i>	50
3.2.	Dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) un diastātiskā spēka ietekme uz KS rudzu miltu paraugiem M1, M2, M3 / <i>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</i>	51
3.3.	Nosacītās vidējās vērtības dažāda diastātiskā spēka (DS) iesalu ietekmei uz rudzu miltu krišanas skaitli (KS) / <i>Conditional Mean Values of the Effect of Different Diastatic Power (DP) Malts on the Falling Number (FN) of Rye Flour</i>	52
3.4.	Rudzu nefermentētā iesala DS un satura ietekme uz rudzu miltu (M1, M2, M3) maksimālo viskozitāti (BU) / <i>Effect of Diastatic Power (DS) and Content of Rye Unfermented Malt on the Maximum Viscosity (BU) of Rye Flour M1, M2, M3</i>	54
3.5.	Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku (DS): 170, 179, 261, 362, 408 ($^{\circ}$ WK) un 1.0% satura ietekme uz rudzu miltu M2 (KS – 262 s) Mixolab rezultātiem (līknes) / <i>The Effect of Rye Unfermented Malt with Various Diastatic Power (DP): 170, 179, 261, 362, 408 ($^{\circ}$WK) and a Concentration of 1.0% on the Mixolab Results (Curves) of Rye Flour M2 (FN – 262 s)</i>	57
3.6.	Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku (DS): 170, 179, 261, 362, 408 ($^{\circ}$ WK) un satura ietekme uz rudzu miltu M2 klīsterizācijas koeficientu (C3-C2) / <i>The Effect of Rye Unfermented Malt with Various Diastatic Power (DP): 170, 179, 261, 362, 408 ($^{\circ}$WK) and a Concentration on the Gelatinization Index (C3-C2) of Rye Flour M2</i>	58

Darbā iekļauto attēlu saraksta turpinājums /
Continuation of list of inserted tables used in the thesis

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of the Figure	Lpp. / Page
3.7.	Kopējo cukuru saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Total Sugar Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)	61
3.8.	Saharozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas / Content of Sucrose in the Scald After Saccharification	62
3.9.	Maltozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Maltose Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours Fermentation (B)	63
3.10.	Glikozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Glucose Content in the Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)	64
3.11.	Fruktozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Fig. 3.8. Fructose Content in Scald After Saccharification (A) and After 24 Hours of Fermentation (B)	65
3.12.	Pienskābes baktēriju (A) un mikroskopisko sēņu (B) daudzveidība ieraugā un raudzētā plaucējumā / Diversity of Lactic Acid Bacteria (A) and Microscopic Fungi (B) in Sourdough and Fermented Scald	69
3.13.	Pienskābes baktēriju KVV skaita izmaiņas neraudzētā un raudzētā plaucējumā 48 h raudzēšanas laikā / Changes in Lactic Acid Bacteria CFU During Fermentation in Non-fermented and Fermented Scald over 48 Hours	70
3.14.	Raudzēta plaucējuma pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, raudzējot dažādu ilgumu / pH and TTA (ml 0.1 N NaOH) Values of Fermented Scald at Different Times	71
3.15.	Fitīnskābes saturs neraudzētā un raudzētā plaucējumā / Phytic Acid Content of Unfermented Scald and Scald Fermented for Different Duration	75
3.16.	Fruktānu saturs neraudzētā un raudzētā plaucējumā / Fructan Content in Unfermented Scald and Scald Fermented for Different Duration	76
3.17.	Rudzu maizes pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, izmantojot dažādu ilgumu raudzētu plaucējumu / pH and TTA (ml 0.1 N NaOH) Values of Rye Bread (RB) Prepared with Scalds Fermented for Different Durations	80
3.18.	Vidējais sensorās intensitātes novērtējums rudzu maizes paraugiem, kas gatavoti, izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu / Mean Sensory Intensity Scores for Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations	82
3.19.	Fitīnskābes saturs maizē ar dažādu raudzēšanas ilgumu / Phytic Acid Content in Bread with Different Fermentation Times of Scald	84
3.20.	Fruktānu saturs maizē ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu / Fructan Content in Bread with Different Fermentation Time of Scald	85

Darbā lietoto terminu skaidrojums / *Explanation of the Terms Included in the Research*

Amilāzes / <i>Amylases</i>	Enzīmi, kas šķel ogļhidrātus / <i>Enzymes that break down carbohydrates</i>
Cietes klīsterizēšanās temperatūra / <i>Starch gelatinization temperature</i>	Temperatūra, pie kuras ciete uzbriest un klīsterizējas / <i>Temperature at which starch swells and gels</i>
Diastātiskais spēks (DS) / <i>Diastatic power (DP)</i>	Diastātiskais spēks ir rādītājs, kas raksturo iesala enzīmu, galvenokārt amilāžu (α -amilāzes un β -amilāzes), spēju hidrolizēt cieti par vienkāršākiem cukuriem / <i>Diastatic power is an indicator that characterizes the ability of malt enzymes, primarily amylases (α-amylase and β-amylase), to hydrolyze starch into simpler sugars</i>
Eksopolisaharīdi (EPS) / <i>Exopolysaccharides (EPS)</i>	Mikroorganismu sintezēti polisaharīdi, kas tiek izdalīti ārpus šūnas un uzkrājas šūnapvalkā vai apkārtējā vidē / <i>Polysaccharides synthesized by microorganisms that are secreted outside the cell and accumulate in the cell envelope or the surrounding environment</i>
Enzīmu inhibitori / <i>Enzyme inhibitors</i>	Vielas, kas bloķē enzīmu darbību / <i>Substances that block enzyme activity</i>
Ilgstoša raudzēšana / <i>Long fermentation</i>	Plaucējuma, ierauga vai mīklas raudzēšana virs 24 h / <i>Scald, sourdough or dough fermentation exceeding 24 h</i>
Fruktāni / <i>Fructans</i>	Polisaharīdi, kas sastāv no fruktozes vienībām, savienotām ar β -(2 $\rightarrow$ 1) vai β -(2 $\rightarrow$ 6) glikozīdsaitēm / <i>Carbohydrates composed of fructose units</i>
Ieraugs / <i>Sourdough</i>	Rudzu miltu un ūdens maisījums, kas raudzēts ar pienskābes baktērijām un raugiem, kuru metabolisma produkti nosaka ierauga pH samazināšanos un CO ₂ veidošanos / <i>A mixture of rye flour and water fermented by lactic acid bacteria and yeasts, whose metabolic products acidify the dough and produce CO₂</i>
Lipāzes / <i>Lipases</i>	Enzīmi, kas katalizē lipīdu sadalīšanos glicerīnā un taukskābēs / <i>Enzymes that catalyze the breakdown of lipids into glycerol and fatty acids</i>
Mikroorganismu metabolīti / <i>Microbial metabolites</i>	Savienojumi, kas veidojas raudzēšanas laikā mikroorganismu vielmaiņas rezultātā / <i>Compounds produced by microorganisms during fermentation</i>
Nefermentēts rudzu iesals / <i>Unfermented rye malt</i>	Rudzu iesals, kas satur augstu enzīmu aktivitāti / <i>Rye malt with high enzymatic activity</i>
Proteāzes / <i>Proteases</i>	Enzīmi, kas sadala proteīnus peptīdos un aminoskābēs / <i>Enzymes that break down proteins into smaller peptides and amino acids</i>
Pārcukurošana / <i>Saccharification</i>	Cietes hidrolīzes process, kurā veidojas cukuri / <i>The process of starch hydrolysis leading to sugar formation</i>
Reoloģiskās īpašības / <i>Rheological properties</i>	Mīklas un plaucējuma fizikālās īpašības, kas nosaka tā struktūru un viskozitāti / <i>Physical properties of dough and scald determining its structure and elasticity</i>
Rudzu plaucējums / <i>Rye scald</i>	Rudzu miltu plaucējums, kurš gatavots rudzu miltus aplejot ar karstu ūdeni (92°C) un vienmērīgi sajaucot / <i>Rye flour scald prepared by pouring hot water (92 °C) over rye flour and mixing evenly</i>
Miltu tehnoloģiskās īpašības	Miltu īpašību kopumu, kas raksturo cietes, olbaltumvielu, šķiedrvielu kvalitatīvo un kvantitatīvo sastāvu un īpašības, kā arī enzimatisko aktivitāti, sauc par tehnoloģiskām īpašībām / <i>The set of flour characteristics that describes the qualitative and quantitative composition and properties of starch, proteins, and dietary fiber, as well as enzymatic activity, is referred to as technological properties.</i>

Darbā izmantoto apzīmējumu, saīsinājumu skaidrojums / List of explanation of designations, abbreviations included in the research

AACC	Amerikas graudu ķīmiķu asociācija / <i>American Association of Cereal Chemists</i>
ANOVA	Dispersijas analīze / <i>Analysis of Variance</i>
AEŠH / HPLC	Augstas veiktspējas šķidrums hromatogrāfija / <i>High-Performance Liquid Chromatography</i>
β -glikāni / β -glucans	Šķiedrvielas, kas sastāv no glikozes vienībām / <i>Fiber made of glucose units</i>
BU, g ⁻¹	β -amilāzes aktivitāte izteikta Betamyl-3® vienībās vienā gramā parauga / <i>β-amylase activity expressed in Betamyl-3® units per gram of sample</i>
BU	Brabender viskozitātes vienības / <i>Brabender viscosity units</i>
CU	Ceralpha vienības, kas raksturo α -amilāzes aktivitāti, izmantojot specifisku substrātu Ceralpha testā / <i>Ceralpha units, which characterize α-amylase activity using a specific substrate in the Ceralpha assay</i>
Ca	Kalcijs / <i>Calcium</i>
C2, C3, C4, C5	Klīsterizācijas un sašķidrināšanās posmi (Mixolab testi) / <i>Gelatinization and liquefaction stages (Mixolab tests)</i>
Cu	Varš / <i>Copper</i>
DS / DP	Diastātiskais spēks / <i>Diastatic power</i>
EBC	Krāsa pēc Eiropas Alusdarītāju konvencijas standartizētās krāsu sistēmas / <i>Color by European Brewery Convention method</i>
Fe	Dzelzs / <i>Iron</i>
F1	Hibridšķirnes (piemēram, 'Brasetto F1') / <i>Hybrid varieties (e.g., 'Brasetto F1')</i>
FODMAPs	Fermentējami oligosaharīdi, disaharīdi, monosaharīdi un polioli, kuri var izraisīt gremošanas traucējumus jutīgiem cilvēkiem / <i>Fermentable Oligosaccharides, Disaccharides, Monosaccharides, and Polyols</i>
g 100 g ⁻¹	Grami uz 100 gramiem / <i>Grams per 100 grams</i>
h	Stunda (laika mērvienība) / <i>Hour (time unit)</i>
HSD	Patiesi nozīmīga atšķirība / <i>Honest Significant Difference</i>
ISO	Starptautiskā Standartizācijas organizācija / <i>International Organization for Standardization</i>
ITS	Iekšējā transkribētā starplika / <i>Internal transcriber spacer</i>
KS / FN	Krišanas skaitlis / <i>Falling Number</i>
KKV / CFU	Kolonijas veidojošās vienības / <i>Colony-forming units</i>
K	Kālijs / <i>Potassium</i>
PB / LAB	Pienskābes baktērijas / <i>Lactic Acid Bacteria</i>
LBTU	Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte / <i>Latvia University of Life Sciences and Technologies</i>
log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹	Logaritmiskais rādītājs kolonijas veidojošo vienību skaits gramā / <i>Logarithmic indicator of colony-forming units per gram</i>
Lys	Lizīns (aminoskābe) / <i>Lysine (amino acid)</i>
Mg	Magnijs / <i>Magnesium</i>
MeCN	Acetonitrils / <i>Acetonitrile</i>
mg kg ⁻¹	Miligrami uz kilogramu / <i>Milligrams per kilogram</i>
MV	Maksimālā viskozitāte / <i>Maximum viscosity</i>
nm	Nanometri (viļņa garums) / <i>Nanometers (wavelength)</i>
P	Fosfors / <i>Phosphorus</i>
PP	Polipropilēns (plastmasa) / <i>Polypropylene (plastic material)</i>
T	Laiks / <i>Time</i>
t	Temperatūra / <i>Temperature</i>
pH	Rādītājs, kas raksturo ūdeņraža jonu koncentrāciju / <i>Indicator of Hydrogen Ion Concentration</i>

Darbā izmantoto apzīmējumu, saīsinājumu skaidrojuma turpinājums /
Continuation of list of explanation of designations, abbreviations included in the research

qPCR	Kvantitatīvā polimerāzes ķēdes reakcija / <i>Quantitative Polymerase Chain Reaction</i>
TTA	Kopējais titramējamais skābums / <i>Total Titratable Acidity</i>
TFTAK	Pārtikas un fermentēšanas tehnoloģiju centrs / <i>Center of Food and Fermentation Technologies</i>
°WK	Diastātiskā spēka mērvienība, Windisch Kolbach grādi / <i>Diastatic power unit, Degrees Windisch-Kolbach</i>
Zn	Cinks / <i>Zinc</i>
ŪA / WA	Ūdens absorbcija / <i>Water absorption</i>
Ieraugs M / <i>Sourdough D</i>	Ieraugs mīklai / <i>Sourdough Dough</i>
Ieraugs P / <i>Sourdough S</i>	Ieraugs plaucējumam / <i>Sourdough Scald</i>
M	Rudzu milti, konkrēts paraugs / <i>Rye flour, specific sample</i>
I	Iesals (rudzu nefermentētais iesals) / <i>Malt (rye unfermented malt)</i>
MI	Rudzu miltu-iesala paraugi / <i>Rye flour-malt samples</i>
RP	Plaucējuma paraugs / <i>Scald sample</i>
RM	Rudzu maizes paraugs / <i>Rye bread sample</i>

IEVADS / INTRODUCTION

Pārtikas ražošanā būtiska nozīme tiek piešķirta procesu optimizācijai, efektivitātei un stabilitātei, kas ir svarīgi arī tradicionālu produktu, piemēram, ar plaucējumu gatavotas rudzu maizes, ražošanā. Lai nodrošinātu vienmērīgu un kontrolējamu rudzu maizes ražošanu, nozīmīga ir padziļināta izpratne par rudzu pilngraudu miltu plaucējuma (rudzu plaucējuma) gatavošanas un raudzēšanas posmu norisi, kā arī šo procesu mijiedarbību ar izejvielu īpašībām. Līdztekus tam, patērētāju pieprasījums pēc atbilstošas kvalitātes pilngraudu produktiem veicina interesi par raudzēšanas procesu izmantošanu ne vien garšas un struktūras uzlabošanai, bet arī uzturvielu pieejamības paaugstināšanai.

Neskatoties uz rudzu maizes senajām ražošanas tradīcijām, tās tehnoloģiskais pamats – plaucējuma gatavošana – joprojām balstās uz komplicētām un savstarpēji cieši saistītām bioķīmiskām un mikrobioloģiskām norisēm, kuru kontrole praksē bieži vien ir ierobežota. Tāpēc šī procesa padziļināta izpēte un izpratne ir būtiska, lai mūdienu apstākļos nodrošinātu stabilu un prognozējamu rudzu maizes ražošanu, vienlaikus saglabājot tās tradicionālās garšas īpašības un uzturvērtību. Pētījuma centrā ir divi savstarpēji saistīti, bet konceptuāli atšķirīgi tehnoloģiskie virzieni, kas nosaka rudzu plaucējuma īpašības un līdz ar to arī maizes īpašības. Pirmais virziens saistīts ar nefermentētā rudzu iesala ietekmi uz plaucējuma enzimatiskajiem procesiem. Praksē novērojama situācija, kur vienādu iesala devu pievienošana rada atšķirīgus rezultātus – tas notiek tādēļ, ka iesala aktivitāte mainās atkarībā no graudu šķirnes, dīdēšanas apstākļiem, kaltēšanas režīma un uzglabāšanas ilguma – tā var būt mainīga gan starp partijām, gan starp dažādiem ražotājiem. Šī mainība apgrūtina ražošanas procesa kontroli un rada svārstības plaucējuma īpašībās – īpaši cukuru veidošanās intensitātē, plaucējuma viskozitātē un skābuma attīstībā. Lai to risinātu, pētījumā tiek analizēta iesala enzimatiskā ietekme, piedāvājot izmantot diastātisko spēku (DS) kā praktisku, kompleksu kvalitātes rādītāju, kas ļauj pielāgot iesala devu atbilstoši tā aktivitātei un tādējādi stabilizēt plaucējuma bioķīmiskos procesus.

Papildus iesala aktivitātes mainībai, otrs būtisks faktors, kas ietekmē rudzu plaucējuma īpašības un līdz ar to arī maizes īpašības, ir raudzēšanas ilgums. Praksē plaucējuma raudzēšanas ilgums var atšķirties – no 8 līdz 48 stundām – un šobrīd trūkst pietiekama informācija par to, kā ilgstoša raudzēšana (24 h un vairāk) ietekmē cukuru, organisko skābju veidošanos, mikrobiotas attīstību, kā arī maizes sensorās īpašības un uzturvielu izmaiņas. Tāpēc otrs pētījuma virziens ir ilgstošas plaucējuma raudzēšanas laika ietekmes izpēte, pievēršoties raudzēšanas procesa dinamikai, uzturvielu pārveidei (fruktānu un fitīnskābes satura samazinājumam), kā arī ietekmei uz pilngraudu rudzu maizes ķīmiskajām un sensorajām īpašībām.

Abu šo virzienu analīze ļauj veidot zinātniski pamatotu un praksē pielietojamu pieeju rudzu maizes ražošanas procesa stabilizēšanai un prognozēšanai, vienlaikus nodrošinot pilngraudu rudzu maizes atbilstību patērētāju prasībām

Promocijas darba hipotēze: tehnoloģiski stabili ar plaucējumu gatavotas rudzu maizes ražošanas procesa 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.

Pētījuma 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.

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.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā uz 100 lapām, un ietver 13 tabulas, 32 attēlus, 175 literatūras avotus un 2 pielikumus.

1. LITERATŪRAS APSKATS / *LITERATURE REVIEW*

Rudzu maize, kas ražota ar raudzēta plaucējuma tehnoloģiju, ir būtiska Ziemeļeiropas reģiona maizes cepšanas tradīciju sastāvdaļa, un tās kvalitāti un īpašības lielā mērā nosaka plaucējuma fizikāli-ķīmiskās īpašības, raudzēšanas norise un mikrobiotas aktivitāte. Viena no plaucējuma sastāvdaļām ir nefermentētais rudzu iesals, kura diastātiskais spēks var būtiski atšķirties atkarībā no izejvielas un ražošanas apstākļiem, ietekmējot cietes hidrolīzes intensitāti un cukuru veidošanos plaucējumā. Pieaugoša interese par pilngraudu produktiem un raudzēšanas ietekmi uz uzturvielu pieejamību veicina nepieciešamību pēc padziļinātiem pētījumiem par šiem procesiem rudzu miltu apstrādes kontekstā. Šobrīd ražošanas uzņēmumos ir būtiski strādāt pie procesa stabilizēšanas, lai nodrošinātu vienmērīgu, kvalitatīvu un efektīvu ražošanas plūsmu, īpaši mainīgas izejvielu kvalitātes apstākļos.

Papildus tam, nozīmīgs faktors, kas ietekmē gan plaucējuma mikrobioloģisko, gan bioķīmisko vidi, ir raudzēšanas ilgums. Ilgstoša raudzēšana var uzlabot mikroorganismu metabolisko aktivitāti, veicināt cukuru pārveidošanos, organisko skābju uzkrāšanos un potenciāli mazināt anti-uzturvielu (*anti-nutrients*, angļu val.) saturu, piemēram, fruktānu un fitīnskābes saturu. Zinātniskajā literatūrā joprojām ir nepietiekama informācija par raudzēšanas laika ietekmi uz pilngraudu rudzu plaucējuma tehnoloģiskajām īpašībām un uzturvielu sastāvu. Šādu pētījumu nozīme ir būtiska gan zinātniskā, gan praktiskā aspektā, lai nodrošinātu kvalitatīvu un stabilu rudzu maizes ražošanu.

1.1. Pilngraudu rudzu miltu raksturojums / *Characteristics of Whole Grain Rye Flour*

Rudzi (*Secale cereale* L.) ir graudaugs, kas tiek audzēts Ziemeļu un Austrumeiropas reģionos. Eiropā tiek izaudzēti apmēram 85% no visiem pasaulē izaudzētajiem rudziem un tā ir otra nozīmīgākā kultūra pēc kviešiem (Dziki, 2022; Németh & Tömösközi, 2021). Rudzu izplatību lielā mērā nosaka klimatiskie apstākļi – tie ir ziemāji un tiem ir nepieciešams aukstuma periods. Rudzi spēj augt trūcīgākā, smilšainākā augsnē nekā kvieši, tādēļ reģionos, kur augsnes auglība nav augsta, nereti tiek audzēti rudzi (Ikram et al., 2021). Skandināvijā, Krievijā un Baltijas valstīs ir senas tradīcijas maizes gatavošanā no rudzu miltiem. Joprojām šajās valstīs rudzu maize plaši tiek izmantota ikdienā. Savukārt, jauktās rudzu–kviešu maizes ir populāras Vācijā, kurās tiek izmantoti 50–90% rudzu milti no kopējā miltu daudzuma (Göttlich et al., 2023). Latvijā rudzu audzēšanai populāras ir gan populācijas šķīnes, tādas kā 'Kaupo', 'Amilo', kā arī hibrīdšķīnes, kā, piemēram, 'Brasetto F1', 'Su Drive F1' (Kunkulberga et al., 2017; Linina et al., 2020). Tiek uzskatīts, ka rudzu maizes cepšanai ir piemēroti milti no populācijas šķirņu rudziem, tajā skaitā 'Kaupo' šķīnes graudiem (Straumīte, 2006). 'Kaupo' ir vidēji gara, agrīna rudzu šķirne (Gailite et al., 2013), un tā ir reģistrēta Latvijā un tiek joprojām aktīvi selekcionēta un uzturēta.

1.1.1. Pilngraudu rudzu miltu ķīmiskais sastāvs / *Chemical Composition of Whole Rye Flour*

Pilngraudu rudzu miltiem piemīt daudzpusīga uzturvērtība, ko raksturo ogļhidrātu, olbaltumvielu, tauku, šķiedrvielu, bioaktīvo savienojumu, tostarp vitamīnu (B grupas vitamīni), minerālvielu (dzelzs, cinks) un fenolskābju, lignānu saturs. Galvenās rudzu miltu sastāvdaļas ir ogļhidrāti, galvenokārt ciete, šķiedrvielas, olbaltumvielas un minerālvielas. Pilngraudu rudzu milti vidēji satur 6–13% olbaltumvielu, 75–90% ogļhidrātu (no tiem lielākā daļa ir ciete), 2–3% tauku, ap 2% minerālvielu (tai skaitā dzelzi, magniju, cinku), un 15–21% šķiedrvielu, tostarp hemicelulozes, celulozi un lignīnu (Deleu et al., 2020; Ikram et al., 2021). Salīdzinājumā ar kviešu miltiem, rudzu miltos ir mazāks cietes un olbaltumvielu saturs, taču būtiski augstāks šķiedrvielu saturs, kas labvēlīgi ietekmē zarnu trakta darbību. Turklāt pilngraudu rudzu milti satur bioaktīvus savienojumus, piemēram, fenolskābes un lignānus, kas dod papildu

uzturvērtības un funkcionālās priekšrocības (Gomand et al., 2011; Ozoliņa, 2012), kā arī to olbaltumvielas satur neaizstājamo aminoskābi lizīnu (Dziki, 2022).

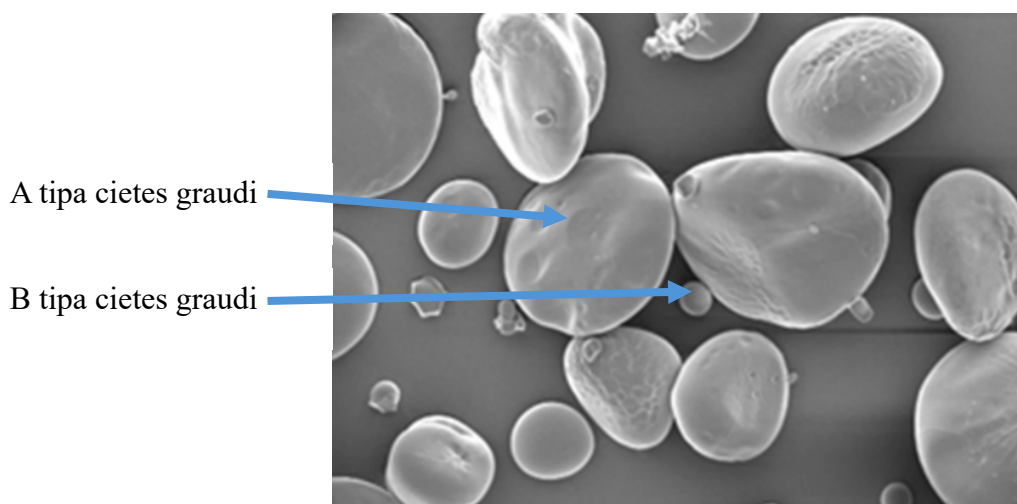
Rudzu pilngraudu miltos tiek samaltas visas grauda daļas – endosperma, graudapvalki un dīglis, – tajos saglabājas tās uzturvielas, kas ir rudzu graudos. Tāpēc, runājot par pilngraudu rudzu miltu uzturvērtību, tā būtu jāvērtē rudzu graudu kontekstā. Tas padara pilngraudu miltus ne tikai par pilnvērtīgu izejvielu maizes ražošanā, bet arī par nozīmīgu sastāvdaļu funkcionālo pārtikas produktu izstrādē, kur uzturvērtības saglabāšana ir prioritāra.

Ogļhidrāti

Ogļhidrāti veido aptuveni 75–90% no rudzu miltu kopējā ķīmiskā sastāva, tomēr ogļhidrātu saturs var būtiski atšķirties starp dažādām rudzu šķirnēm (71–87%) (Szentmiklóssy et al., 2023). Lielākā daļa no rudzu pilngraudu miltu ogļhidrātiem ir ciete (56–75%), tālāk seko šķiedrvielas (15–22%) un cukuri (3%) (Kaur et al., 2021).

Ciete

Ciete ir rudzu pilngraudu miltu galvenā sastāvdaļa, tā veido 57.1–65.6% no miltu sausnas satura (Dziki, 2022) un nosaka gan mīklas tehnoloģiskās īpašības, gan maizes struktūru. Tā kalpo kā primārā ogļhidrātu rezerve rudzu graudos. Rudzu miltos cietes graudu izmērs var būt divējāds (1.1. att.) – A tipa cietes graudi (60–90%), kuru vidējais daļiņu izmērs ir 15–31 μm un kuras izveidojas agrīnā endospermas attīstības stadijā, un mazāki cietes graudi – B tipa (10–40%), kuru vidējais daļiņu izmērs ir mazāks par 10 μm un kuri izveidojas vidējā un nobriešanas endospermas attīstības stadijā (Colin & Bushuk, 2017; Németh & Tömösközi, 2021). Cietes graudu lielums ietekmē amilozes un amilopektīna saturu, kas būtiski ietekmē mīklas tehnoloģiskās īpašības.



1.1. att. Rudzu miltu A un B tipa cietes graudi /

Fig. 1.1. A- and B-Type Starch Granules in Rye Flour (Osman et al., 2022)

Amiloze ir lineārs polisaharīds, kas sastāv no glikozes molekulām, kuras ir savienotas ar α -(1→4) glikozīdu saitēm. Amilopektīnam ir tāda pati glikozes ķēdes struktūra kā amilozei, taču tas veido trīsdimensiju kokam līdzīgu struktūru, pievienojot sānu ķēdes ik pēc 30–40 glikozes atlikumiem, izmantojot α -(1→6) glikozīdu saites (He et al., 2019). Amiloze un amilopektīns ir būtiskas cietes sastāvdaļas, un to attiecība var ietekmēt cietes fizikāli-ķīmiskās īpašības, tostarp tādus faktorus kā uzbriecšana, šķīdība, klīsterizēšanās temperatūra, viskozitāte (Stepniewska, Cacak-Pietrzak, 2021). Rudzu miltos esošie cietes graudi ir mehāniski un enzīmiski jutīgāki salīdzinājumā ar cietes graudiem kviešu miltos (Sluková et al., 2021).

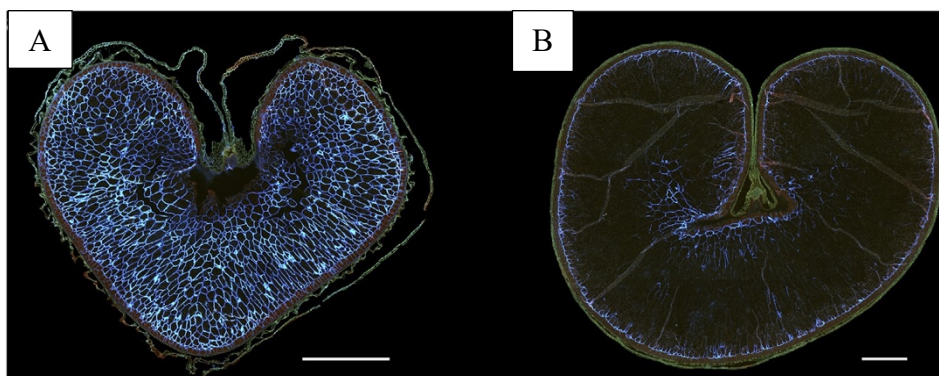
Cietes klīsterizēšanās temperatūra ir saistīta ar cietes graudu izmēru – lielāka izmēra cietes graudiem ir nepieciešams ilgāks laiks, lai sāktu uzbriest un sasniegtu maksimālās viskozitātes temperatūru, salīdzinot ar mazākiem cietes graudiem un bojātiem cietes graudiem (Brites et al., 2008). Cietes klīsterizēšanās temperatūra rudzu miltiem tiek norādīta 63–68 °C (Stępniewska et al., 2021).

Cukuri

Pilngraudu rudzu milti satur nelielu daudzumu cukuru – galvenokārt glikozi (ap 0.60%) un fruktozi (ap 0.20%), kas ir monosaharīdi, kā arī saharozi (ap 2.60%) un maltozi (ap 1.00%), kas pieder pie disaharīdiem. Kopējais cukuru saturs parasti nepārsniedz 2–3% no miltu sausnas (Klupsaite et al., 2023), taču tie ir tehnoloģiski nozīmīgi. Daļa šo cukuru jau dabiski ir klātesoša graudos, bet daļa veidojas plaucējuma gatavošanas laikā, enzimatiskās hidrolīzes rezultātā sadaloties cietei. Šie cukuri kalpo par substrātu mikroorganismu augšanai raudzēšanas laikā, un piedalās Maijāra reakcijā cepšanas procesā, ietekmējot maizes krāsu, garšu un aromātu.

Šķiedrvielas

Rudzu pilngraudu miltos ir ievērojams šķiedrvielu saturs, un, atšķirībā no kviešu graudiem, kuros šķiedrvielas galvenokārt koncentrējas grauda ārējās daļās, rudzu graudos tās atrodas gan ārējos apvalkos, gan arī endospermā (1.2. att.).



1.2. att. Šķiedrvielu izvietojums (zilā krāsā iekrāsoti β -glikāni) rudzu (A) un kviešu (B) graudā / Fig. 1.2. *Distribution of Dietary Fibers (β -glucans stained in blue) in Rye (A) and Wheat (B) Grain* (Jonsson et al., 2018)

Šķiedrvielas ir nozīmīgs pilngraudu rudzu miltu uzturkomponents, kuras iedala šķīstošajās un nešķīstošajās atkarībā no to šķīdības ūdenī. Pie nešķīstošajām šķiedrvielām pieder celuloze, hemiceluloze un lignīns, un to kopējais saturs rudzos var sasniegt 1.0–1.7% (Hansen et al., 2003). Savukārt šķīstošās šķiedrvielas ietver arabinoksilānus, β -glikānus un fruktānus (Sandberg et al., 2017). Šķiedrvielu sastāvā ir ne-cietes polisaharīdi, kuri atkarībā no to fizikālajām īpašībām dažādi ietekmē mīklas īpašības. Rudzu pilngraudu miltos augstā šķiedrvielu koncentrācija, īpaši ūdenī šķīstošo arabinoksilānu, nosaka to izteikto ūdens absorbcijas spēju (Colin & Bushuk, 2017). Arabinoksilāni ir polisaharīdi, kas sastāv no β -D-ksilopiranozila vienību mugurkaula ar α -L-arabinofuranozila sānu ķēdēm, veidojot sarežģītu telpisko struktūru. Šī struktūra nodrošina spēju saistīt ievērojamu ūdens daudzumu – vidēji apmēram 5 g ūdens uz 1 g sausnas – un veidot augstas viskozitātes šķīdumus (Nilsson et al., 2000). Rudzu miltos sastopami arī arabinogalaktāni, kas līdzīgi arabinoksilāniem veicina ūdens saistīšanu un ietekmē mīklas struktūras veidošanos.

Šie komponenti ir ļoti svarīgi rudzu miltu viskozo īpašību nodrošināšanai, kas cepšanas procesā kopā ar citām šķīstošām sastāvdaļām veido rudzu maizes struktūru (Tarazona et al., 2018). Šķīstošie arabinoksilāni piedalās rudzu maizes struktūras veidošanā, pozitīvi ietekmē raudzēšanas norisi un gremošanas procesā veicina īsās ķēdes taukskābju (SCFA) veidošanos

(Buksa et al., 2013; Koj & Pejcz, 2023). Tomēr arabinoksilāniem var būt arī nelabvēlīga ietekme, jo tie spēj mijiedarboties ar olbaltumvielām, radot lipīgu un grūti apstrādājamu mīklu, kas nosaka atšķirības starp rudzu un kviešu mīklas apstrādes tehnoloģijām (Buksa et al., 2013; Koj & Pejcz, 2023; Rosicka-Kaczmarek et al., 2016; Verwimp et al., 2004). Buksa et al. (2010) pētījumā konstatēts, ka šķīstošā pentozāna frakcija, ja tās attiecība pret cieti ir 1:16–1:20, var būtiski uzlabot maizes tilpumu, īpaši tad, ja izmantoti milti ar zemu enzīmu aktivitāti. Šķiedrvielu kopējais saturs, it īpaši arabinoksilāni, arī būtiski ietekmē rudzu maizes mitruma noturību, kas ir nozīmīgs parametrs produktu uzglabāšanas īpašībām un patērētāja sensorajai pieredzei.

Rudzu graudos β -glikānu saturs ir 2–3% no kopējā šķiedrvielu satura. β -glikāni ir polisaharīdi, kas sastāv no glikozes vienībām, kas savienotas ar β -(1 $\rightarrow$ 3), β -(1 $\rightarrow$ 6), β -(2 $\rightarrow$ 3), or β -(3 $\rightarrow$ 6) saitēm. Tie pieder pie ūdenī šķīstošajām šķiedrvielām, veidojot biezus, gēlveida šķīdumus, taču ietver arī ūdenī nešķīstošas komponentes (Koj & Pejcz, 2023).

Fruktāni ir ogļhidrāti, kas pieder pie fruktooligosaharīdiem un sastāv no fruktozes monomēriem ar dažādu polimerizācijas pakāpi, un daži no tiem satur arī D-glikozes vienību. Šos fruktānus parasti iedala kategorijās, pamatojoties uz atšķirībām polimerizācijas pakāpē un saitēm starp monomēriem. Rudzu graudos to saturs svārstās no 4.3–5.0% (Koj & Pejcz, 2023).

Šķiedrvielām ir pozitīva ietekme uz cilvēka veselību, tām ir sirds slimību un holesterīnu samazinoša ietekme, kā arī pozitīva ietekme uz gremošanas sistēmu (EFSA, 2010). Fruktāni ietekmē gremošanas sistēmas mikrobiālo metabolismu, veicina minerālvielu uzsūkšanās spēju (īpaši kalcija) un paaugstina sāta sajūtu (Ikram et al., 2021; Koj & Pejcz, 2023; Whelan et al., 2011). Tomēr pēdējā laikā arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta fermentējamiem oligosaharīdiem, disaharīdiem, monosaharīdiem un polioliem (FODMAPs, saīsinājums angļu val.), kuru starpā ir arī fruktāni, rudzu miltu kontekstā (Bellini et al., 2020; Laatikainen et al., 2016). Rudzu milti un rudzu maize satur FODMAPs, īpaši fruktānus (Seal et al., 2021). Šie ogļhidrāti var izraisīt diskomfortu un gremošanas traucējumus, īpaši personām, kurām ir kairinātas zarnas sindroms. Cilvēki aizvien vairāk pievērš uzmanību veselīgam dzīvesveidam, tajā skaitā sabalansētam uzturam, kas ietver pilngraudu produktus, tostarp rudzu miltus un rudzu maizi. Taču šis aicinājums rūpīgi jāpārdomā personām, kurām FODMAPs var radīt diskomfortu (Zannini & Arendt, 2018). Pētnieki atzīst, ka raudzēšana samazina fruktānu saturu rudzu maizē, kas raudzēta ar ieraugu (Pejcz et al., 2024).

Olbaltumvielas

Pilngraudu rudzu miltu olbaltumvielas ir vērtīgas ar neaizstājamām aminoskābēm, tostarp satur augstu lizīna (Lys) saturu (0.29 g 100 g⁻¹) rudzu graudu (Colin & Bushuk, 2017). Graudaugu olbaltumvielas atkarībā no šķīdības iedala albumīnos, globulīnos, prolamīnos un glutelīnos. Rudzu graudos dominē albumīni (29–40%) un globulīni (8–11%), kuri ir ūdenī un sāls šķīdumos šķīstošas frakcijas, atšķirībā no kviešu graudiem, kuros pārsvarā ir prolamīni (gliadīns) un glutelīni (glutenīns) – olbaltumvielas, kas, mijiedarbojoties ar ūdeni, veido lipekli, nodrošinot elastīgu un gāzi aizturošu mīklas struktūru. Rudzu olbaltumvielas neveido stabilu lipekļa tīklu, tāpēc rudzu mīkla raudzēšanas laikā zaudē elastību un mehānisko izturību, kas būtiski atšķir tās tehnoloģiskās īpašības no kviešu mīklas (Dziki, 2022). Rudzos nozīmīga loma ir arī prolamīnu frakcijai, ko rudzu gadījumā veido sekalīni. Sekalīniem piemīt zema gēlveides spēja un vāja savstarpējā mijiedarbība, tāpēc tie neveido strukturētu tīklu kā kviešu glutēna proteīni. Tādēļ, lai gan rudzu olbaltumvielas piešķir mīklai zināmu plastiskumu, to trūkstošā elastība un spēja noturēt gāzi cepšanas laikā padara rudzu mīklu tehnoloģiski nestabilāku. Gatavojot un raudzējot rudzu mīklu, viens no galvenajiem izaicinājumiem ir saglabāt gāzes poru noturību, jo to apvalks neveidojas kā kviešiem raksturīgajā lipekļa matricā, bet drīzāk veidojas kā gāzes putas bez mehāniska balsta. Lai gan līdz šim uzskatīts, ka rudzu olbaltumvielām ir mazāka nozīme struktūras veidošanā, to funkcionalitāte joprojām nav pilnībā izpētīta, īpaši kombinācijā ar citiem rudzu graudu komponentiem, piemēram, šķiedrvielām un enzīmiem (Deleu et al., 2020).

Tauki

Tauku saturs rudzu pilngraudu miltos ir aptuveni 1.8% no sausnas satura (Kaur et al., 2021; Szentmiklóssy et al., 2023). Rudzu graudu dīglis satur daudz lipīdus, kas sastāv, galvenokārt no nepiesātinātajām taukskābēm. Konkrēti, oleīnskābe, linolēnskābe un linolskābe veido aptuveni 81.6% no kopējā taukskābju sastāva rudzu graudu dīglī (Ikram et al., 2021). Mīklas gatavošanas laikā miltos esošie enzīmi daļēji sadala triglicerīdus un diglicerīdus. Šis process palielina monoglicerīdu īpatsvaru, vienlaikus saglabājot stabilu sterīna estera (*sterol ester*; angļu val.) saturu. Pētījumos pierādīts, ka fitosterīni – augu savienojumi ar holesterīnam līdzīgu struktūru – pazemina zema blīvuma lipoproteīnu holesterīna līmeni asinīs (Németh & Tömösközi, 2021). Tomēr tauku ietekme uz rudzu maizes uzturvērtību ir ierobežota, salīdzinoši zemā lipīdu satura dēļ graudos un miltos.

Minerālvielas, vitamīni un bioloģiski aktīvi savienojumi

Rudzu gaudi ir fosfora, kālija, magnija, kā arī dažādu B grupas vitamīnu avots. Tiamīns (B1 vitamīns) rudzu graudos 4.0–4.6 mg kg⁻¹, riboflavīns (B2 vitamīns) 1.8–1.9 mg kg⁻¹, niacīns (B3 vitamīns) 12–15 mg kg⁻¹, pantotēnskābe (B5 vitamīns) aptuveni 10 mg kg⁻¹, piridoksīns (B6 vitamīns) 3.0–3.4 mg kg⁻¹, folāts (B9 vitamīns) sastopams rudzos ar apmēram 0.48–0.52 mg kg⁻¹. Turklāt rudzu graudos ir α-tokoferols (E vitamīns) diapazonā 10–12 mg kg⁻¹. Rudzi ir vērtīgs minerālvielu avots, kas nodrošina dažādas fizioloģiskas funkcijas. Tie satur fosforu (P) 1806–4220 mg kg⁻¹, kāliju (K) 3480–6148 mg kg⁻¹, kalciju (Ca) 157–1447 mg kg⁻¹, magniju (Mg) 920–1602 mg kg⁻¹, dzelzi (Fe) 27–129 mg kg⁻¹, cinku (Zn) 21–52 mg kg⁻¹, mangānu (Mn) 20–75 mg kg⁻¹, varu (Cu) 3–13 mg kg⁻¹ rudzu graudu (Németh & Tömösközi, 2021). Pilngraudu rudzu miltos ir lielāks magnija, fosfora un kālija saturs salīdzinot ar kviešu miltiem (Mir et al., 2019). Lai gan rudzi satur ievērojamu daudzumu būtisku minerālvielu, to biopieejamību var ierobežot fitīnskābe (vai tās sāļi – fitāti), kas dabiski sastopama pilngraudu miltos. Fitīnskābe spēj veidot kompleksus ar divvērtīgiem un trīsvērtīgiem katjoniem, piemēram, dzelzi, cinku, kalciju un magniju, samazinot šo minerālvielu uzsūkšanos cilvēka gremošanas traktā (Brinch-Pedersen et al., 2014).

Rudzu graudos fenolskābju saturs var svārstīties no 65 līdz 300 mg 100 g⁻¹ graudu, padarot rudzus par vienu no bagātākajiem šo savienojumu avotiem starp labības graudiem. Ferulīnskābe veido ievērojamu daļu no kopējā fenolskābju daudzuma, veidojot aptuveni 85–90% no fenolu satura. Ievērojamā daudzumā rudzu ir atrodama arī sinapīnskābe un p-kumarskābe (Bondia-Pons et al., 2009).

1.1.2. Rudzu miltu enzimatiskā aktivitāte / *Enzymatic Activity of Rye Flour*

Rudzu miltos ir dažādi enzīmi, kas būtiski ietekmē bioķīmiskos procesus mīklas gatavošanas un maizes cepšanas laikā. Enzīmi darbojas kā katalizatori, paātrinot ķīmiskās reakcijas, taču to iedarbība atšķiras atkarībā no substrātiem, kurus tie spēj hidrolizēt. Pēc substrāta specifikas enzīmus var iedalīt trīs galvenajās grupās: amilāzes, proteāzes un lipāzes. Rudzu maizes cepšanas tehnoloģijā īpaši nozīmīga loma ir amilāzēm.

Amilāzes

Amilāzes ir cieti šķeļoši enzīmi, kas noārda glikozes polimērus līdz dekstrīniem un vienkāršajiem cukuriem, kuri raudzēšanas laikā kalpo kā barības vielas raugiem un pienskābes baktērijām. Atšķirībā no citiem graudaugu miltiem, rudzu miltos bieži sastopama ļoti augsta amilāžu aktivitāte, kas būtiski ietekmē mīklas īpašības un rudzu maizes ražošanas procesu (Stępniewska et al., 2021).

Rudzu graudos ir divas galvenās amilāžu grupas:

- α-amilāze, kas hidrolizē iekšējās α-(1→4) glikozīdu saites amilozes un amilopektīna molekulās, veidojot dekstrīnus, maltozi un glikozi;

- β -amilāze, kas no cietes ķēdes nereducējošā posma pakāpeniski atšķel maltozes vienības (Van Der Maarel et al., 2002).

Papildus šo enzīmu darbībai, cietes sadalīšanās procesā piedalās arī α -glikozidāzes, kas spēj tālāk hidrolizēt maltozi līdz glikozei (Bangar et al., 2022). Turklāt svarīga loma ir arī limitdekstrināzei (pazīstama arī kā izoamilāze), kura hidrolizē sazarotās α -(1 $\rightarrow$ 6) glikozīdu saites, kas paliek neskartas pēc α - un β -amilāžu darbības. Limitdekstrināze nodrošina pilnīgāku amilopektīna šķelšanu, sadalot tā sauktos limitdekstrīnus, kuri veidojas kā amilāžu darbības gala produkti.

Amilāžu sinerģiska darbība nodrošina dažādu cietes sadalīšanās produktu veidošanos: dekstrīni, maltotriozes, maltozes un glikozes. Šie produkti nodrošina ne tikai substrātu raudzēšanas procesam, bet arī veicina Maijāra reakciju cepšanas laikā, kas ietekmē maizes krāsu un aromātu.

Amilāžu aktivitāti rudzu miltos visbiežāk novērtē ar krišanas skaitli:

- zems krišanas skaitlis (zem 120 s) norāda uz augstu α -amilāzes aktivitāti, kas var radīt pārmērīgu cietes hidrolīzi, veidojot lipīgu mīklu un maizes mīkstumumu (Linina et al., 2019; Mangan et al., 2016);
- augsts krišanas skaitlis (virs 200 s) norāda uz zemu enzīmu aktivitāti, līdz ar to – samazinātu cukuru veidošanos, mazāku maizes tilpumu, sausāku mīkstumumu un mazāk izteiktu aromātu (Stępniewska et al., 2021).

Amilāžu aktivitāte ir mainīgs rādītājs, kas būtiski jāņem vērā rudzu miltu kvalitātes izvērtēšanā un to pielietojumā maizes cepšanā. Amilāžu aktivitāti būtiski ietekmē šķirnes īpašības, klimata pārmaiņas un laika apstākļi graudu nogatavošanās fāzē. Grauda attīstības laikā sintezējas β -amilāze, kas uzkrājas divās formās – nešķīstošā olbaltumvielu formā, kas galvenokārt saistīta ar cietes graudiem, un brīvā, šķīstošā formā. Dīgšanas laikā nešķīstošai formai ir galvenā loma, un tā ar proteolītisko enzīmu palīdzību tiek sašķelta un kļūst aktīva. β -amilāze dīgšanas laikā nesintezējas (Georg-Kraemer et al., 2001). Rudzu, līdzīgi kā kviešu un miežu graudos, α -amilāzes sintēze var notikt graudu dīgšanas laikā pirms ražas novākšanas un vēlā nogatavošanās fāzē, kas var ietekmēt krišanas skaitli. Lietus var veicināt graudu spontānu dīgšanu vārpās pirms ražas novākšanas (*preharvest sprouting*, angļu val.), kas sākotnēji nav vizuāli pamanāma, bet izraisa strauju enzīmu – tostarp amilāžu – aktivizēšanos, kas ietekmē miltu krišanas skaitli (Colin & Bushuk, 2017). Rudzu graudu vēlās nobriešanas fāzē (*late maturity*, angļu val.) var notikt α -AMY1 izoenzīmu daudzuma paaugstināšanās endospermas šūnās, pat bez redzamām dīgšanas pazīmēm pirms ražas novākšanas. Šāda enzimatiskā aktivitāte var samazināt krišanas skaitli, tādējādi pasliktinot rudzu graudu tehnoloģisko kvalitāti (Cannon et al., 2022). Šādu α -amilāzes uzkrāšanos izraisa temperatūras pazemināšanās vidējā vai vēlā grauda nobriešanas fāzē. Vēl viens α -amilāzes avots ir saistīts ar α -AMY2 izoenzīmu sintēzi perikarpā. Tādējādi α -amilāze rudzu graudos var tikt sintezēta un uzglabāta kā neaktīvs prekursors, kas nozīmīgi ietekmē miltu kvalitāti. Kā norāda Masojc & Milczarski (2009), to nosaka grauda ģenētiskās īpašības. Paaugstinoties mitrumam, strauji aktivizējas dīgšana, un dīgļa izdalītā hormona giberlīnskābes ietekmē aleirona slānī sintezējas α -amilāze (Georg-Kraemer et al., 2001). Šis process ir iesala ražošanas pamatā.

Sauss un karsts laiks graudu augšanas, nobriešanas un novākšanas laikā veicina rudzu graudu ražu ar zemu enzimatisko aktivitāti (Salmenkallio-Marttila & Hovinen, 2005), arī jaunu šķirņu selekcija, kurām raksturīga rezistence pret dīgšanu un zema α -amilāzes aktivitāte, kopumā nodrošina augstu krišanas skaitli un maksimālo viskozitāti (Oest et al., 2020).

Proteāzes

Proteāzes ir enzīmi, kas hidrolizē proteīnus, sadalot tos mazākos peptīdos un aminoskābēs. Rudzu mīklā, kuras struktūra balstās galvenokārt uz polisaharīdiem, īpaši arabinoksilāniem, nevis uz lipekli, paaugstināta proteolītiskā aktivitāte var vēl vairāk vājināt jau tā trauslo mīklas struktūru, samazinot tās noturību un apstrādājamību. Tomēr raudzēšanas laikā proteolīzes rezultātā tiek šķeltas olbaltumvielas, veidojot ar glutamīnu bagātus peptīdus, kas var uzlabot mīklas fizikālās īpašības un veicināt aromātisko savienojumu veidošanos

raudzēšanas procesā (Gänzle et al., 2008). Šīs reakcijas ir būtiskas rudzu maizes raksturīgās garšas, aromāta un struktūras veidošanā.

Lipāzes

Lipāzes ir enzīmi, kas katalizē lipīdu sadalīšanos glicerīnā un taukskābēs. Rudzu graudos tie ir atrodamī ļoti mazā daudzumā un nav zinātnisku pētījumu par to ietekmi uz rudzu mīklas vai maizes kvalitāti.

Enzīmu inaktivācija rudzu graudos un miltos

Alkilresorcinoli, ne-cietes polisaharīdi, tanīni un lektīni ir enzīmu inhibitori rudzu graudos un miltos, kas var ietekmēt enzīmu aktivitāti, tos inaktivējot. Enzīmu inhibitori pievienojas enzīmiem, bloķē to aktīvās vietas un pārtrauc enzīmu mijiedarbību ar substrātu. Inhibitoru veids un daudzums var mainīties, atkarībā no rudzu šķirnes, augšanas vides un ražas novākšanas apstākļiem. Šī pētījuma ietvaros nozīmīgākie ir amilolītiskie enzīmi. Būtiski ir izprast, kā α -amilāzes inaktivācija var notikt graudu attīstības un nobriešanas vēlākajos posmos. Pētījumi liecina, ka β -glikāni un arabinoksilāni var inhibēt α -amilāzes aktivitāti, saistoties ar hidroģēnsaitēm (Zhang et al., 2024). Tie var arī netieši kavēt enzīmu aktivitāti fizikālo īpašību dēļ, apgrūtinot piekļuvi substrātam. Rudzu graudu nobriešanas laikā α -amilāzes aktivitāte var samazināties arī dabisko proteāzes inhibitoru ietekmē (Täufel et al., 1997). Enzīmu inaktivāciju var veicināt arī vides faktori graudu nogatavināšanas laikā, piemēram, paaugstināta vides temperatūra un sausums.

Atkarībā no rudzu augšanas un novākšanas apstākļiem būtiski mainās rudzu miltu kvalitāte un tajos esošo enzīmu aktivitāte. Enzīmu aktivitāte miltos ietekmē tehnoloģiskos procesus, galvenokārt rūgšanu, kā arī mīklas struktūru, elastību, ūdens saistīšanas spēju un maizes garšu. Pievienojot rudzu nefermentēto iesalu, ir iespējams regulēt un uzlabot rudzu miltu kvalitāti, plaucējuma gavatošanu un rudzu maizes sensorās īpašības.

1.1.3. Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības / *Technological Properties of Rye Flour*

Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības ir komplekss parametru kopums, ko ietekmē gan miltu ķīmiskais sastāvs un struktūra (piemēram, cietes un šķiedrvielu īpatsvars, bojātās cietes daudzums, enzīmu aktivitāte), gan malšanas veids un apstākļi. Šīs īpašības tieši nosaka plaucējuma un mīklas veidošanos un maizes kā galaprodukta kvalitāti. Agrotehniskie apstākļi (piemēram, šķirne, mēslošanas režīms, nogatavināšanās apstākļi), graudu pirmapstrāde (tīrīšana, kaltēšana, malšana) un miltu uzglabāšanas ilgums un apstākļi (temperatūra, mitrums, oksidācijas procesi) būtiski ietekmē rudzu miltu enzīmu aktivitāti, tostarp α , β -amilāzes un proteāžu aktivitāti, kā arī cietes graudu struktūru, izmēru un bioaktīvo vielu (piemēram, fenolskābju un fitīnskābes) saturu. Šīs izmaiņas, savukārt, tieši ietekmē miltu tehnoloģiskās īpašības, kas izpaužas kā mainīga mīklas viskozitāte, raudzēšanas stabilitāte, cietes klīsterizācijas spēja un cukuru pieejamība. Minētie parametri tiek kvantitatīvi novērtēti, izmantojot krišanas skaitli, amilogrāfa maksimumu (Kunkulberga & Segliņš, 2010) un Mixolab profilu. Krišanas skaitlis raksturo miltos esošo amilāžu aktivitāti – jo augstāka enzīmātiskā aktivitāte, jo zemāks ir krišanas skaitlis, norādot uz lielāku cietes hidrolīzes pākāpi. Amilogrāfa maksimums (maksimālā viskozitāte) raksturo cietes klīsterizācijas spēju un stabilitāti termiskās apstrādes laikā – jo augstāka viskozitāte, jo izteiktāka cietes uzbriestspēja un vājāka enzīmātiskā degradācija. Savukārt Mixolab profils vienlaicīgi raksturo mīklas mehānisko un termisko uzvedību, ietverot gan cietes klīsterizāciju, gan hidrolīzi, tādējādi sniedzot visaptverošu ieskatu par miltu tehnoloģiskajām īpašībām.

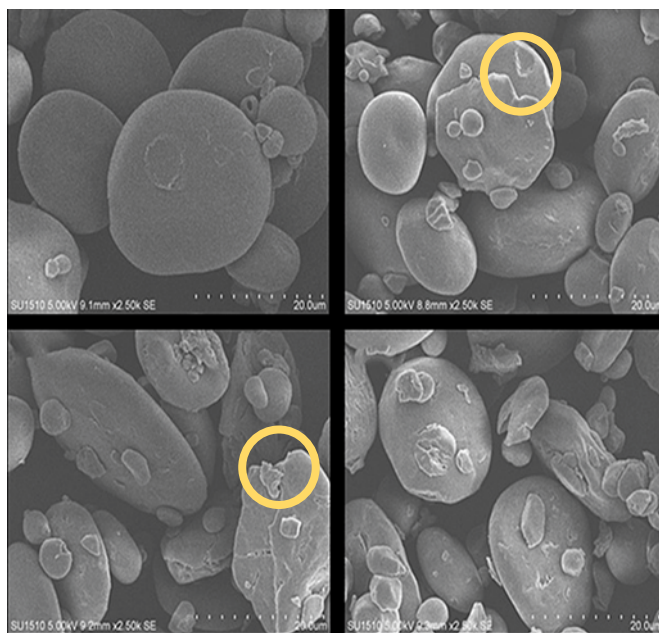
Rudzu miltu malšana, kā min Gomez et al. (2008), parasti norit, izmantojot valču tipa miltu dzirnavas, kurās tiek īstenota pakāpeniska grauda samalšanas sistēma (*gradual reduction system*, angļu val.). Vispirms graudi tiek attīrīti un kondicionēti, kam seko to sadalīšana, šķelšana un drupināšana, izmantojot secīgus valčus. Šajā procesā grauda ārējās daļas

pakāpeniski atdalās no endospermas, un iegūtās rupjās daļiņas tiek atkārtoti samaltas un sijātas, līdz tiek iegūti milti ar kontrolētu daļiņu izmēru un sastāvu. Šāda sistēma ļauj precīzi regulēt miltu šķiedrvielu saturu, frakciju proporcijas un miltu daļiņu izmēru (Colin & Bushuk, 2017).

Pilngraudu rudzu miltu ražošanā tiek izmantotas arī akmens tipa dzirnavas (*stone mills* vai *disk mills*, angļu val.), kur graudi tiek samalti starp diviem metāla vai abrazīva materiāla (akmens) diskiem. Šāds malšanas process ir intensīvāks un vienlaikus vienkāršāks, jo tas nenodala grauda frakcijas, bet samal visu graudu vienā solī, saglabājot visas sastāvdaļas – klijas, aleironu slāni, endospermu un dīgli. Diska dzirnavās iegūtiem miltiem parasti ir rupjāks malums, lielāks šķiedrvielu saturs un atšķirīgas tehnoloģiskās īpašības, kas var ietekmēt gan ūdens absorbciju, gan mīklas konsistenci un maizes apjomu.

Graudu malšanas process ietekmē miltu fizikāli-kīmiskās un tehnoloģiskās īpašības. Rupji maltos rudzu pilngraudu miltos cietes graudu lielums var svārstīties no 3–30 μm. Atšķirīgais cietes graudu lielums un amilozes un amilopektīna proporcija (1:3–1:4) būtiski ietekmē cietes klīsterizēšanās temperatūru un ūdens absorbcijas spēju.

Malšanas laikā daļa miltos esošās cietes graudu tiek šķelti, veidojot bojāto cieti (1.3. att.). Šādai cietei ir mainīta grauda struktūra un tas var mainīt tādas cietes īpašības kā klīsterizāciju, ūdens saistīšanas spēju, kā arī cietes pieejamību enzīmiem. Līdz 10% bojātās cietes var uzlabot miltu cepamīpašības un maizes kvalitāti, savukārt, pārāk liels bojātas cietes daudzums var izraisīt grūti apstrādājamu mīklu un lipīgu maizes mīkstumumu (Barrera et al., 2016; Wang et al., 2020). Šādiem šķeltiem, daļēji atvērtiem cietes graudiem ir lielāka ūdens saistīšanas spēja, un tie vieglāk pieejami enzīmiem. Bojātās cietes virsmas laukums ir lielāks, tajā ir kanāli un dobumi, kas atvieglo enzīmu piekļuvi, kuri cieti hidrolizē cukuros, īpaši palielinās maltozes un glikozes daudzums mīklā raudzēšanas laikā. Maltoze, kas veidojas amilāzēm hidrolizējot bojāto cieti, tiek uzskatīts par vissvarīgāko cukuru, kurš veicina plaucējuma un mīklas raudzēšanas procesu (Struyf et al., 2017).



1.3. att. **Bojātā ciete (attēlā dzeltenajā aplī) pēc miltu malšanas / Fig. 1.3. *Damaged Starch (Highlighted in the Yellow Circle) after Flour Milling*** (Wu et al., 2017)

Cietes klīsterizācijas process ir būtisks rudzu miltu plaucējuma pagatavošanā, jo šajā posmā milti tiek pakļauti ūdens iedarbībai paaugstinātā temperatūrā, kas izraisa cietes graudu uzbriecšanu un strukturālas izmaiņas. Rudzu miltu cietei ir salīdzinoši zema uzbriecšanas sākuma temperatūra 50–55 °C un maksimālā klīsterizēšanās temperatūra 63–68 °C (Stepniewska, Cacak-Pietrzak, 2021). Klīsterizācijas laikā veidojas ūdeņraža saites starp ūdeni un cietes

molekulām, cietes graudu kristāliskie reģioni tiek ietekmēti, kā rezultātā tiek izskāloti šķīstošie polisaharīdi (Donmez et al., 2021; Sluková et al., 2021; Verwimp et al., 2004).

Miltos esošās α -amilāzes un β -amilāzes hidrolizē klīsterizētu cieti, vispirms iedarbojoties uz bojātās cietes graudiem. α -amilāze hīdrolizē cieti par dekstrīniem un maltozi. Savukārt, β -amilāze atbrīvo maltozi no nereducējošiem cietes atlikumiem, veidojot glikozi.

Nepietiekama vai pārmērīga enzīmu aktivitāte, kā arī izteikta variācija starp graudu partiju īpašībām var apgrūtināt tehnoloģiskā procesa vadību un radīt nestabilus ražošanas rezultātus. Lai stabilizētu un prognozētu rudzu miltu īpašības plaucējuma un mīklas gatavošanas procesā, nepieciešama mērķtiecīga pieeja to līdzsvarošanai. Viena no iespējām ir nefermentēta rudzu iesala pievienošana, kas, atkarībā no tā diastātiskā spēka, ļauj precīzāk regulēt cietes hidrolīzes un cukuru veidošanās procesus, tādējādi uzlabojot plaucējuma tehnoloģiskās īpašības un galaprodukta kvalitāti. Šī pieeja ir nozīmīga mūsdienu ražošanas apstākļos, kur būtiski ir nodrošināt tehnoloģisko procesu atkārtojamību un stabilitāti.

1.2. Rudzu nefermentētais iesals / *Unfermented Rye Malt*

Rudzu nefermentētais iesals tiek gatavots no rudzu graudiem, tos mērcējot, aktivizējot dīgšanas procesu, tad dīdējot un pēc tam kaltējot un samaļot. Vispirms graudi tiek attīrīti, tad mērcēti ūdenī (12–18 °C). Mērcēšanas laiks var būt atšķirīgs (1–3 dienas). Svarīgi šajā posmā ir panākt vienmērīgu graudu mitruma palielināšanos visās grauda daļās, sasniedzot kopējo mitrumu 40–45%. Tālāk graudu dīdēšana var notikt gan speciālās dīdēšanas iekārtās, gan klājienā uz grīdas. Lai nodrošinātu veiksmīgu dīdēšanas procesu, būtiski ir ievērot optimālu temperatūras režīmu, kas atkarībā no iesalnīcas tehnoloģijas un telpas mitruma parasti ir 10–20°C. Tāpat nepieciešams uzturēt atbilstošu vides mitrumu un nodrošināt līdzsvarotu skābekļa un ogļskābās gāzes attiecību, kas ir svarīga graudu vielmaiņas procesiem (Bera et al., 2018; Wang et al., 2018). Iesala ražošanas noslēdzošais posms ir kaltēšana, kuras mērķis ir apturēt dīgšanas procesu, samazināt mitruma saturu, lai nodrošinātu produkta uzglabājamību, kā arī veidot tā organoleptiskās īpašības. Kaltēšana norisinās pakāpeniski – divos posmos – 1. posms kaltēšana 40–55 °C, kuras galvenais mērķis ir aizvadīt lielāko mitruma saturu, samazinot zaļiesala mitrumu no 40 līdz 20%. Tad seko otrais posms – kaltēšana 60–80 °C, svarīgi ir nepārsniegt temperatūras režīmu, lai enzīmi netiktu inaktivēti. Kaltēšanas laikā nepieciešams sasniegt materiāla mitrumu 4–7%. Pēc tam seko asnu/saknīšu atdalīšana, malšana un iepakošana. Rudzu nefermentētā iesala ražošanas tehnoloģiskā shēma attēlota 1.4. attēlā.



1.4. att. Rudzu nefermentētā iesala gatavošanas tehnoloģija / Fig. 1.4. *Technology for the Preparation of Unfermented Rye Malt* (Bera et al., 2018; Wang et al., 2018)

Optimāli dīgšanas apstākļi (temperatūra, skābeklis, dīgšanas ilgums, mitrums) ir ļoti svarīgi, lai veicinātu enzīmu sintēzi un iesalā aktivizētu un uzkrātu aktīvas amilāzes. Enzīmu aktivizēšana, uzkrāšana un endospermas modificēšana graudu diedzēšanas procesā ir iesalošanas pamatā. Iesala enzimatiskā aktivitāte tiek izmantota amilolītisko procesu aktivizēšanai un amilāžu aktivitātes koriģēšanai miltos ar augstu krišanas skaitli.

Rudzu iesala pievienošana, pateicoties tā augstajai enzīmu aktivitātei, īpaši α -amilāzei, nodrošina cietes hidrolīzi un cukuru – galvenokārt maltozes un glikozes – veidošanos plaucējuma un mīklas gatavošanas laikā. Šis process ir nozīmīgs rudzu plaucējumā, kur notiek cietes klīsterizācija un tai sekojošā hidrolīze enzīmu ietekmē, kā arī vidēja vai ilgstoša raudzēšana, kas ietekmē mīklas raudzēšanas procesu un galaprodukta kvalitāti (Vasyukova et al., 2020).

Rudzu iesalā esošajām α -amilāzēm un β -amilāzēm ir izšķiroša loma cietes sadalīšanās procesos plaucēšanas un raudzēšanas laikā, veicinot cukuru satura pieaugumu, kas nepieciešams gan mikrobiotas attīstībai, gan aromātisko savienojumu veidošanai (Balcerek et al., 2016).

Viens no iesala kvalitātes rādītājiem — diastātiskais spēks (DS) — raksturo rudzu iesala spēju hidrolizēt cieti līdz cukuriem, un to galvenokārt nosaka amilolītisko enzīmu aktivitāte. Rudzu iesalā nozīmīgākie enzīmi, kas veido diastātisko spēku, ir:

- α -amilāze – hidrolizē iekšējās α -(1→4) glikozīdu saites amilopektīnā un amilozē, veidojot dekstrīnus, maltozi un glikozi. Tā darbojas ātri un ir galvenais enzīms, kas ietekmē krišanas skaitli un cukuru veidošanos sākotnējā posmā;
- β -amilāze – hidrolizē cieti, atšķēlot maltozes vienības no cietes nereducējošā posma. Tās aktivitāte ir īpaši svarīga plaucējuma un mīklas raudzēšanas laikā, jo nodrošina maltozes uzkrāšanos.

Papildus arī limitdekstrināze (izoamilāze) – šķeļ α -(1→6) glikozīdu saites amilopektīna molekulās, kuras α - un β -amilāze nespēj šķelt. Tā nodrošina papildu cukuru veidošanos no sazarotajām cietes molekulām (Charmier et al., 2021).

Rudzu iesala diastātiskais spēks variē 120–450 °WK. Lielāks diastātiskais spēks iesalā nozīmē intensīvāku enzīmu darbību un palielina cukuru pieejamību plaucējuma un mīklas raudzēšanas laikā, uzlabojot garozas krāsu, garšu un mīkstuma struktūru. Tomēr, ja enzīmu aktivitāte ir pārāk liela – virs 400 °WK un rudzu miltu krišanas skaitlis zems – mazāks par 120 s, šī kombinācija var veidot lipīgu, glīzdainu rudzu maizes struktūru. Pretēji, zemāks diastātiskais spēks var radīt nepietiekamu cukura daudzumu, kas ietekmē raudzēšanas procesu un maizes īpašības (Hernández-Carapia et al., 2021; Hübner et al., 2010; Kunkulberga & Segliņš, 2010; Wang et al., 2018).

Iesala diastātisko spēku ietekmē gan šķirnes īpašības, gan vides faktori audzējot graudus, gan iesala gatavošanas tehnoloģiskie parametri (Hübner et al., 2010). Lai gan α -amilāze tiek sintezēta graudu aleirona slānī un tās daudzums ievērojami palielinās pirmajās dīgšanas aktivizācijas dienās, β -amilāze tiek uzskatīta par galveno enzīmu, kas ietekmē diastātisko spēku. Diastātiskā spēka noteikšana rudzu iesalā ir būtisks kvalitātes kontroles aspekts, lai iesalu var efektīvi un mērķēti izmantot maizes ražošanā. Tas palīdz maizniekiem izvēlēties piemērotu iesala devu, lai regulētu raudzēšanu un maizes kvalitāti.

Rudzu iesala diastātiskajam spēkam ir būtiska nozīme stabila un atkārtojama raudzēšanas procesa nodrošināšanā rudzu maizes plaucējuma gatavošanā. Diastātiskais spēks raksturo aktīvo amilolītisko enzīmu – galvenokārt α - un β -amilāzes – spēju šķelt cieti līdz cukuriem, kas ir būtiski mikrobiotas attīstībai, plaucējuma un mīklas raudzēšanas procesam. Enzīmu klātbūtne un aktivitāte ietekmē gan raudzēšanas dinamiku, gan arī maizes fizikāli-ķīmiskās īpašības, tostarp tilpumu, mīkstuma mitrumu un cietību, poru struktūru, kā arī cukura saturu. Vienlaikus šie procesi veicina maizes garšas, aromāta un struktūras veidošanos.

Tā kā rudzu iesala enzīmu aktivitāte un diastātiskais spēks (DS) var būtiski atšķirties atkarībā no iesala ražošanas apstākļiem, maizes ražošanas procesā ir svarīgi precīzi pielāgot

iesala daudzumu, lai nodrošinātu stabilu plaucējuma gatavošanas procesu un vienmērīgu gatavās maizes kvalitāti.

1.3. Rudzu plaucējums un tā raudzēšana / *Rye Flour Scald and its Fermentation*

Latvijā tradicionāli rudzu maizes gatavošanai izmanto plaucējumu. Plaucēšana ir sena metode, kur rudzu miltus sajauc ar karstu ūdeni – plaucē, tad dzesē, pievieno ieraugu un raudzē (Klava et al., 2023; Sarand et al., 2023). Plaucējuma gatavošanas un raudzēšanas laikā norisinās gan fizikāli-ķīmiskas, gan mikrobiotas radītas biokīmiskas pārmaiņas. Šajos procesos, mikrobiotas un enzīmu ietekmē, notiek ogļhidrātu, olbaltumvielu un lipīdu sadalīšanās un pārveidošanās, kas balstās uz kompleksu miltu sastāvdaļu, mikrobiotas un enzīmu mijiedarbību. Rezultātā veidojas plašs metabolītu spektrs, tostarp organiskās skābes, cukuri, aminoskābes un aromātiskie savienojumi, kas nosaka rudzu maizes raksturīgās īpašības – garšu, aromātu un struktūru.

1.3.1. Plaucējuma vedi un raksturojums / *Types and Characteristics of Scald*

Ir pazīstami vairāki plaucējuma veidi: nepārcukurots plaucējums, pārcukurots plaucējums un raudzēts plaucējums (Klupsaite et al., 2023; Parenti et al., 2019; Yamauchi et al., 2014). **Nepārcukurots plaucējums** tiek gatavots no miltiem un vāroša ūdens, nodrošinot cietes uzbriešanu un klīsterizāciju, tad strauji atdzesējot, neļauj pārcukuroties miltu amilolītisko enzīmu ietekmē. Klīsterizācijas temperatūra ir atkarīga no izmantojamo miltu īpašībām. Nepārcukurotu plaucējumu var iegūt sajaucot miltus ar ūdeni, nodrošinot temperatūru, kas ir augstāka par amilolītisko enzīmu aktivitātes optimālo temperatūru, tādējādi inaktivējot enzīmus. Šāda plaucējuma sastāvā ir augstāks atlikušās cietes saturs un zemāks cukuru daudzums, tāpēc tas rada mazāk piemērotu barības vidi mikroorganismiem un mazāku skābuma veidošanās potenciālu raudzēšanas laikā. Nepārcukurots plaucējums spēj saistīt un noturēt lielu ūdens daudzumu, pateicoties izveidotajām ūdeņraža saitēm starp ūdeni un cieti. Šāda ūdens saistīšanas spēja ir īpaši nozīmīga, jo tā palēnina ūdens iztvaikošanu no mīkstuma, uzlabo maizes mitruma noturību, palēnina cietēšanas procesu un pagarina maizes uzglabāšanas laiku (Yamauchi et al., 2014). Jānorāda, ka nepārcukurots plaucējums ir biežāk sastopams kviešu maizes tehnoloģijā, īpaši Rietumeiropā un Āzijas reģionā, kur to izmanto, lai uzlabotu mitruma noturību un mīkstuma elastību, nodrošinot šīs īpašības arī ilgstošas uzglabāšanas laikā. Savukārt, Ziemeļeiropas valstīs, tostarp Baltijā un īpaši Latvijā, tradicionālajā rudzu maizes gatavošanā dominē pārcukurota un raudzēta plaucējuma izmantošana.

Pārcukurots plaucējums veidojas klīsterizētas cietes hidrolīzes rezultātā. Tā var notikt miltos esošo enzīmu ietekmē vai pievienojot nefermentēto iesalu, lai veicinātu cietes hidrolīzes procesu. Aktīvās α -amilāzes un β -amilāzes hidrolizē cieti par cukuriem – galvenokārt maltozi, maltotriozu un glikozi. Šāds plaucējums kļūst mazāk viskozs, jo ciete tiek daļēji hidrolizēta. Pārcukurotajam plaucējumam ir zemāka ūdens saistīšanas spēja, līdz ar to mazāk ietekmē maizes mīkstuma struktūru, savukārt tajā ir augsts cukuru saturs, kas nodrošina labvēlīgu vidi pienskābes baktēriju un raugu attīstībai un darbībai, iespējams intensīvāks raudzēšanas process un maizes garšas un aromāta uzlabošanās caur organisko skābju un aromātisko metabolītu veidošanos. Šāds plaucējums ir piemērots, ja mērķis ir raudzēšanas procesa aktivizēšana, skābuma un aromāta attīstīšana.

Raudzējot pārcukurotu plaucējumu, iegūst **raudzētu plaucējumu**. Izmantojot karstu ūdeni, ir iespējams regulēt plaucējuma temperatūru un nodrošināt optimālus apstākļus cietes klīsterizācijai un amilāžu darbībai.

Plaucējuma gatavošanā izmantojot ūdeni ar temperatūru virs 90 °C, iespējams inaktivēt miltos esošo enzīmu darbību, ja to aktivitāte ir par augstu, kā arī samazināt miltos esošo mikroorganismu daudzumu (Li et al., 2022). Li et al. (2022) norāda, ka raugu, pienskābes baktēriju un pelējumu kolonijas veidojošo vienību skaits ievērojami samazinās, ja plaucējuma

temperatūra sasniedz 70 °C, savukārt pie 90 °C tas stabilizējas zemā līmenī ($<2 \log_{10}$ KVV g⁻¹). Tādēļ plaucējumam tiek pievienoti nepieciešamie mikroorganismi, lai nodrošinātu kontrolētu raudzēšanu. Plaucējumam ar augstu maltozes saturu ir nozīmīga loma kā barības vielu avotam raugiem un pienskābes baktērijām, veicinot to augšanu un raudzēšanas procesa intensifikāciju. Turklāt dekstrīni un maltoze veicina aromāta un garšas savienojumu veidošanos, kā arī piedalās Maijāra (*Maillard*, angļu val.) reakcijā, kā rezultāta veidojas brūna maizes garoza. Klīsterizēta ciete tiek izmantota gan kā gēls mīklas struktūras veidošanai (Parenti et al., 2019), gan arī kā substrāts mikroorganismu (pienskābes baktēriju un raugu) augšanai. Raudzēta plaucējuma gatavošanas shēma attēlota 1.5. attēlā.



1.5. att. **Plaucējuma gatavošanas shematiskais attēlojums /**
Fig. 1.5. Schematic Representation of Scald Preparation

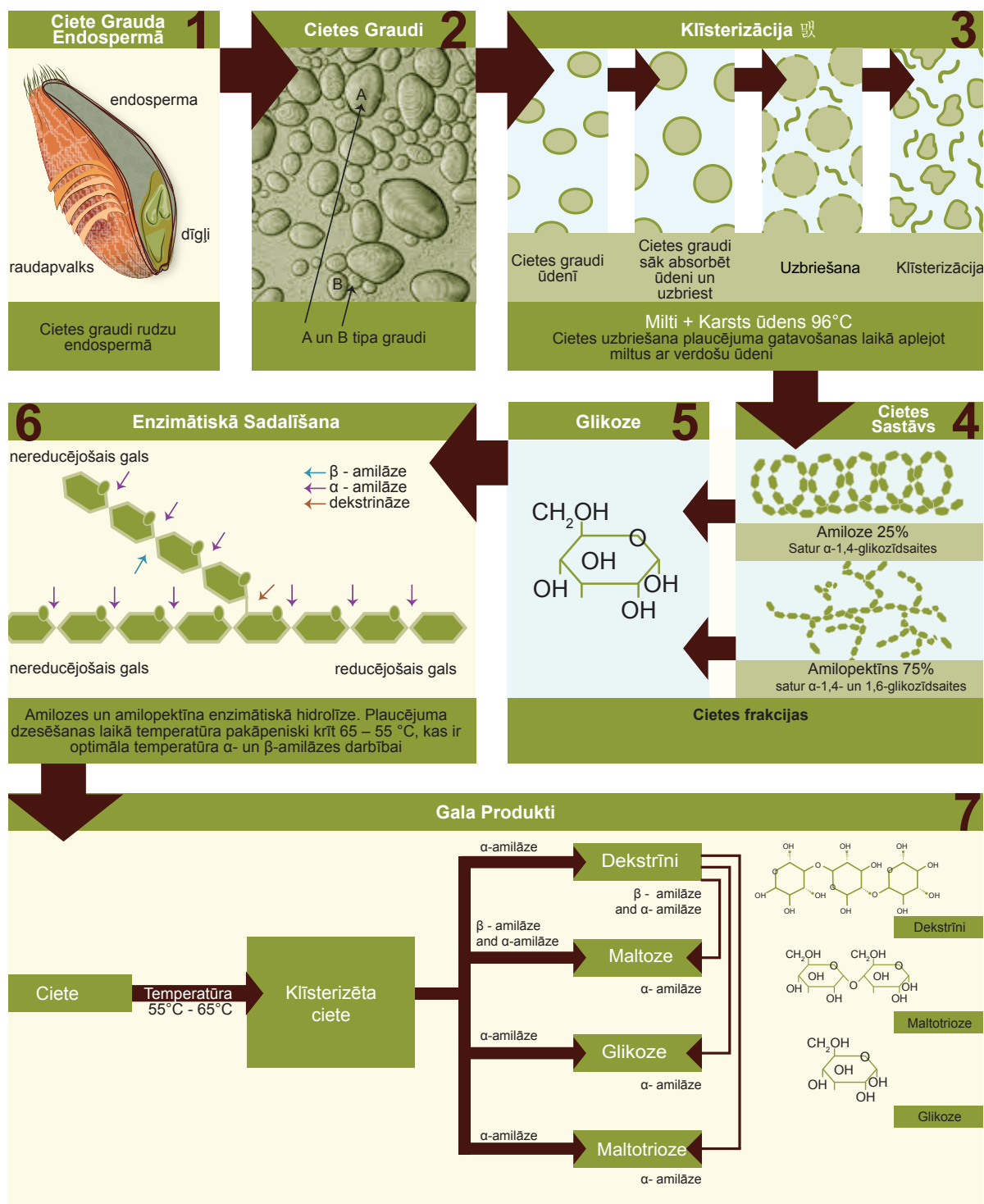
Klupsaite et al. (2023) pārcukurota plaucējuma raudzēšanai izmantoja *Lactiplantibacillus paracasei* pienskābes baktērijas, bet Kulp & Lorenz (2003) apraksta *L. plantarum*, *L. casei* un *L. brevis* lietošanu. Turpretī Zhou & Li (2021) pārcukurota plaucējuma raudzēšanai izmantoja *Saccharomyces cerevisiae*, *Wickerhamomyces anomalus*, *Torulaspora delbrueckii*. Pētnieki uzsver plaucējumu pozitīvo nozīmi garšas un uzglabāšanas īpašību uzlabošanai, kā arī tie palielinātu maizes valganumu un sakošļājamību (Sugiura et al., 2017). Vairāki pētnieki atzīmē raudzēta plaucējuma pozitīvo ietekmi uz akrilamīdu satura samazināšanos (Klupsaite et al., 2023). Neraugoties uz Baltijas valstu senajām tradīcijām izmantot raudzētu plaucējumu rudzu maizes gatavošanai (Sarand et al., 2023), šī tehnoloģija sastopama arī citās kultūrās, un ir atrodamai vairāki pētījumi, kuros tiek aktualizēta plaucēšanas ietekme uz mīklas un maizes īpašībām (Gao et al., 2018; Klupsaite et al., 2023; Zhou & Li, 2021).

Cietes klīsterizēšanās un miltu enzimatiskā aktivitāte ir vieni no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē mīklas īpašības, kā arī mikrobiotas vairošanos un metabolismu raudzēšanas laikā. Cietes hidrolīze un tā galaprodukti attēloti 1.6. attēlā.

Cukuru saturam miltos un mīklā ir ļoti liela nozīme raudzēšanas ātruma un intensitātes nodrošināšanai. Visbiežāk raudzēšanas procesā izmantotie cukuri ir glikoze, fruktoze, maltoze un saharoze (Struyf et al., 2016). Cukuru saturs miltos ir salīdzinoši neliels, tāpēc lielākais raudzēšanai nepieciešamais vienkāršo ogļhidrātu veidojas bojātās cietes enzimatiskās sadalīšanās laikā, ja papildus nepievieno, piemēram ar plaucējumu (Straumīte, 2006).

Cietes sadalīšanās rudzu plaucējuma gatavošanas un raudzēšanas laikā norisinās galvenokārt amilolītisko enzīmu – α-amilāzes un β-amilāzes – ietekmē. Šie enzīmi hidrolizē cietes polimēros esošās α-(1→4) un α-(1→6) glikozīdu saites, veidojot dažādus cukurus, piemēram, dekstrīnus, maltozi, glikozi un citus oligosaharīdus, kas kalpo par substrātu mikroorganismu metabolismam. α-amilāze iedarbojas uz iekšējām saistēm cietē, sadalot gan amilozes, gan amilopektīna ķēdes, veidojot īsākas struktūras – dekstrīnus un maltozi. Šīs reakcijas gaitā tiek atvērti nereducējošie cietes ķēdes gali, kurus tālāk šķel β-amilāze, pakāpeniski atbrīvojot maltozes vienības. Tādējādi α-amilāze tiek uzskatīta par ierobežojošo

faktoru cukuru veidošanās procesā, jo tā rada piekļūvi β -amilāzes turpmākajai darbībai. Abi enzīmi darbojas atšķirīgos apstākļos – α -amilāzes optimālais pH diapazons ir 5.4–6.0, un tās aktivitāte strauji samazinās, ja pH ir zem 4.5, savukārt β -amilāzei optimālais pH ir 4.5–5.5, un tā demonstrē lielāku stabilitāti skābākā vidē.



1.6. att. Cietes hidrolīze α - un β -amilāzes ietekmē un tās galaprodukti /

Fig. 1.6. Starch Hydrolysis Under the Influence of α - un β -Amylase and Its End Products

Raudzēšanas sākumā, kad pH ir aptuveni 5.5, dominē α -amilāzes aktivitāte, savukārt raudzēšanas laikā, pazeminoties pH, palielinās β -amilāzes loma, kas nodrošina maltozes veidošanos (Sinani et al., 2015). Enzīmu aktivitāte ir atkarīga arī no temperatūras – β -amilāze

ir visaktīvākā 60 līdz 65 °C temperatūrā, bet α -amilāze darbojas efektīvāk 72–74 °C temperatūrā (Balcerek et al., 2016).

Jo zemāka ir cietes klīsterizēšanās temperatūra, jo intensīvāk noris tās sadalīšanās, īpaši plaucējuma gatavošanas laikā (Kunkulberga, 1999). Rudzu nefermentētajam iesalam piemīt būtiski augstāka α -amilāzes un β -amilāzes aktivitāte nekā rudzu miltiem, jo iesala gatavošanas laikā notiek kontrolēta graudu dīgšana, kas aktivizē amilolītiskos enzīmus. α -amilāze ir atbildīga par cietes sadalīšanu līdz dekstrīniem, kurus tālāk hidrolizē β -amilāze, atbrīvojot maltozi (Hübner et al., 2010; Van Der Maarel et al., 2002). Šie cukuri kļūst par būtisku barības vielu avotu pienskābes baktērijām un raugiem raudzēšanas laikā (Hrušková et al., 2003). Lai gan β -amilāze ir sastopama arī rudzu miltos, tās aktivitāte parasti ir zemāka, salīdzinot ar α -amilāzi. Tādēļ, lai nodrošinātu nepieciešamo cukura daudzumu un uzlabotu raudzēšanas efektivitāti, plaucējumam bieži pievieno rudzu iesalu ar augstu diastātisko spēku. Šādā veidā iespējams labāk kontrolēt raudzēšanas procesus un nodrošināt stabilu un vienmērīgu rudzu maizes kvalitāti.

Cukuri, kas veidojas cietes hidrolīzes ceļā, kalpo ne vien kā barības vielas mikrobiotai (EFSA, 2012), bet arī ietekmē garšas veidošanos – var padarīt izteiksmīgāku maizes saldumu, kā arī veicina maizes garozas krāsas un garšas veidošanos.

1.3.2. Plaucējums – barības vide pienskābes baktērijām un raugiem / *Scald as a Substrate for Lactic Acid Bacteria and Yeasts*

Plaucējums nodrošina dažādas barības vielas, veicinot pienskābes baktēriju un raugu augšanu, kas veido izteiksmīgāku garšas un aromāta profilu. Plaucējumā esošo mikrobiotu veido miltos esošie un ar ieraugu pievienotie mikroorganismi, kuriem barības vide ir substrāts, kas veidojas pārcukurošanas laikā. Tomēr jāņem vērā tas, ka rudzu miltu mikrobiota var būt plaša, milti var saturēt gan vēlamos mikroorganismus, kā raugus un pienskābes baktērijas, tā arī nevēlamas mikroskopiskās sēnes un baktērijas (Cardoso et al., 2019). Lai nodrošinātu kontrolētu un paredzamu raudzēšanas procesu, plaucējumam pievieno ieraugu, kas var saturēt dažādu pienskābes baktēriju un raugu kvantitatīvo un kvalitatīvo sastāvu. Ieraugā var dominēt pienskābes baktērijas, kas nodrošina plaucējuma raudzēšanu, kā arī ieraugā var būt nozīmīga raugu klātbūtne, kas veicina mīklas irdināšanu. Plaucējuma raudzēšanai izmanto ieraugu ar tādu mikroorganismu sastāvu, kas nodrošina nepieciešamās plaucējuma īpašības. Organiskās skābes, kas veidojas pienskābes baktēriju metabolismā un samazina vides pH, rada nelabvēlīgu vidi nevēlamu baktēriju un mikroskopisko sēņu augšanai. Arī etanols, kas veidojas spirta rūgšanas laikā, var kavēt nevēlamo mikroorganismu attīstību.

Barības vielu pieejamība pienskābes baktērijām un raugiem tieši ietekmē raudzēšanas ātrumu. Palielinot pieejamo barības vielu daudzumu, palielinās arī raudzēšanas ātrums. Ja raudzēšanas laikā trūkst barības vielas mikroorganismiem, to metabolisms un vairošanās var būt palēnināta.

Plaucējuma raudzēšanas laikā veidojas plašs metabolītu klāsts. Šie metabolīti ietver ogļhidrātus, aminoskābes, organiskās skābes un gaistošus savienojumus. Metabolītu veidošanās ir atkarīga no klātesošo mikroorganismu veida, raudzēšanas temperatūras un laika un izmantoto miltu veida. Cukuru pieejamība ietekmē līdzsvaru starp pienskābes baktēriju un raugu aktivitāti raudzēšanas laikā, tieši ietekmējot gala produkta garšu un struktūru (Cardoso et al., 2019; Koj & Pejcz, 2023).

Pienskābes baktērijas ir dominējošie mikroorganismi, kuri nodrošina rudzu plaucējuma raudzēšanas procesu. Šim nolūkam pienskābes baktērijas raudzēšanas procesa laikā var izmantot miltos esošos ogļhidrātus, olbaltumvielas, vitamīnus. Raudzēšanas laikā pienskābes baktērijas var producēt dažādus metabolītus, piemēram, organiskās skābes, fenolus, eksopolisaharīdus, peptīdus, spirtus un bakteriocīnu, un tas atkarīgs no pienskābes baktēriju metabolisma (Gänzle, 2014).

Pienskābes baktērijas (PB) var iedalīt trīs grupās atkarībā no to metabolisma. Ir homofermentatīvās PB, kas cukurus pārvērš pienskābē. Otra grupa ir heterofermentatīvās PB, kuras papildus pienskābei producē arī etiķskābi, etanolu un oglekļa dioksīdu, un trešā grupa ir fakultatīvi heterofermentatīvās, kuru metabolīti var būt dažādas organiskās skābes tai skaitā etiķskābe. Tomēr ir svarīgi uzsvērt, ka bez šiem bāzes savienojumiem PB raudzēšanas laikā var veidot arī citus metabolītus (Leroy & De Vuyst, 2004).

Homofermentatīvās PB galvenokārt producē pienskābi kā vienīgo vai dominējošo metabolītu, īpaši anaerobos apstākļos ar pietiekamu cukuru pieejamību. Tomēr noteiktos apstākļos – piemēram, barības vielu ierobežojuma vai oksidējošas vides ietekmē – var veidoties arī neliels citu metabolītu daudzums, piemēram, acetāta, etanola, acetoīna un 2,3-butāndiola. Šī metabolisma elastība ir mazāk izteikta nekā heterofermentatīvajām baktērijām, bet tā tomēr pastāv noteiktām sugām (Kleerebezem & Hugenholtz, 2003).

Tas, kādus metabolītus producēs PB, būs atkarīgs no pienskābes baktēriju celma, mikroorganismu producētu enzīmu aktivitātes, gēnu ekspresijas un augšanas vides apstākļiem un tās sastāva (Khubber et al., 2022). Dažādas PB atkarībā no celma var producēt dažādus enzīmus, piemēram, peptidāzes un proteināzes (Rizzello et al., 2017). PB metabolīti izmaina arī plaucējuma fizikālās īpašības – noris cietes hidrolīze, kas samazina viskozitāti, eksopolisaharīdu (EPS) izdalīšana, kas potenciāli var palielināt viskozitāti. Turklāt, ilgāka raudzēšana samazina pH, kas pastiprina lipīdu un glikozīdu hidrolīzi, veidojot fenola savienojumus. Šiem ilgstošās raudzēšanas metabolītiem var būt antimikrobiālas un antioksidatīvas īpašības (Montemurro et al., 2019). Daži no bioaktīvajiem savienojumiem, ko rada PB raudzēšanas laikā, ir izturīgi pret augsto temperatūru cepšanas laikā, un tiem var būt pozitīva ietekme uz patērētāja veselību (Luti et al., 2020). PB augšanu raksturo baktēriju pielāgošanās posms (lag fāze), intensīvas vairošanās posms (eksponenciālā fāze), kas intensīvi izmanto barības vielas un izdala metabolītus. Pazeminoties pH, baktēriju vielmaiņas aktivitāte samazinās (stabilizācijas un stacionārā fāze) līdz PB augšana beidzas.

Raugi nodrošina rudzu mīklas irdināšanu, apjoma palielināšanos. Viens no galvenajiem rauga izdalītajiem metabolītiem rūgšanas laikā ir oglekļa dioksīds, kas nodrošina mīklas apjoma palielināšanos, raksturīgās struktūras veidošanos. Papildus veidojas etanols, kas var ietekmēt maizes garšu un aromātu. *Saccharomyces cerevisiae* ir visizplatītākā rauga suga, kas sastopama ieraugos un ko izmanto mīklas raudzēšanā (Arora et al., 2021). Tas ir fakultatīvi anaerobs mikroorganisms, kas var augt gan skābekļa klātbūtnē, gan bez tā. Šī suga ir pazīstama ar spēju producēt dažādus savienojumus, kas veido maizes garšu, tostarp esterus, augstākos spirtus un sēra savienojumus (De Vuyst et al., 2017).

Gaistošos savienojumus, piemēram, esterus, aldehīdus un ketonus, raudzēšanas laikā izdala gan PB, gan raugi. Šie savienojumi veicina maizes garšu un aromātu un ir atbildīgi par unikālās saldskābās garšas veidošanos.

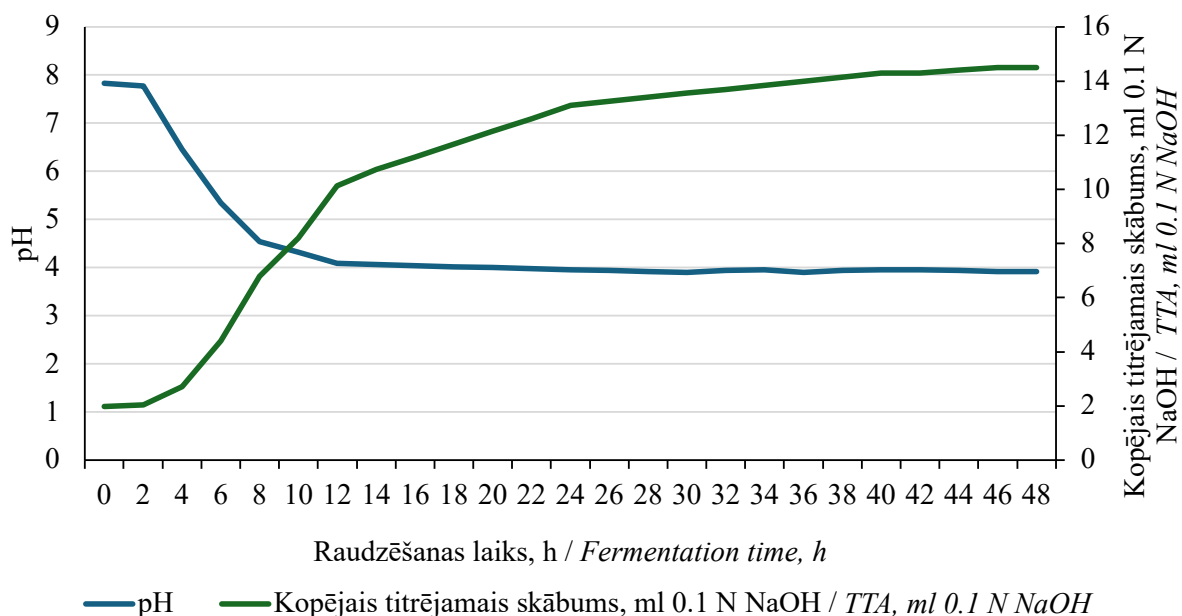
Plaucējuma raudzēšanas laikā vides pH būtiski ietekmē mikroorganismu daudzveidību un to augšanas dinamiku. Gänzle et al. (2007) pētījumā norādīts, ka ieraugos zemākā pH (apmēram 3.5) vairāk dominē un vairojas PB, savukārt vidē ar augstāku pH (apmēram 5.5) ir labvēlīgi apstākļi raugu augšanai un darbībai. Regulējot vides pH, iespējams ietekmēt esošo mikroorganismu veidu un skaitu. Skābā vide, ko rada PB, ietekmē gan raudzēšanas procesu, enzīmu darbību, gan maizes garšu, aromātu un apjomu. Raudzēšanas laikā veidojas pienskābe, etiķskābe un citas organiskās skābes, kas pazemina raudzētā plaucējuma pH un paaugstina kopējo titrējamo skābumu.

PB, kas atrodas ieraugā, ietekmē un nosaka, kādi metabolīti veidosies, kāds vides pH tiks sasniegts, kā arī būtiski ietekmē maizes garšu, aromātu un apjomu. Skāba vide ir svarīga, lai inaktivētu α -amilāzes darbību. Ja netiek pārtraukta α -amilāzes darbība, turpinās cietes hidrolīze, veidojas dekstrīni, kas var radīt pārāk mīkstu un ķepīgu maizes mīkstumu.

pH un kopējā titrējamā skābuma kontrolei ir izšķiroša nozīme plaucējuma raudzēšanas laikā, lai nodrošinātu konsekventu un paredzamu rezultātu. Van der Meulen et al. (2007) pētījumā konstatēts, ka pH kontrole raudzēšanas laikā nodrošina konsekventāku un

paredzamāku mīklas rūgšanu. pH un TTA iespējams kontrolēt, mainot pievienotā ierauga daudzumu, regulējot raudzēšanas temperatūru un laiku.

pH un kopējā titrējamā skābuma izmaiņas ir attēlotas 1.7. attēlā, kas veidots, balstoties uz autora praktisko pieredzi un veikto eksperimentālo mērījumu rezultātiem plaucējuma 48 h raudzēšanas laikā.



1.7. att. **pH un kopējā titrējamā skābuma izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā** /
Fig. 1.7. **Changes in pH and Total Titratable Acidity (TTA) During Scald Fermentation**

Raudzēšanas laikā izdalītajiem metabolītiem ir izšķiroša nozīme rudzu maizes kvalitātes nodrošināšanā. Līdzsvars starp organiskajām skābēm, spirtiem un citiem metabolītiem nosaka maizes garšu, aromātu un struktūru. Atsevišķu metabolītu, piemēram, etiķskābes un diacetila, klātbūtne veicina raksturīgo skābo garšu. Šo metabolītu trūkums var izraisīt maigu un nepievilcīgu maizes garšu. Izprotot skābuma ietekmi uz raudzēšanas procesu, maiznieki var veidot maizi ar īpašu, savām vēlmēm atbilstošu garšu un struktūru.

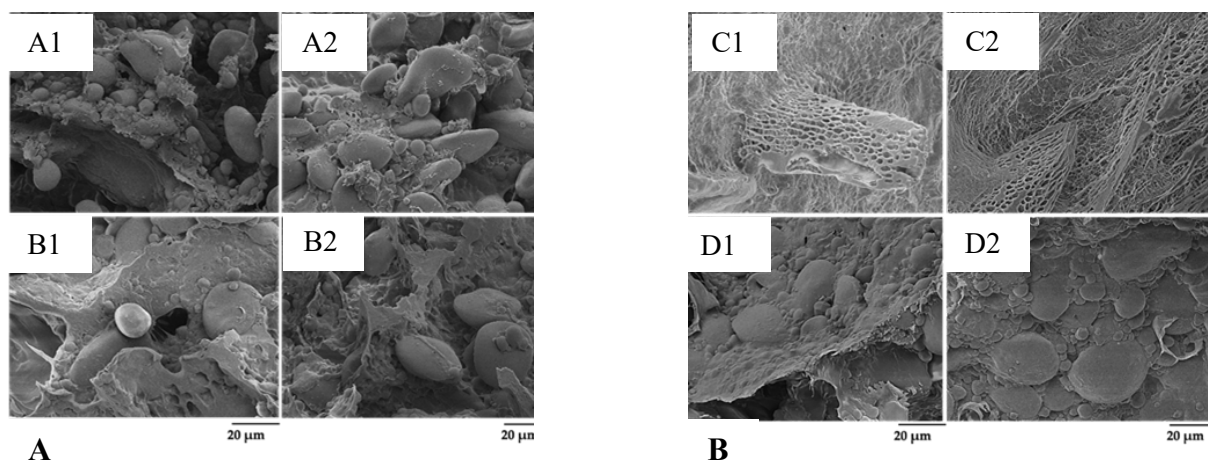
1.3.3. Raudzēta plaucējuma ietekme uz rudzu maizes fizikāli-ķīmiskajām īpašībām / *Effect of Fermented Scald on Physicochemical Properties of Rye Bread*

Lai gan nozīmīgu lomu spēlē tradīcijas, veselīguma aspekts, maizes garša, smarža un aromāts ir izšķirošais būtiskākais iemesls, ko patērētājs novērtē visvairāk. Rudzu maize, kas gatavota ar raudzētu rudzu plaucējumu, īpaši izceļas ar aromāta bagātību, garšu un struktūras īpašībām.

Raudzēta plaucējuma nozīme rudzu maizes struktūras veidošanā

Rudzu maizes struktūra ir vairāk plastiska un nav elastīga. Pārāk liels mīklas skābums var veicināt blīvu, neelastīgu maizes mīkstuma veidošanos, savukārt pārāk maza skābuma vidē var netikt apturēta enzīmu darbība, tāpēc turpina veidoties dekstrīni, un mīkstums kļūst ķepīgs. Skābuma līdzsvara atrašana un kontrolēšana ir izšķiroša ne vien gala produkta kvalitātei, bet arī garšas un aromāta īpašībām. Rudzu maizes skābuma regulēšanā ir nozīme raudzētam plaucējumam. Raudzētam plaucējumam ir nozīme arī mīklas un maizes mīkstuma struktūras veidošanā. Rudzu mīklā neveidojas lipekļa struktūra, tāpēc viens no veidiem, kā uzlabot rudzu mīklas un maizes struktūru, ir raudzēta plaucējuma izmantošana. Raudzēts plaucējums mīklā veido struktūru saistošu fāzi, kas aptver uzbriedušos cietes graudus.

Plaucējuma raudzēšanas laikā (24 h) tā kompleksā viskozitāte (Pa s) paliek nemainīga (Murniece et al., 2023). Tomēr plaucējuma pievienošana mīklai samazina tās zudumu moduļa (Pa) un kompleksās viskozitātes vērtības, salīdzinot ar mīklu bez pievienota plaucējuma. Tādējādi plaucējuma pievienošana atvieglo mīklas apstrādi. Raudzēta plaucējuma ietekme mīklas struktūrā pēc samīcīšanas un pēc 4 h raudzēšanas parādīta 1.8. att. Raudzēts plaucējums pozitīvi ietekmē arī rudzu maizes mīkstuma porainību un cietību (Murniece et al., 2023), kas varētu pozitīvi ietekmēt patērētāju sensoro vērtējumu.



1.8. att. Raudzēts plaucējums (24 h) mīklas struktūrā uzreiz pēc samīcīšanas (A) un pēc 4 h raudzēšanas (B) / Fig. 1.8. *Fermented Scald (24 h) in Dough Structure Immediately After Mixing (A) and After 4 Hours of Fermentation (B)* (Murniece et al., 2023)

A: A1 – A2 rudzu mīkla bez raudzēta plaucējuma uzreiz pēc mīcīšanas / rye dough without scalded rye flour after mixing; B1 – B2 rudzu mīkla ar raudzētu plaucējumu uzreiz pēc mīcīšanas / rye dough with scalded rye flour after mixing; B: C1 – C2 rudzu mīkla bez raudzēta plaucējuma pēc 4 h mīklas raudzēšanas / rye dough without scalded rye flour after 4 h fermentation; D1 – D2 rudzu mīkla ar raudzētu plaucējumu pēc 4 h raudzēšanas / rye dough with scalded rye flour after 4 h dough fermentation; palielinājums / magnification 2.5 k $\times$ (20 μ m).

Gao et al. (2018) pētīja termiskās apstrādes ietekmi uz rudzu un rudzu-kviešu miltu kvalitāti, veicot eksperimentus ar tvaicēšanu, augstas temperatūras un augstspiediena apstrādi (ekstrūziju). Pētījumā tika analizētas rudzu miltu un rudzu-kviešu miltu maisījuma mīklas reoloģiskās īpašības un tvaicētas maizes struktūras īpašības. Termiskā apstrāde palielināja viskozitāti. Tvaicēšana veicināja cietes graudu uzbrišanu, kas nodrošināja augstāku viskozitāti. Cietes graudi ar lielu uzbrišanas spēju uzņem vairāk ūdens un sakārtojas ciešāk – veido stabilāku gēla struktūru. Analizējot tvaicētu maizi, kas izgatavota no termiski apstrādāta rudzu-kviešu miltu maisījuma, konstatēja lielāku īpatnējo tilpumu, zemāku cietību un augstāku sensoro vērtējumu, kas liecina, ka rudzu miltu pievienošana kviešu miltiem veselīga produkta izstrādei ir iespējama, nekaitējot garšai un struktūrai.

Plaucējuma gatavošana un izmantošana mīklas un maizes gatavošanā var pozitīvi ietekmēt arī maizes uzglabāšanas laiku un kvalitāti. Klīsterizēta ciete nodrošina lēnāku maizes sacietēšanu, kas ir galvenais rudzu maizes derīguma termiņa samazināšanās iemesls.

Raudzēta plaucējuma ietekme uz rudzu maizes ķīmisko sastāvu

Raudzēšanas laikā plaucējumā un mīklā notiek vielu pārvērtības, kas ietekmē maizes ķīmisko sastāvu. Raudzējot gan ar PB, gan ar raugiem, kā vieni no savienojumiem ir gaistoši savienojumi, kuri būtiski ietekmē maizes sensorās īpašības. Skābes, kas veidojas raudzēšanas laikā, ietekmē un veido maizes garšu. PB galvenokārt producē pienskābi un etiķskābi, kas veido raksturīgo rudzu maizes saldskābo un nedaudz pikanto garšu (Pontonio et al., 2021). Pētījumā, ko veica De Vuyst un Neysens (2005), apstiprinājās, ka zemāks pH ieraugā izraisa izteikti skābāku maizes garšu. Tomēr organisko skābju veidošanos ietekmē gan pienskābes baktēriju īpašības, gan vides faktori (temperatūra, raudzēšanas ilgums) (Bartkiene et al., 2020). Līdzās

skābju kompozīcijai raudzēts plaucējums izmaina arī cukuru saturu un sastāvu maizē, bagātinot to ar cietes hidrolīzes produktiem – maltozi un glikozi un pienskābes baktēriju un raugu metabolītiem, kas veidojas raudzēšanas laikā, ietekmējot maizes sensoro vērtējumu.

Pētnieki secinājuši, ka maizes raudzēšanā samazinās fitīnskābes saturs, ko nodrošina rudzos esošās fitāzes, kā arī pienskābes baktēriju un raugu producētas fitāzes (Nuobarione et al., 2015). Graudaugos, arī rudzos minerālvielas (Zn, Fe, Ca) var veidot sāļus ar fitīnskābi, kas kavē minerālvielu uzsūkšanos organismā (Nielsen et al., 2007). Fitīnskābes formā uzkrājas fosfors, kas ir viena no svarīgākajām minerālvielām pārtikā, taču fitīnskābes formā tas nav izmantojams. Minerālvielu biopieejamības samazināšana ir galvenais iemesls, kāpēc fitīnskābe ir atzīta par vērā ņemamu anti-uzturvielu. Fitīnskābe koncentrējas dažādās grauda daļās, īpaši ārējās daļās, tostarp aleirona slānī, tāpēc fitīnskābes saturs ir augstāks pilngraudu produktos. Rudzi satur 1.8–6.3 mg g⁻¹ (sausnas) fitīnskābi (Mikulski & Klosowski, 2015).

Šķiedrvielu satura mainība tiek skaidrota ar bioķīmiskiem procesiem maizes gatavošanas laikā (Mihhalevski et al., 2013). Pienkābes baktēriju metabolisms būtiski ietekmē rudzu produktu FODMAPs saturu, tajā skaitā arī fruktānu saturu. Fruktāni ir ar fruktozi saistīti polisaharīdi, kas pieder FODMAPs grupas ogļhidrātiem un ir atrodami arī rudzu miltos un no tiem gatavotajos produktos. Rudzu maizē fruktānu saturs var būt ievērojams, un cilvēkiem ar kairinātas zarnas sindromu (IBS) šie savienojumi var radīt nepatīkamus simptomus. Pētījumi rāda, ka fermentācijas laikā fruktānu saturs rudzu mīklā var ievērojami samazināties, pateicoties pienskābes baktēriju spējai šķelt šos savienojumus, izmantojot specifiskus enzīmus.

Pejcz et al. (2020) uzsver, ka PB loma FODMAPs samazināšanā raudzēšanas laikā ir izšķiroša, īpaši sugām, kas spēj producēt fruktanāzes – enzīmus, kas hidrolizē fruktānu molekulas mazākos fragmentos, piemēram, fruktozē vai glikozē. Šie vienkāršākie cukuri tālāk tiek izmantoti PB metabolismā. Tiek minēts, ka tādas sugas kā *Lactobacillus delbrueckii*, *L. casei* un *L. crispatus* (Nyyssölä et al., 2020) demonstrē fruktanāzi izdalašu aktivitāti, kas palīdz samazināt fruktānu koncentrāciju mīklā (Nyyssölä et al., 2020), (Pejcz et al., 2020).

Maizes FODMAPs samazināšanas kontekstā tiek pētīta arī raudzēšanas laika ietekme (Koj & Pejcz, 2023). Rudzu mīklas raudzēšanā, izmantojot *L. plantarum* un *L. rhamnosus*, uzrādīja fruktānu satura samazināšanos. Piemēram, raudzēšanā izmantojot *L. plantarum*, fruktānu saturs pēc 24 stundām samazinājās no 3.67% līdz 1.97%, savukārt pēc 48 h raudzēšanas – līdz 1.05% sausnā (Koj & Pejcz, 2023). Koj un Pejcz pētījums liecina, ka raudzēšanas process var veicināt FODMAPs samazināšanos. Tomēr šis process ir atkarīgs no tādiem faktoriem kā izmantotie mikroorganismi, izmantotie raudzēšanas parametri un izejvielu īpašības (Borowska et al., 2023). Laatikainen et al. (2016, 2019) pētījumos tika vērtēta ietekme uz cilvēkiem ar kairinātas zarnas sindromu, lietojot rudzu maizi ar samazinātu FODMAPs saturu. Tika novērotas simptomu izmaiņas četru nedēļu periodā, kura laikā viņi patērēja gan standarta rudzu maizi, gan rudzu maizi ar zemu FODMAPs saturu. Rezultāti parādīja, ka indivīdiem, kuri ēda rupjmaizi ar zemu FODMAPs saturu, bija mazāk izteikts kairinātas zarnas sindroma (IBS) simptomi, tostarp samazinātas sāpes vēderā, mazāk krampju salīdzinot ar tiem, kuri lietoja parasto kontroles rudzu maizi (Laatikainen et al., 2016, 2019).

Pilngraudu produkti ir bagāti ar uzturvielām, īpaši šķiedrvielām, tie ir vērtīgi kā uztura sastāvdaļa, tomēr produktu izstrāde ar zemu FODMAPs ir kļuvusi par plašu un aktuālu jomu pārtikas zinātnē un rūpniecībā (Ispiryan et al., 2022). Rudzu miltos esošo FODMAPs izpētei ir liela nozīme, lai izprastu to ietekmi uz kuņģa-zarnu trakta diskomfortu un gremošanu, tādēļ gan pētniecībā, gan ražošanā tiek apskatītas iespējas samazināt FODMAPs saturu produktos (Molina-Infante et al., 2016).

Fruktānu degradācija ir atkarīga gan no baktēriju celmu specifikas, gan no raudzēšanas ilguma, pH un pieejamā substrāta veida. Tādēļ ilgstoša raudzēšana, īpaši ar PB dominējošu mikrobiotu, ir efektīvs veids, kā samazināt rudzu maizes FODMAPs saturu un uzlabot tās panesamību cilvēkiem ar funkcionāliem gremošanas traucējumiem.

Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības galvenokārt ietekmē cietes fizikāli-ķīmiskā struktūra, tostarp bojātās cietes īpatsvars, kā arī miltiem raksturīgā enzimatiskā aktivitāte, īpaši

amilolītisko enzīmu aktivitāte. Šīs īpašības veido pamatu tālākai mijiedarbībai ar rudzu nefermentēto iesalu, kas, pateicoties tā augstajam diastātiskajam spēkam, bagātina plaucējumu ar α - un β -amilāzēm, veicinot cukuru veidošanos. Tomēr, tā kā rudzu nefermentētā iesala enzīmu aktivitāte var būtiski atšķirties, tā pievienošana rada kompleksu iedarbību, kas ietekmē plaucējuma viskozitāti, raudzēšanas gaitu un substrāta pieejamību mikrobiotai.

Plaucējuma gatavošanas un raudzēšanas laikā notiek cietes klīsterizācija, enzīmu inducēta hidrolīze, pH izmaiņas un metabolītu veidošanās. Šīs norises tieši ietekmē plaucējuma tehnoloģiskās īpašības, raudzēšanas norisi un mikrobiotas sastāvu, kā arī veicina rudzu maizes raksturīgo aromātu, garšu, struktūru un sensorās īpašības.

Pieaugot interesei par pilngraudu produktiem, tostarp rudzu maizi un tās uzturvērtību, arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta raudzēšanas procesa ietekmes izpētei, jo ilgstoša raudzēšana var veicināt uztura biopieejamību. Tā piemēram, pienskābes baktēriju metabolisms spēj degradēt fruktānus un samazināt fitīnskābes saturu, tādējādi mazinot FODMAPs grupas ogļhidrātus un uzlabojot minerālvielu uzsūkšanos.

Tādēļ ir būtiski izvērtēt ilgstošas raudzēšanas ietekmi uz rudzu plaucējuma tehnoloģiskajām īpašībām, lai būtu iespējams veidot stabilu, atkārtojamu un efektīvi vadāmu ražošanas procesu, kas nodrošina gan produkta kvalitāti, gan ražošanas efektivitāti.

2. MATERIĀLI UN METODES / *MATERIALS AND METHODS*

2.1. Pētījuma norises laiks un vieta / *Time and Location of the Research*

Pētījums veikts no 2020. gada septembra līdz 2025. gada martam Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē. Paraugu gatavošana, krišanas skaitļa, maksimālās viskozitātes, kopējā titrējamā skābuma noteikšana, mikroorganismu skaita noteikšana, paraugu liofilizācija un samalšana veikta Pārtikas institūta laboratorijās. Testēšana veikta arī citās laboratorijās:

- cukuru profila noteikšana veikta Biotehnoloģiju zinātniskās laboratorijas Viedo tehnoloģiju nodaļā (VTN);
- fruktānu, fitīnskābes, amilāžu aktivitātes noteikšana, PB un raugu identifikācija veikta Pārtikas un fermentēšanas centrā Igaunijā (Center of Food and Fermentation Technologies TFTAK);
- Mixolab mērījumi rudzu miltiem veikti uzņēmuma Šopēna tehnoloģijas laboratorijās, (Chopin Technologies) Francijā;
- paraugu gatavošana un cepšana veikta maizes ceptuvē “Ķelmēni” (Gulbenes novads, Rankas pagasts, Latvija).

2.2. Pētījumā izmantotie materiāli / *Materials Used in the Research*

Rudzu milti

Pētījumā izmantoti trīs dažādi pilngraudu rudzu milti (rudzu milti) ar atšķirīgiem krišanas skaitļa (KS) rādītājiem. Rudzu miltu malšanai izmantoti rudzu graudi (šķirne 'Kaupo'), kas iegūti no z/s "Ķelmēni", Gulbene, Latvija, 2021. gada ražas. Rudzu graudi samalti z/s "Kaņepītes", Kocēnos, Latvijā 2022. gadā. Pēc malšanas rudzu milti tika uzglabāti 2 mēnešus, lai nodrošinātu to stabilizēšanos un nobriešanu. Šāds uzglabāšanas periods bija nepieciešams, lai mazinātu svaigi maltu miltu tehnoloģisko mainību un ļautu iestāties iekšējam fizikāli-ķīmiskajam līdzsvaram. Miltu daļiņu atlikums uz sietiem 450 μm – 87.66%, 250 μm – 47.52% un 160 μm – 28.91%. Iegūtais daudzums no katra miltu veida bija ~ 500 kg. Visi miltu paraugi tika uzglabāti austos polipropilēna maisos apkārtējās vides temperatūrā 22 ± 2 °C. Rudzu miltu kvalitātes rādītāji atspoguļoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula / *Table 2.1*

Rudzu miltu kvalitātes rādītāji / *Quality Indicators of Rye Flour*

Rudzu milti (kods) / <i>Rye flour (code)</i>	Krišanas skaitlis / <i>Falling number, s</i>	Mitruma saturs / <i>Moisture content, %</i>	Maksimālā viskozitāte / <i>Maximum viscosity,</i> BU
M1	210 $\pm$ 2	14.25 $\pm$ 0.03	466 $\pm$ 3
M2	262 $\pm$ 3	14.65 $\pm$ 0.03	504 $\pm$ 6
M3	346 $\pm$ 2	13.78 $\pm$ 0.02	1058 $\pm$ 2

Rudzu nefermentētais iesals

Pētījumā izmantoti pieci dažādi rudzu nefermentētie iesali ar atšķirīgiem diastātiskā spēka (DS) rādītājiem. Šī pētījuma veikšanai iesals tika saņemts no SIA “LATMALT”, “Valmju iesalnīca”, Jaunsvirlaukas pagasts, Jelgavas novads, Latvijā. Visi iesala paraugi tika uzglabāti slēgtos polipropilēna spaiņos apkārtējās vides temperatūrā 22 ± 2 °C. Saņemtais iesals daudzums 1.5 kg no katra iesala. Katra parauga mitruma saturs tika noteikts laboratorijā pētījuma laikā, pārējie kvalitātes rādītāji iegūti no kvalitātes sertifikāta.

Rudzu iesala kvalitātes rādītāji apkopoti 2.2. tabulā.

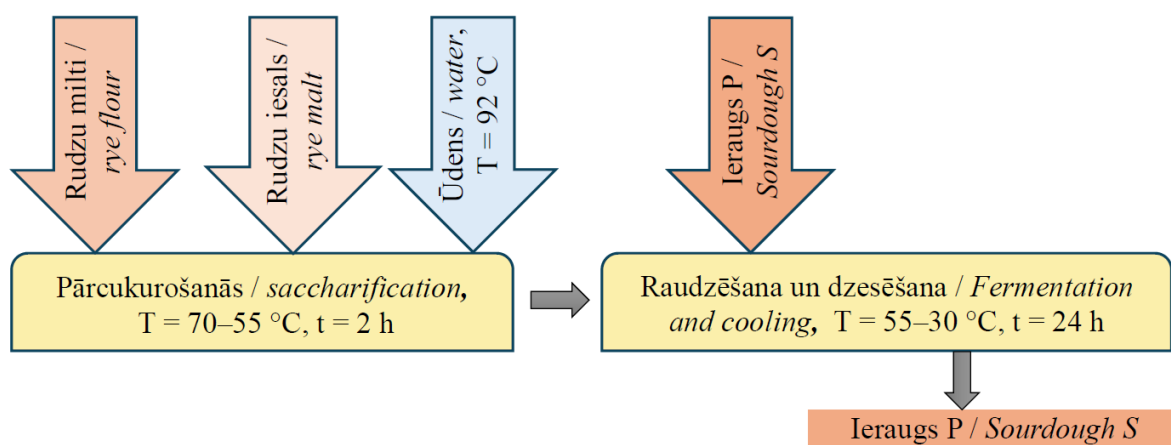
Rudzu nefermentētā iesala kvalitātes rādītāji /
Quality Indicators of Unfermented Rye Malt

Iesala kods / Malt code	Diastātiskais spēks / Diastatic power, °WK	Mitrums Moisture, %	Ekstraktvielu saturs sausnā / Extractives (dw), %	Krāsa / Colour EBC°	pH	Pārcukurošanās laiks / Saccharification time, min
I1	170	5.59 ± 0.02	79.6	5.4	6.22	12
I2	179	4.60 ± 0.01	81.4	5.2	6.27	12
I3	261	4.49 ± 0.03	82.2	5.2	6.23	10
I4	362	5.39 ± 0.03	82.6	5.3	6.29	10
I5	408	6.23 ± 0.02	83.4	5.2	6.25	10

Ieraugi

Ieraugs plaucējuma raudzēšanai (Ieraugs P)

Plaucējuma raudzēšanai izmantota 24 h raudzēta plaucējuma daļa (Ieraugs P), kas saņemta no maizes ceptuves “Ķelmēni”, Latvija. Ierauga atjaunošana ceptuvē tika veikta, ievērojot 2.1. attēlā attēloto shēmu.



2.1. att. Ierauga P atjaunošanas shēma / Fig. 2.1. Preparation Scheme of Sourdough S

Ierauga P gatavošanai tika sagatavots plaucējums, izmantojot rudzu miltus M2 un 1% nefermentēto iesalu I3. Pārcukurotais plaucējums tika raudzēts 24 stundas, un daļa no tā izmantota nākamajai raudzēšanai, nodrošinot ierauga stabilitāti.

Ieraugs mīklas raudzēšanai (Ieraugs M)

Ierauga P un Ierauga M kvalitātes rādītāji parādīti 2.3. tabulā.

Ieraugu kvalitātes rādītāji / Sourdough Quality Indicators

Ieraugs / Sourdough	PB log ₁₀ KVV g ⁻¹ / LAB log ₁₀ CFU g ⁻¹	Raugi log ₁₀ KVV g ⁻¹ / Yeasts log ₁₀ CFU g ⁻¹	pH	Kopējais titrējamais skābums / TTA, ml 0.1 N Na OH
Ieraugs P / Sourdough S	7.1 ± 0.5	2.6 ± 0.4	3.68 ± 0.01	14.5 ± 0.3
Ieraugs M / Sourdough D	9.3 ± 0.7	8.5 ± 0.2	3.88 ± 0.03	14.3 ± 0.1

Ieraugs mīklas raudzēšanai (Ieraugs M) tika saņemts no maizes ceptuves “Ķelmēni” mīklas gatavošanas dienā. Ieraugs M gatavots no iepriekšējā dienā gatavotās rudzu mīklas atliktās daļas, to saujaucot ar rudzu miltiem, rudzu plaucējumu (24 h raudzētu), raudzējot 4 h. Ierauga M mikrobiotas identifikācija tika veikta pētījuma II posmā.

2.3. Pētījuma struktūra un shēma / *Research Structure and Design*

Pētījuma struktūra veidota trīs posmos ar mērķi izvērtēt rudzu nefermentētā iesala ietekmi uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām, kā arī analizēt raudzēšanas laika ietekmi uz plaucējuma un gala produkta – rudzu maizes – īpašībām. Pētījuma shēma parādīta 2.4. tabulā.

2.4. tabula / *Table 2.4*

Pētījuma shēma / *Research Design*

I POSMS Rudzu nefermentētā iesala ietekmes izpēte uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / <i>STAGE I Investigation of the impact of unfermented rye malt on the physicochemical properties of rye flour</i>
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) / <i>STAGE II Evaluation of changes in microbiota and chemical composition after scald saccharification and prolonged fermentation (24–48 h)</i>
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 / <i>STAGE III Quality assessment of rye bread with scald fermented for different duration</i>
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 I posmā tika analizēta rudzu nefermentētā iesala enzīmu aktivitāte un izvērtēta tā kvantitatīvā un kvalitatīvā sastāva ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām. Šajā posmā iegūtie dati ļāva identificēt galvenos faktorus, kas ietekmē cietes hidrolīzes norisi un potenciāli nosaka cukuru veidošanās intensitāti, kas ir būtiska turpmākajiem raudzēšanas procesiem.

II posmā pētīta rudzu plaucējuma pārcukurošanās un ilgstošas raudzēšanas (24–48 h) procesa ietekme uz mikrobiotas dinamiku un metabolītu profilu. Detalizēti tika analizētas izmaiņas cukuru, organisko skābju, fitīnskābes un fruktānu saturā, tādējādi sniedzot visaptverošu priekšstatu par raudzēta plaucējuma lomu kā funkcionālai sastāvdaļai maizes ražošanā.

III posmā izvērtēta rudzu maizes kvalitāte, kas gatavota, izmantojot dažāda raudzēšanas laika plaucējumus. Tika veikta gan ķīmiskā analīze, gan sensorais novērtējums, nodrošinot iespēju sasaistīt pirmajos posmos iegūtās atziņas ar galaprodukta īpašībām un noteikt optimālos nosacījumus rudzu plaucējuma gatavošanai (raudzēšana).

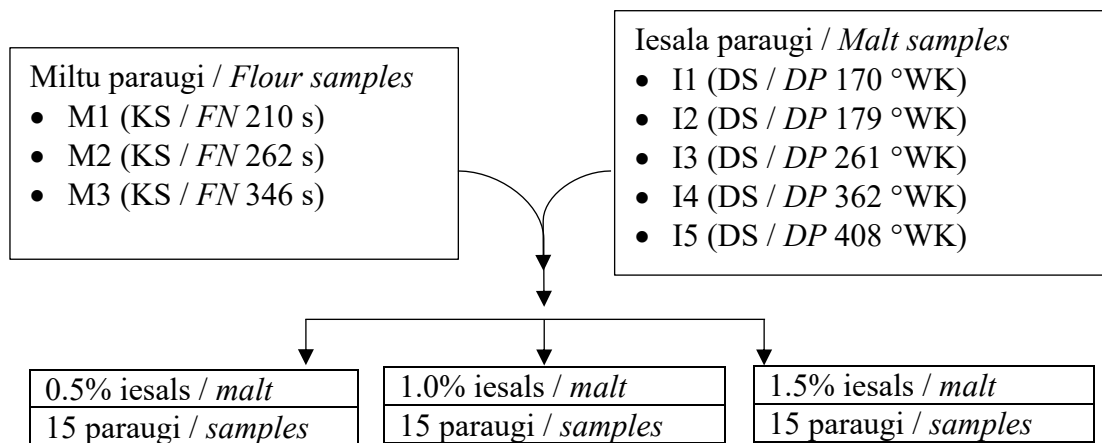
2.4. Pētījumā izmantoto paraugu sagatavošanas metodes / *Sample Preparation Methods Used in the Research*

Miltu-iesala paraugu sagatavošana nefermentētā iesala satura un aktivitātes ietekmes uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām izpētei

Lai pētītu iesala satura un DS ietekmi uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām, pētījuma I posmā sagatavoti rudzu miltu un iesala paraugi.

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-iesala paraugus sagatavo, sajaucot 1.5 kg rudzu miltu ar attiecīgo nefermentētā iesala paraugu. Iesals pievienots trīs dažādos daudzumos – 7.5 g (0.5%), 15 g (1.0%) un 22.5 g (1.5%). Lai nodrošinātu vienmērīgu sajaukšanos, tos maisa ar mīklas mīcīšanas iekārtu Teddy (A/S Varimixer, Brøndby, Denmark) 3 minūtes, 2. ātrums, 250 apgr. min⁻¹, pēc tam miltu-iesala paraugus izsijā caur sietu (750 µm). Paraugus uzglabā 2 l PP spaiņos ar vāku līdz analīžu veikšanai.



2.2 att. Miltu-iesala paraugu sagatavošanas shēma /
Fig. 2.2. Flour-malt samples mixing scheme

Savukārt rudzu miltu-iesala paraugi, kas tika izmantoti rudzu iesala satura un diastātiskā spēka (DS) ietekmes izpētei uz cukuru saturu pēc miltu cietes hidrolīzes un pēc 24 h raudzēšanas, paraugu kodi un pagatavošanai izmantotie daudzumi norādīti 2.5. tabulā.

Miltu-iesala paraugu gatavošanas parametri maisījumu sagatavošanai plaucējumu gatavošanai nefermentētā iesala ietekmes analizēšanai / Parameters for the Preparation of Flour-Malt Samples for Mixture for Scald Production to Analyze the Effect of Unfermented Malt

Izveidotā parauga kods / Created sample code	Rudzu milti / Rye flour	Miltu daudzums / Amount of flour, kg	Rudzu nefermentētais iesals / Unfermented rye malt	Pievienotais iesala daudzums / Amount of added malt, g	Pievienotā iesala proporcija / Percentage of added malt, %
RP0	M2	3	—	—	—
RP1	M2	3	I1	15	0.5
RP1	M2	3	I1	30	1.0
RP1	M2	3	I1	45	1.5
RP2	M2	3	I3	15	0.5
RP2	M2	3	I3	30	1.0
RP2	M2	3	I3	45	1.5
RP3	M2	3	I5	15	0.5
RP3	M2	3	I5	30	1.0
RP3	M2	3	I5	45	1.5

2.4.1. Raudzēta rudzu plaucējuma gatavošana / Preparation of Fermented Rye Scald

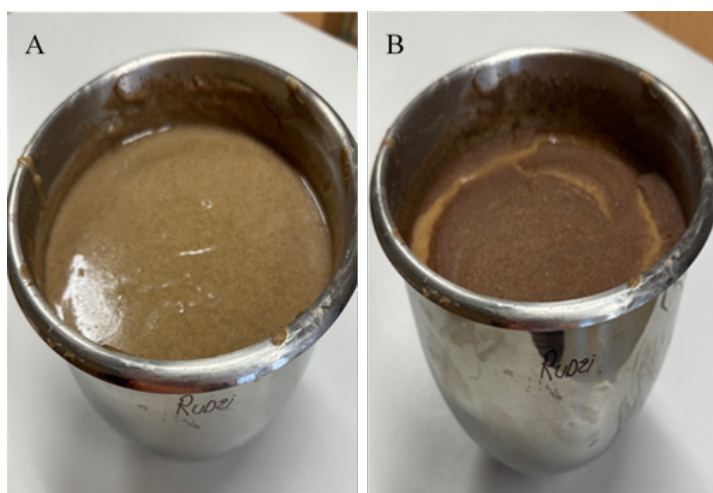
Plaucējuma gatavošana un raudzēšana pirmajā pētījuma daļā (I posms), kur tika analizēta nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām, notika saskaņā ar maizes ražošanā izmantotu tehnoloģiju, to pielāgojot laboratorijas apstākļiem. Lai pagatavotu plaucējumu, miltus un iesalu sajauc ar karstu ūdeni (92 ± 2 °C), izmantojot mīklas mīcīšanas iekārtu Teddy (A/S Varimixer, Brøndby, Denmark), 10 min., 2. ātrums, 150 apgr. min⁻¹. Izejvielu proporcija norādīta 2.6. tabulā. Ūdeni pievieno pakāpeniski – 3 piegājienos ik pēc 3 minūtēm, lai plaucējums veidotos viendabīgs un neatdzistu.

Plaucējuma sagatavošanai izmantotās izejvielas / Ingredients Used for Scald Preparation

Izejviela / Ingredient	Izejvielas / Ingredients, kg	Izejvielas plaucējuma gatavošanai / Ingredients for scald preparation, kg
Rudzu milti / Rye flour	100.0	1.400
Ūdens / Water	200.0	2.800
Iesals / Malt	0.0–1.5	0.000–0.021
Kopā / Total	300.0–301.5	4.200–4.221

Pārcukurošanas laikā plaucējumu iztur termostātā (klīmata 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% relatīvajā 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).



2.3. att. Rudzu plaucējums pēc pārcukurošanas (A) un 24 h raudzēšanas (B) laboratorijas apstākļos / Fig.2.3. Rye Flour Scald after Saccharification (A) and 24-hour Fermentation (B) under Laboratory Conditions

Gan pēc pārcukurošanas, gan pēc raudzēšanas fāzes tika ņemti plaucējuma paraugi (2.3. att.), daļa analizēta uzreiz (pH, kopējais titrējamais skābums), daļa tika sasaldēta un liofilizēta (skat. 2.4.3. nodaļu) tālākai analīžu veikšanai.

2.4.2. Raudzēta rudzu plaucējuma un maizes gatavošana ražošanas apstākļos / Preparation of Fermented Rye Flour Scald and Bread Under Production Conditions

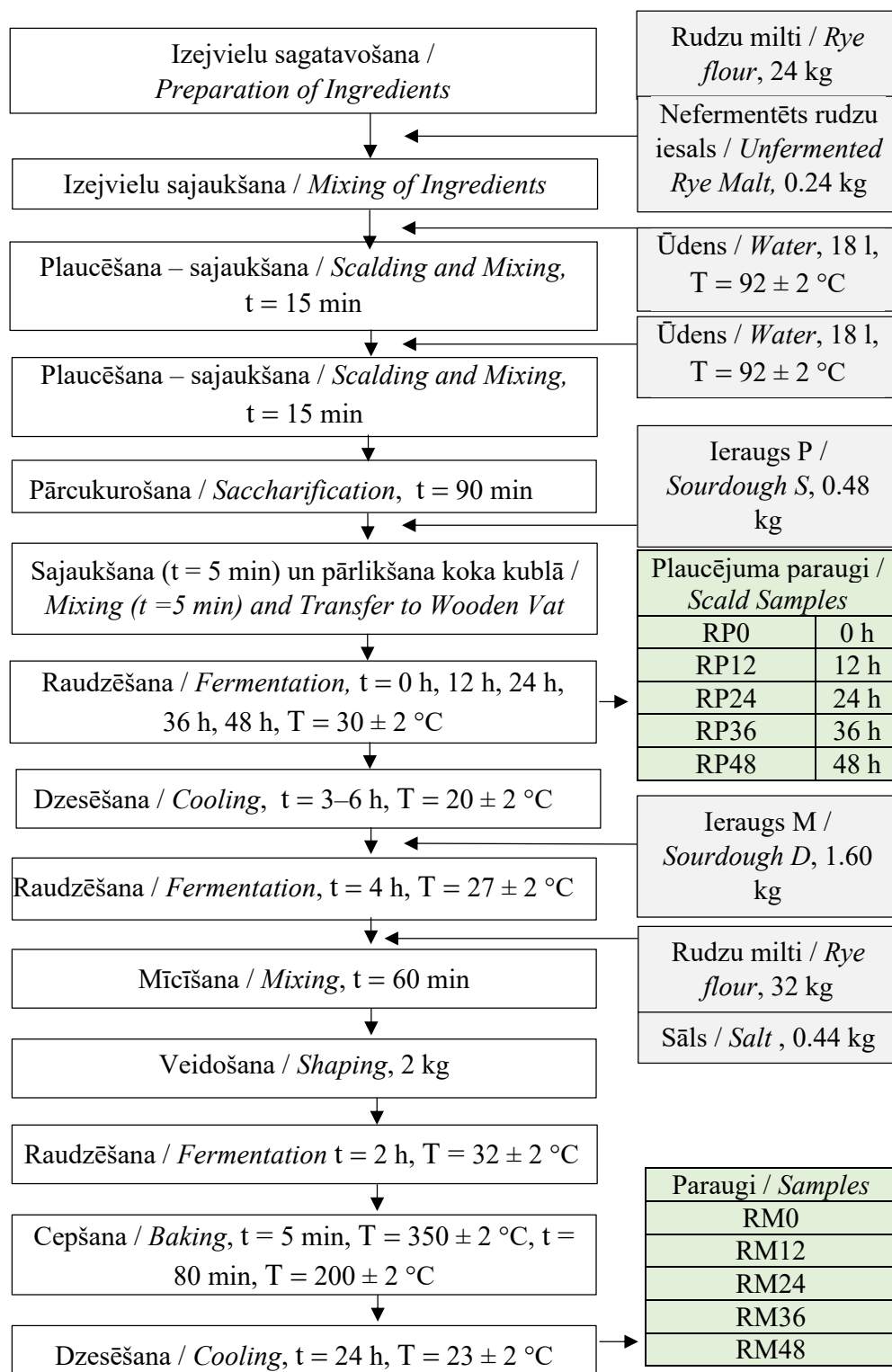
Balstoties uz pētījuma pirmā posma rezultātiem par rudzu nefermentētā iesala ietekmi uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām, turpmākajā pētījumā izvēlēts atbilstošākais miltu-iesala paraugs. Šis paraugs izmantots, lai analizētu raudzēšanas laika ietekmi uz rudzu plaucējuma un rudzu maizes fizikāli-ķīmiskajiem rādītājiem. Pētījuma II posmā rudzu plaucējumu un mīklas gatavošana saskaņā ar 2.7. tabulā norādīto receptūru un raudzēšana veikta maizes ceptuves “Ķelmēni” ražošanas telpās.

2.7. tabula / Table 2.7

Plaucējuma un mīklas gatavošanas receptūra / Recipe for Scald and Dough Preparation

Izejviela / Ingredient	Izejvielas plaucējuma gatavošanai / Ingredients for scald preparation, kg	Izejvielas mīklas gatavošanai / Ingredients for dough preparation, kg
Rudzu milti / Rye flour	24.00	32.00
Rudzu nefermentētais iesals / Unfermented rye scald	0.24	—
Ūdens / Water, (92 °C)	36.00	—
Ieraugs P / Sourdough S	0.48	—
Plaucējums / Scald	—	60.72
Ieraugs M / Sourdough D	—	1.60
Sāls / Salt	—	0.44
Kopā / Total	60.72	94.76

Tehnoloģiskā shēma rudzu plaucējuma un rudzu maizes gatavošanai parādīta 2.4. att.



2.4. att. Tehnoloģiskā shēma rudzu plaucējuma un rudzu maizes gatavošanai /
Fig. 2.4. Technological Scheme for Rye Scald and Rye Bread Preparation

RM0 – rudzu maize, kas gatavota ar neraudzētu plaucējumu (RP0); RM12 – rudzu maize, kas gatavota ar 12 h raudzētu plaucējumu (RP12); RM24 – rudzu maize, kas gatavota ar 24 h raudzētu plaucējumu (RP24); RM36 – rudzu maize, kas gatavota ar 36 h raudzētu plaucējumu (RP36); RM48 – rudzu maize, kas gatavota ar 48 h raudzētu plaucējumu (RP48) / RM0 – rye bread prepared with unfermented scald (RP0); rye bread prepared with scald fermented for varying durations: RM12 – 12 h, RM24 – 24 h, RM36 – 36 h, RM48 – 48 h fermented scald used.

Pētījuma II posmā pagatavo un izmanto piecus plaucējumus ar dažādu raudzēšanas laiku: 0 h (neraudzēts), 12 h, 24 h, 36 h un 48 h. Plaucējumu sagatavo, izmantojot rudzu miltus M2 (KS – 262 s) un rudzu nefermentēto iesalu I3 (DS – 261 °WK). Miltu-iesala paraugus sajauc ar karstu ūdeni (92 ± 2 °C) mīklas maisītājā (SP45, WP Kemper, Vācija, 1. ātrums, 120 apgr. min⁻¹) 30 minūtes zem vāka.

Pēc sajaukšanas plaucējumu atstāj zem noslēgta vāka, lai norisinātos pārcukurošanās – 90 minūtes, kuras laikā temperatūra pakāpeniski samazinājās no 75 ± 2 °C līdz 55 ± 2 °C. Šajā posmā notika intensīva cietes hidrolīze. Pēc pārcukurošanās, plaucējumam pievieno Ieraugu P, sajauc un pārlej apses koka kublā.

Detalizēta tehnoloģiskā shēma ir attēlota 2.4. attēlā. Pēc raudzēšanas analizē plaucējumu (pH un kopējais titrējamais skābums, pienskābes baktēriju un raugu kolonijas veidojošo vienību skaits). Pārējām analizēm paraugus sasaldē (-18 °C) un liofilizē, lai nodrošinātu paraugu stabilitāti.

Maizes gatavošanas metode

Mīklas gatavošanai izmanto visu iepriekš pagatavoto plaucējumu. Rudzu plaucējumam pievieno Ieraugu M (2.4. att.). Mīklu raudzē kontrolētos apstākļos 4 h, 27 ± 2 °C temperatūrā, mitrums 82%. Pēc tam pievieno rudzu miltus, sāli – mīklas gatavošanas receptūra norādīta 2.7. tabulā. Mīklas mīcīšanai izmanto mīklas mīcīšanas iekārtu (SP45, WP Kemper, Vācija, 1. ātrums, 120 apgr. min⁻¹), mīcīšanas ilgums – 60 min. Pēc tam mīklu sadala gabalos (2 ± 0.02 kg), veido klaipus un liek raudzēties 2 h 32 ± 2 °C temperatūrā un 80% relatīvajā mitrumā. Pēc raudzēšanas rudzu maizes kukuļus cep maizes ceptuves “Ķelmēni” klona krāsnī, kur kā apsildes veids tika izmantota elektrība. Cepšanas process notiek divos posmos: sākumā kukuļus apcep augstā temperatūrā – 350 ± 2 °C 5 min, pēc tam cepšana turpinās 80 min 200 ± 2 °C. Maizi cep līdz mīkstuma temperatūra klaipa vidū sasniedz 98 ± 1 °C. Maizes paraugu analizēšana notika 24 h pēc atdzesēšanas, daļu paraugu sasaldēja un liofilizēja vēlākai analīžu veikšanai.

2.4.3. Paraugu liofilizācija un sasmalcināšana / *Lyophilization and Grinding of Samples*

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).

2.5. Pētījumā izmantotās analītiskās metodes / *Analytical Methods Used in the Research*

2.5.1. Iesala diastātiskās aktivitātes noteikšanas metodes / *Methods for Determining the Diastatic Activity of Malt*

Rudzu miltu paraugu un nefermentētā iesala paraugu diastātiskās aktivitātes noteikšanai tika izmantoti Megazym komplekti (Megazyme Ireland Ltd).

α-amilāzes aktivitāte (izteikta Ceralpha vienībās, CU g⁻¹) tika noteikta, izmantojot Ceralpha metodi saskaņā ar AACC 22-02.01 (AACC, 2000c), savukārt β-amilāzes aktivitāte (izteikta Betamyl-3® vienībās, BU g⁻¹) tika noteikta, izmantojot BETAMYL-3® metodi. Enzīmu ekstrakcija un aktivitātes mērījumi tika veikti trīs paralēlos atkārtojumos, ievērojot ražotāja norādījumus, izmantojot BioTek Synergy H1 Multimode Reader (Agilent Technologies, Winooski, VT, ASV) pie 400 nm viļņa garuma.

2.5.2. Mikrobioloģisko rādītāju noteikšanas un mikroorganismu identifikācijas metodes / *Methods for Determining Microbiological Indicators and Identifying the Microorganisms*

Pienskābes baktēriju un raugu kolonijas veidojošo vienību noteikšana

Pienskābes baktēriju kolonijas veidojošo vienību skaita noteikšanu vienā gramā Ierauga P, Ierauga M, neraudzēta un raudzēta plaucējuma (KVV g⁻¹) veikta atbilstoši standartam ISO 15214 (ISO, 1998), bet raugu KVV skaitu vienā gramā atbilstoši – ISO 21527-1:2008 (ISO, 2008). Barotnes pienskābes baktēriju un raugu inkubēšanai sagatavotas atbilstoši ISO 11133-1:2009 (ISO, 2009). 10 g parauga izšķīdināja 90 ml sāls peptona šķīdumā, tad homogenizēja Bag Mixer 400W (Interscience, Francija) 3 min (7.ātrums). Paraugu suspensijas un decimālšķīdumu sagatavošanu veica atbilstoši ISO 6887-1:2017 (ISO, 2017). Pienskābes baktēriju KVV g⁻¹ noteikšanai neraudzētā plaucējumā un 12 h raudzēta plaucējuma gatavoja atšķaidījumu 10⁴, 10⁵, 10⁶, bet Ieraugā P, Ieraugā M, 24 h, 36 h un 48 h raudzēta plaucējuma analīzei – 10⁶, 10⁷, 10⁸. Raugu analizēšanai neraudzētā un 12 – 24 h raudzētā plaucējumā, Ieraugā P tika gatavots atšķaidījums 10², 10³, 10⁴, bet Ierauga M analīzei – 10⁶, 10⁷, 10⁸. Pienskābes baktērijas inkubētas anaerobi uz MRS (de Man, Rogosa, Sharpe, Biolife, Itālija) agara 72 h 37 ± 1 °C temperatūrā ar skābekļa absorbentu (GasPak EZ, Vācija). Raugus inkubēja uz iesala ekstrakta agara (Biolife, Itālija) 25 ± 1 °C 48 h. Inkubēšanu veica klimata kamerā Memmert IPP200 (Mettler, Vācija). Mikroorganismu skaitīšanu veica ar automātisko koloniju skaitītāju Scan 500 (Interscience, Francija). KVV aprēķināja atbilstoši ISO 7218 (ISO, 2024).

Pienskābes baktēriju un raugu identifikācija

Liofilizētiem Ierauga P, Ierauga M un raudzēta plaucējuma (24 h un 48 h) paraugiem mikroorganismu identifikācija veikta TFTAK centrā Igaunijā ar 16S rRNS gēnu reģiona un ITS sekvencēšanu, kā aprakstījuši Reidzane et al. (2021). Mikroorganismu identifikācija tika veikta, izmantojot diferenciālo centrifugēšanu, lai savāktu šūnas no liofilizēta parauga. DNS tika ekstrahēta ar Quick-DNA Fungal/Bacterial Miniprep Kit un tās koncentrācija noteikta ar Qubit™ 3.0 fluorometru.

gDNS paraugi tika sagatavoti sekvenēšanai, izmantojot V4 (F515/R806) praimeru pāri 16S metabārkodēšanai (Caporaso et al., 2011). Sekvenēšana veikta ar iSeq100 (Illumina) sistēmu, izmantojot iSeq Reagent Kit v2 (2 × 150 bp) un dubultā indeksa pieeju.

2.5.3. Fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes / *Methods for Determining Physicochemical Parameters*

Mitruma noteikšana

Mitrumu rudzu iesala un miltu paraugos noteica, izmantojot ekspress metodi ar mitruma analizatoru Precisa Gravimetrics AG (CH-Dietikon, Šveice) un izteica procentos no masas. Mērījumi tika veikti trīs atkārtojumos.

pH un kopējais titrējamais skābums

Raudzēta plaucējuma un maizes pH tika mērīts, izmantojot pH metru (Mettler Toledo, Vācija), saskaņā ar standarta metodi AACC 02-52:1999 (AACC, 2000b). Kopējā titrējamā skābuma analīze tika veikta, ievērojot AACC 02-31.01 standartu (AACC, 2000a), paraugus titrējot ar 0.1N NaOH fenolftaleīna klātbūtnē līdz rozā krāsai. Abi mērījumi veikti trīs atkārtojumos.

Krišanas skaitļa noteikšana

Metodes pamatā ir laika noteikšana, kas nepieciešams, lai virzulis nokristu noteiktā attālumā sakarsētā miltu un ūdens suspensijā. Visiem rudzu miltu un rudzu miltu-iesala paraugiem krišanas skaitļa (KS) noteikšana veikta, izmantojot standarta metodi

AACC 56-81.03 (AACC, 2000e), vienības izteiktas sekundēs. Visi mērījumi veikti trīs atkārtojumos.

Reoloģisko īpašību noteikšana rudzu miltu un rudzu miltu-iesala paraugiem

Rudzu miltu un rudzu miltu-iesala paraugiem reoloģiskās īpašības tika novērtētas ar amilogrāfu (Brabender Viscograph-E, Brabender GmbH & Co, Duisburg, Germany), izmantojot standarta metodi ICC – Nr.126/1 (ICC, 1992). Metode ir balstīta uz lēnu miltu un ūdens maisījuma sildīšanu, kuras laikā tiek mērīta cietes pretestība uzbriestot cietei un masai kļūstot viskozākai. Iegūtie rezultāti tiek atspoguļoti amilogrammā, kas apraksta cietes stāvokli pirms klīsterizācijas, klīsterizēšanās laikā un pēc klīsterizēšanās procesa. No amilogrammas grafika tika noteikta cietes klīsterizēšanās maksimālā temperatūra, kā arī maksimālā viskozitāte (BU). Visi mērījumi veikti divos atkārtojumos.

MixoLab tests

Metode ISO 17718:2013 (ISO, 2013). Ar MixoLab iekārtu tika veikta mīklas analizēšana mehāniskās apstrādes un termiskās iedarbības vidē, ko izmanto, lai novērtētu rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības. Analīze tiek veikta, lai raksturotu mīklas reoloģiskās īpašības, cietes īpašības, enzimatiskās īpašības, vienlaicīgi notiekot maisīšanai un temperatūras izmaiņām.

Rudzu miltu un miltu-iesala paraugu reoloģiskās īpašības tika noteiktas, izmantojot Mixolab 2 (CHOPIN Technologies, Villeneuve la Garenne, Francija) saskaņā ar Chopin+ protokolu atbilstoši ICC 173-1 (ICC, 2011). Analīzē tika iegūti vairāki būtiski parametri, kas raksturo mīklas īpašības dažādos temperatūras un mehāniskās iedarbības apstākļos (Sabovics et al., 2017).

- Ūdens absorbcija – norāda miltu spēju saistīt ūdeni un veidot optimālu mīklas konsistenci.
- C1 – Maksimālā konsistence 30 °C temperatūrā – raksturo sākotnējo mīklas struktūru un elastību, norāda rudzu miltu mīklas sākotnējo viskozitāti un ūdens saistīšanas spēju.
- C2 – Mīklas vājināšanās rādītājs – ataino spēju mīklai saglabāt struktūru karsēšanas laikā, C2 kritums rudzu miltos notiek sakarā ar enzīmu aktivitāti un šķīstošo polisaharīdu izmaiņām, kas ietekmē mīklas reoloģiju.
- C3 – Maksimālais griezes moments – raksturo cietes klīsterizēšanās procesu un tās spēju veidot viskozu struktūru. To ietekmē cietes īpašības un enzīmu aktivitāte.
- C4 raksturo klīsterizētas cietes noturību – spēju saglabāt struktūru augstā temperatūrā.
- C5 – Gala griezes moments – parāda, cik stingra un stabila kļūst mīkla pēc atdzišanas, atspoguļojot cietes retrogradācijas pakāpi.

Cukuru profila noteikšana

Cukuru veidi un saturs paraugos tika noteikts ar augsti efektīvo šķidrums hromatogrāfu (AEŠH, Waters Alliance HPLC system, model No. e2695, Waters Corporation, Milford, MA, ASV). Noteiktie cukuri bija ksiloze, arabinoze, fruktoze, glikoze, saharoze, maltoze.

Mono- un disaharīdu ekstrakcija no rudzu miltiem, rudzu nefermentētā iesala, rudzu plaucējuma un maizes paraugiem tika veikta, sildot paraugu līdz 60 °C 30 minūtes, kam sekoja ultraskaņas apstrāde ar 50 kHz frekvenci un 360 W jaudu 30 minūtes, 25 ± 1 °C temperatūrā, izmantojot ultraskaņas vannu (Ultrasons J.P. Selecta®, Barselona, Spānija), saskaņā ar Radenkovs et al. (2021) aprakstīto metodoloģiju. 1.0 g liofilizēta parauga ievieto 15 ml koniskā centrifūgas mēģenē (Sarstedt AG & Co. KG, Numbrecht, Vācija), kam pievieno 10 ml 50% acetoniitrila šķīduma ($\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{CN}$, v/v). Iegūto maisījumu intensīvi sajauc ar ZX3 virpuļmaisītāju (Velp® Scientifica, Usmate Velate, Itālija).

Pēc tam sagatavotie paraugi tika centrifugēti pie $4500 \text{ apgr. min}^{-1}$. ($3169 \times g$) 10 minūtes, 19 ± 2 °C temperatūrā, izmantojot Sigma 2-16KC centrifūgu (Osterode pie Harcas, Vācija), lai

atdalītu frakcijas. Iegūtā šķidrā fāze (*supernatant*, angļu val.) tika filtrēta caur hidrofilu politetrafluoretilēna (PTFE) membrānas filtru (CROMAFIL® Xtra H-PTFE), kura poru izmērs bija 0.45 µm (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren, Vācija). Cukuru saturs tika analizēts, izmantojot Shimadzu sērijas LC-20 augsti efektīvo šķidruma hromatogrāfu sistēmu, kas aprīkota ar detektoru RID-10A (Shimadzu Corporation, Tokija, Japāna). Hromatogrāfiskā atdalīšana tika veikta, izmantojot kolonnu Altima Amino (4.6 × 250 mm; 5 µm; Grace™, Kolumbija, MD, ASV). Kolonnas un plūsmas šūnas temperatūra tika uzturēta 30 °C. Izokrātiskā režīmā kā kustīgā fāze tika izmantots H₂O un MeCN maisījums (75:25, v/v). Kustīgās fāzes plūsmas ātrums bija 1 ml min⁻¹. Injekcijas tilpums bija 10 µl. Sistēmas kontrole, datu iegūšana, analīze un apstrāde tika veikta, izmantojot Empower 3 Chromatography Data Software versiju (build 3471) (Waters Corporation, Milford, MA, ASV). Visi mērījumi tika atkārtoti divos mērījumos.

Organisko skābju profila noteikšana plaucējuma un maizes paraugos

Organiskās skābes (skābeņskābe, vīnskābe, hinīnskābe, ābolskābe, askorbīnskābe, citronskābe, fumarīnskābe, dzintarskābe, pienskābe, etiķskābe un propionskābe) tika kvalitatīvi un kvantitatīvi noteiktas, izmantojot Shimadzu LC-20 Prominence augsti efektīvo šķidruma hromatogrāfu (AEŠH, Shimadzu Corporation, Kioto, Japāna) atbilstoši Murniece et al. (2025) aprakstītai metodei.

Paraugu sagatavošanai 0.5 g liofilizēta plaucējuma vai maizes parauga tika ievietoti 15 ml plastmasas koniskajās mēģenēs, pievienojot 10 ml destilēta ūdens. Maisījums tika 15 minūtes intensīvi maisīts ar VORTEX 3 maisītāju (IKA®, Staufen, Vācija), pēc tam centrifugēts 10 minūtes pie 10 000 × g (gravitācijas paātrinājums) un 19 ± 1 °C, izmantojot centrifūgu Pro-Research (Centurion Scientific Ltd., Stoughton, Apvienotā Karaliste), lai nodrošinātu frakciju atdalīšanu.

Pirms AEŠH analīzes, centrifugētais paraugs tika filtrēts caur 0.45 µm hidrofilu PTFE membrānas filtru (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Dueren, Vācija). Organiskās skābes tika atdalītas, izmantojot analītisko kolonnu YMC C18 (4.6 mm × 250 mm, 5 µm daļiņu izmērs). Kustīgā fāze sastāvēja no 0.05 M kālija dihidrogēnfosfāta buferšķīduma (KH₂PO₄, pH 2.8), kas pielāgots ar 80 – 90% fosforskābi (H₃PO₄, kas paredzēts AEŠH analīzēm), un 10 ml acetnitrila (ACN, kas paredzēts AEŠH analīzēm), atšķaidot līdz 1 l ar destilētu ūdeni. Analizēšana veikta 2 atkārtojumos, katrā atkārtojumā 3 mērījumi.

Fītiņskābes satura noteikšana paraugos

Fītiņskābes saturs noteikts, izmantojot Megazyme Phytic Acid Assay Kit (K-PHYT) (Megazyme Ltd., Wicklow, Īrija), ievērojot ražotāja protokolu.

Ekstrakts pagatavots, izmantojot 0.66 M HCl, pēc tam neitralizēts ar 0.75 M NaOH šķīdumu. Neitralizētajam ekstraktam tika pievienoti reaģenti un enzīmi (fītāze un sārmainā fosfatāze). Paraugi tika inkubēti ūdens peldē 40 °C temperatūrā, pēc katras enzīma pievienošanas 10–15 minūtes. Reakcija tika pārtraukta, pievienojot 50% trihloretīķskābi, un pēc centrifugēšanas iegūtais supernatants tika izmantots fosfora noteikšanai, pievienojot krāsu reaģentu un inkubējot 40 °C temperatūrā 1 h.

Mērījumi tika veikti trīs atkārtojumos, izmantojot BioTek Synergy H1 Multimode Reader (Agilent Technologies, Winooski, VT, ASV) pie 410 nm viļņa garuma.

Fruktānu satura noteikšana paraugos

Fruktānu saturs tika noteikts, izmantojot Megazyme Fructan Assay Kit (K-FRUC) (Megazyme Ltd., Wicklow, Īrija) saskaņā ar ražotāja protokolu (AACC metode 32-32.01 (AACC, 2000d)). Mērījumi tika veikti trīs atkārtojumos, izmantojot Helios Gamma spektrofotometru 9423 UVG 1202E (Thermo Electron Corporation, Waltham, MA, ASV) pie 655 nm viļņa garuma.

2.5.4. Maizes paraugu sensorā novērtēšana / *Sensory Evaluation of Bread Samples*

Lai noskaidrotu kā dažādi sagatavots plaucējums ietekmē rudzu maizes sensoro īpašību intensitāti, izmantota 12 cm Līniskala, saskaņā ar ISO 4121 (ISO, 2003). Rudzu maizes paraugiem tika novērtēta sensoro īpašību – aromāts, skābas un saldas garšas, mīkstumā lipīguma un miltainas pēcgaršas – intensitāte. 12 cm Līniskalā vērtējamo sensoro īpašību intensitātes raksturošanai izmantots sekojošs raksturojums:

- aromāts – 0 = nav sajūtams / neizteikts, 12 = ļoti izteikts;
- skāba garša – 0 = nav skābs, 12 = ļoti skābs;
- salda garša – 0 = nav salds, 12 = ļoti salds;
- lipīgums (raksturo maizes mīkstumā tendenci pielipt pie zobiem vai pirkstiem) – 0 = nav lipīga, 12 = ļoti lipīga, liekas, ka nav izcepta;
- miltainā pēcgarša – 0 = nav, 12 = ļoti izteikta miltainā pēcgarša.

Katrai dalībnieku grupai tika pasniegti kodēti rudzu maizes paraugi (trīs ciparu kodi), kas vienas sesijas laikā tika piedāvāti nejaušā secībā. Kā garšas neitralizētājs tika nodrošināts ūdens.

Sensorajā novērtēšanā piedalījās 47 dalībnieki, tostarp Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) Pārtikas institūta studenti un personāls, kuri pirms tam bija saņēmuši pamata apmācības sensorajā novērtēšanā. Visi dalībnieki tika informēti par pētījuma mērķi, sniedza piekrišanu un piedalījās brīvprātīgi. Tika nodrošināta dalībnieku konfidencialitāte, un jebkurā brīdī viņiem bija iespēja atteikties no dalības. Pētījumā tika iekļauti tikai veseli cilvēki, bez kviešu alerģijas un glutēna nepanesamības. Rudzu maizes sensorās analīzes pētījumu apstiprināja LBTU Pārtikas institūta Ētikas komisija (Lēmuma Nr. 2025/1).

Novērtējums tika veikts Pārtikas institūta Sensorās vērtēšanas laboratorijā, ievērojot ISO 8589 (ISO, 2007) standartu. Savāktie dati tika apkopoti un apstrādāti, izmantojot FIZZ Acquisition 2.51 programmatūru (Biosystems, Couteron, Francija).

2.5.5. Rezultātu statistiskās apstrādes metodes / *Methods for Statistical Data Analysis*

Iegūtie dati tika apkopoti un sākotnēji apstrādāti, izmantojot Microsoft Excel (versija 16.95.1), kur tika aprēķinātas vidējās vērtības un standartnovirzes. Datu analīze tika veikta, izmantojot R programmatūru (versija 4.4.0). Datu importam un post hoc analīzei R programmatūrā attiecīgi tika izmantoti readxl un multcompView pakešu rīki. Statistiskā nozīmība tika noteikta pie $p \leq 0.05$.

Dispersijas analīze (ANOVA) tika izmantota, lai novērtētu atšķirības starp datu kopām. Lai identificētu specifiskas datu kopu atšķirības, tika veikta Tukey's Honest Significant Difference (HSD) post hoc analīze.

Datu analīzei tika izmantoti vienkārši lineārie modeļi, lai izvērtētu iesala aktivitātes un iesala satura, kā arī to savstarpējās mijiedarbības ietekmi uz kritēriju KS atbilstoši eksperimenta plānojumam. Tā kā tika analizēti tikai daži iesala aktivitātes un satura līmeņi, šie mainīgie tika aplūkoti kā faktoriālā rakstura (neordināli).

Vispārīgā veidā izmantoto modeli izsaka šāds vienādojums (2.1):

$$j = \mu + F_i + C_j + F_i:C_j + \varepsilon, \quad (2.1.)$$

kur

F_i – fiksētais faktors, kas apzīmē iesala aktivitāti (faktoriāls, neordināls, trīs līmeņi);

C_j – fiksētais faktors, kas apzīmē rudzu iesala saturu (faktoriāls, neordināls, trīs līmeņi);

$F_i:C_j$ – abu fiksēto faktoru mijiedarbības efekts, kas ļauj novērtēt to individuālo ieguldījumu konsekvenci, kā arī attiecību linearitāti un sarežģītību;

ε – nejaušās kļūdas komponents.

Lai izvērtētu sakarību starp α -amilāzes un β -amilāzes aktivitātēm, kā arī Mixolab līknes rādītājiem, maksimālo viskozitāti, krišanas skaitli (KS) un cukuru saturu, tika veikta Pīrsona korelācijas analīze.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA / *RESULTS AND DISCUSSION*

Rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības lielā mērā nosaka cietes īpašības un miltos esošo enzīmu aktivitāte. Cietes graudu sastāvs un izmērs ietekmē ūdens saistīšanas spēju un klīsterizācijas temperatūru, bet amilozes un amilopektīna attiecība nosaka mīklas viskozitāti. Nozīmīga ir arī enzīmu – galvenokārt α -amilāzes un β -amilāzes – aktivitāte, kā arī šķiedrvielu (arabinoksilānu) un olbaltumvielu (albumīnu, globulīnu un sekalīnu) saturs un to spēja veidot mīklas un maizes struktūru. Rudzu maizes gatavošanas procesā ļoti nozīmīgi ir tehnoloģiskie posmi – plaucējuma gatavošana un tā raudzēšana ar ieraugu.

Plaucējuma gatavošanas laikā notiek cietes klīsterizācija un veidojas cukuri, savukārt, ierauga pievienošana un raudzēšana veicina organisko skābju veidošanos, kas ietekmē gan mīklas struktūru, gan gatavās maizes garšu un struktūru. Šajā procesā izveidojas miltu-ūdens sistēma ar trim fāzēm – cieto, šķidro un gāzveida fāzi. Cietajā fāzē ietilpst nehidrolizētā ciete, kas saglabā savu struktūru, līdz temperatūra pārsniedz klīsterizācijas sliekšni. Tad cietes graudos esošā daļēji kristāliskā struktūra sāk sadrupt, amiloze izdalās šķīdumā un uzbriest, absorbējot ūdeni. Šķidrā fāze sastāv no klīsterizētas cietes, ūdenī šķīstošajām šķiedrvielām (arabinoksilāniem, β -glikāniem), fruktāniem un denaturētiem proteīniem, kas kopā veido viskozu masu. Gāzveida fāzi veido mehāniski iekļautais gaiss un ūdens tvaiks, kas rodas plaucējuma sajaukšanas un atdzišanas laikā. Raudzēšanas procesā nelielā daudzumā veidojas arī oglekļa dioksīds (CO_2) un gaistoši aromātiskie savienojumi.

Šajā sistēmā enzīmi spēlē būtisku lomu – amilāzes katalizē cietes hidrolīzi, veicinot cukuru veidošanos, kas ir nepieciešami mikrobiotas attīstībai raudzēšanas procesā, kā arī aromāta un krāsas veidošanai maizē. Vienlaikus šķiedrvielas, piemēram, arabinoksilāni un β -glikāni, ietekmē ūdens saistīšanas spēju un viskozitātes rādītājus, nosakot mīklas reoloģiskās īpašības. Tādējādi plaucējuma sagatavošana un raudzēšana var nodrošināt optimālu cietes un šķiedrvielu mijiedarbību, kas tieši ietekmē galaprodukta kvalitāti, tā struktūru un garšas īpašības.

Enzimātiskās aktivitātes regulēšana plaucējuma pārcukurošanas laikā ir būtiska, lai nodrošinātu optimālu cietes sadalīšanos cukuros un veidotu labvēlīgu vidi ierauga mikrobiotas darbībai. Rudzu miltiem enzimātiskā aktivitāte, ko raksturo ar krišanas skatli, variē, tā var būt 120–350 s. Savukārt rudzu nefermentētajam iesalam enzimātiskā aktivitāte, ko raksturo ar diastātisko spēku, arī var variēt 170–450 °WK. Abu šo rādītāju izmaiņas nosaka agrotehniskie un graudu uzglabāšanas apstākļi, miltu ražošanas procesi un uzglabāšana. Nefermentētā iesala pievienošana plaucējuma gatavošanas laikā tiek izmantota, lai veicinātu pārcukurošanās procesu un cukuru veidošanos. Tā enzimātiskā aktivitāte nosaka, cik intensīvi notiek cietes šķelšanās un cik daudz cukuru rodas. Amilāzes sadala cieti cukuros, kas ir nepieciešami rauga un pienskābes baktēriju metabolismam. Pastiprinātas amilāžu aktivitātes rezultātā veidojas dekstrīni, kas padara maizes mīkstumu lipīgu un mitru. Lai nodrošinātu optimālu maizes struktūru, būtiska nozīme ir skābuma nodrošināšanai mīklā, ko panāk ar Ierauga P raudzētu plaucējumu. Skābuma veidošanos nodrošina ieraugā esošās pienskābes un etiķskābes baktērijas. Raudzēšanas laikā homofermentatīvās pienskābes baktērijas galvenokārt izmanto glikozi kā oglekļa avotu. Glikoze tiek metabolizēta caur glikolīzes ceļu, kur galvenais galaprodukts ir pienskābe (Gänzle, 2015). Papildus pienskābei nelielos daudzumos var veidoties arī citi metabolīti, piemēram, skudrskābe, etiķskābe un etanols.

Augstāks titrējamais skābums un zemāks pH samazina α - un β -amilāžu aktivitāti, tādējādi ierobežojot pārmērīgu cietes hidrolīzi un veicinot mīklas struktūras stabilitāti. Tas palīdz novērst lipīgu un mitru maizes mīkstumu, kas var rasties, ja cietes šķelšanās norit pārāk intensīvi. Līdz ar to ir būtiski sekot līdzi miltu un iesala kvalitātes rādītājiem, tos salāgot, lai iegūtu nemainīgu un vienmērīgu ražošanas procesu. Atbilstoša enzimātiskā aktivitāte veicina ne tikai labvēlīgu mikrobiotas attīstību plaucējumā un mīklā, bet arī nodrošina labu maizes struktūru un garšas īpašības.

Cietes hidrolīzes intensitāte tieši ietekmē plaucējuma viskozitāti – hidrolīzes gaitā samazinās klīsterizētās cietes daudzums, veidojas vienkāršākas struktūras savienojumi un līdz ar to mainās plaucējuma reoloģiskās īpašības. Viskozitāte savukārt ietekmē raudzēšanas procesa dinamiku, mikroorganismu aktivitāti, kā arī mīklas struktūru un mitruma noturību. Plaucējuma struktūra būtiski ietekmē gan maizes mīkstuma struktūru un porainību, gan arī gala produkta garšas īpašības. Praksē maizniekam ir iespēja pielāgot plaucējuma īpašības atbilstoši savam tehnoloģiskajam procesam – izmantojot dažādas viskozitātes plaucējumus, kā arī variējot to daļu attiecībā pret kopējo miltu daudzumu mīklā. Šāda pieeja ļauj individuāli kontrolēt ne tikai raudzēšanas gaitu, bet arī mīklas apstrādes īpašības un gatavās maizes kvalitāti. Līdz ar to plaucējuma viskozitāte kļūst par nozīmīgu parametru, kuru var ietekmēt, izmantojot iesala aktivitāti un pievienoto daudzumu.

Lai izvērtētu optimālu iesala lietošanas daudzumu, pirmajā pētījuma daļā tika apskatīti trīs pilngraudu rudzu miltu paraugi (RM1, RM2, RM3), ar plašu KS diapazonu (210–350 s), tiem pievienoti 5 dažādas aktivitātes iesali (DS 170–450 °WK), un to pievienošanas daudzums variēja 0.5–1.5%.

Diastātiskais spēks (mērvienība – °WK) raksturo rudzu nefermentētā iesala enzīmu, galvenokārt α - un β -amilāžu, aktivitāti. Tas norāda, cik intensīvi iesals spēj veicināt cietes hidrolīzi, ietekmējot cukuru daudzumu un plaucējuma raudzēšanas potenciālu. Šis parametrs tiek plaši izmantots iesala ražošanas nozarē, taču maizes ražošanā tas ir salīdzinoši maz pazīstams. Rudzu nefermentētā iesala diastātiskais spēks var atšķirties gan starp dažādiem ražotājiem, gan starp vienas ražotnes partijām. Tāpēc šim rādītājam ir vērts sekot līdzi arī ražošanas apstākļos – izvērtējot, kā tas ietekmē plaucējuma īpašības, maiznieks var pieņemt pamatotus lēmumus par iesala daudzuma pielāgošanu, lai nodrošinātu vienmērīgu raudzēšanas procesu un stabilu produkta kvalitāti.

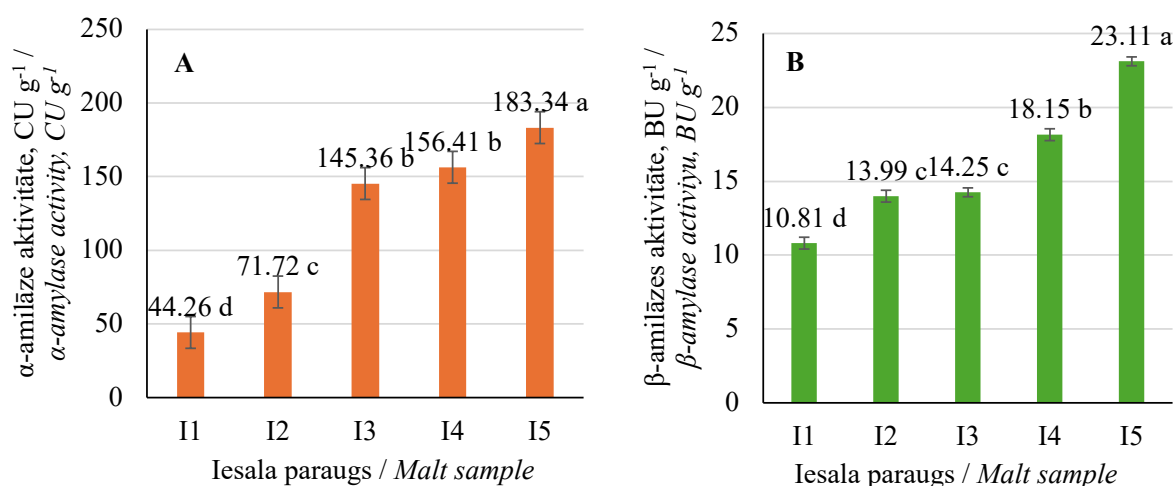
Līdztekus cietes hidrolīzes procesiem un nefermentētā iesala pievienošanas ietekmei uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām, šajā darbā īpaša uzmanība pievērsta arī plaucējuma raudzēšanas ilguma nozīmei. Raudzēšanas laiks ir viens no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē mikrobiotas attīstību, tās enzīmu aktivitāti un gala metabolītu veidošanos. Tas nosaka, cik efektīvi norisinās cukuru pārveide, organisko skābju uzkrāšanās un savienojumu kā fitīnskābes un fruktānu noārdīšanās. Šīs izmaiņas tieši ietekmē ne tikai mīklas īpašības, bet arī maizes garšas profilu, struktūru, uzturvērtību un uzturvielu biopieejamību.

Padziļināta raudzēšanas laika ietekmes izpēte ļauj noteikt optimālo ilgumu, kas nodrošina plaucējuma bioķīmisko stabilitāti un vienlaikus saglabā pozitīvu ietekmi uz galaprodukta kvalitāti. Stabils plaucējums sniedz iespēju nodrošināt nepārtrauktu, vadāmu un efektīvu ražošanas procesu, kas īpaši svarīgi ilgstošā rudzu maizes gatavošanas ciklā. Turklāt tas ļauj ražotājam elastīgi pielāgoties mainīgam pieprasījumam un ražošanas apjomiem, nezaudējot produkta kvalitāti vai ražošanas efektivitāti. Tādējādi raudzēšanas ilguma ietekmes izpēte ir ne tikai zinātniski pamatots, bet arī praktiski nozīmīgs solis rudzu maizes tehnoloģijas pilnveidē.

3.1. Rudzu nefermentētā iesala ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / *Effect of Rye Unfermented Malt on the Technological Properties of Rye Flour*

3.1.1. Rudzu nefermentēto iesalu aktivitātes raksturojums / *Characterization of the Activity of Unfermented Rye Malt*

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 (3.1.A att.). Savukārt β -amilāzes aktivitāte dažādos iesala paraugos variēja no 10.81 līdz 23.11 BU g⁻¹ (3.1.B att.).



3.1. att. α -Amilāzes (A) and β -amilāzes (B) aktivitāte rudzu nefermentētā iesala paraugos ar dažādu diastātisko spēku / Fig. 3.1. α -Amylase (A) and β -Amylase (B) Activity in Rye Unfermented Malt Samples with Different Diastatic Power

CU – Ceralpha vienības vienā gramā parauga / Ceralpha units per gram of sample. BU g⁻¹ – Betamyl-3® vienības vienā gramā parauga / Betamyl-3® units per gram of sample.

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.

Kolonnas norāda uz vidējām vērtībām starp trīs atkārtojumiem, ticamības intervāls 95%, atšķirīgie burti (a–d) norāda uz būtiskām ($p \leq 0.05$) atšķirībām starp paraugiem. / Bars represent the mean value of three replicates; error bars represent the 95% confidence interval. Different letters (a–d) on the bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Kopumā tika novērota cieša korelācija starp α -amilāzes aktivitāti un iesala diastātisko spēku ($r = 0.87$), taču starp I3 un I4 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 I2 un I3 iesala paraugiem β -amilāzes aktivitāte būtiski neatšķīrās. Cieša korelācija apstiprina DS kā raksturojošu lielumu rudzu nefermentētā iesala kombinētajai enzimatiskajai aktivitātei. Dīģšanas process iesala gatavošanas laikā veicina šo hidrolītisko enzīmu sintēzi un aktivāciju, un to optimālu aktivitāti būtiski ietekmē tādi faktori kā temperatūra, mitruma saturs un dīģšanas laiks (Hernández-Carapia et al., 2021; Ofoedu et al., 2022). Iesals ar augstāku diastātisko spēku liecina par optimāliem iesala gatavošanas apstākļiem, kas veicina spēcīga enzīmu profila attīstību, nodrošinot efektīvu cietes hidrolīzi. 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.

3.1.2. Iesala saturs un aktivitātes ietekme uz rudzu miltu tehnoloģiskajām īpašībām / Effect of Malt Content and Activity on the Technological Properties of Rye Flour

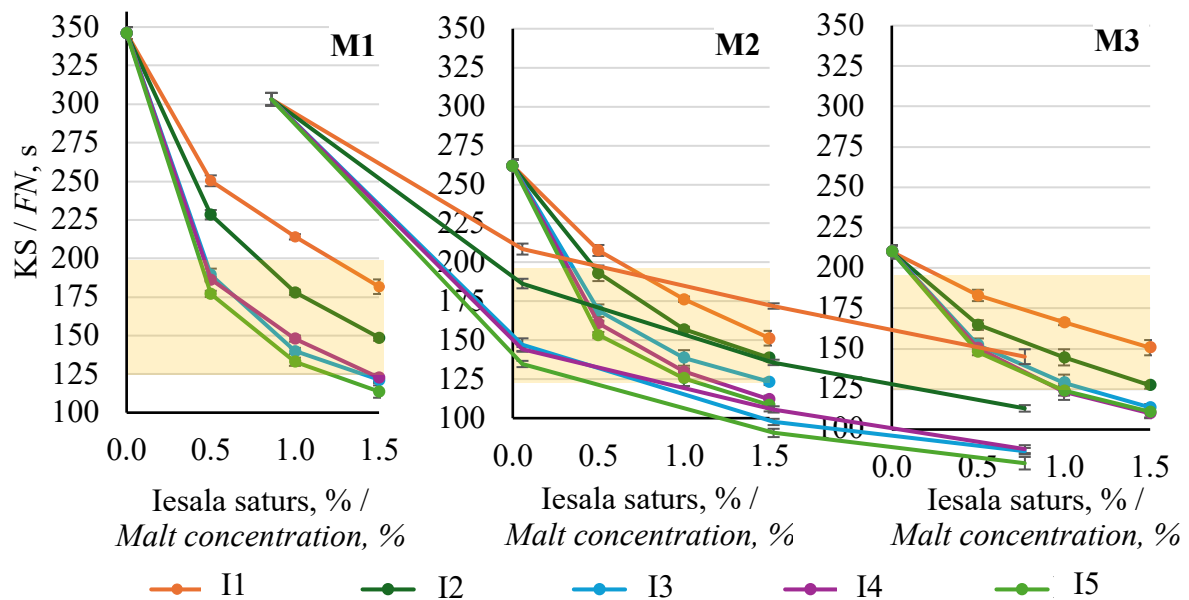
Pētījumā tika analizēti rudzu miltu paraugi ar plašu KS amplitūdu (346–210 s), tiem pievienojot rudzu nefermentēto iesalu ar dažādu diastātisko spēku (DS 170–408 °WK), variējot ar pievienotā iesala saturu (0.5, 1.0, 1.5%). Analizējot krišanas skaitli, amilogrāfa noteikto maksimālo viskozitāti un Mixolab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

savukārt M3 labāk nekā M2 priekšstatu par miltu olbaltumvielu un cietes uzvedību, analizējot miltas maisīšanas stabilitāti, klusterizāciju, enzīmu aktivitāti un cietes retrogradāciju.

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. Optimālais KS diapazons (125–200 s) nodrošina līdzsvarotu enzīmu aktivitāti, kas tālāk nosaka procesa stabilitāti rudzu plaucējuma gatavošanā un ražošanu (Stepniewska et al., 2021).

Rudzu miltu krišanas skaitļa (KS) izmaiņas, atkarībā no dažāda diastātiskā spēka un satura rudzu nefermentētā iesala pievienošanas, ir attēlotas 3.2. attēlā. Iesala pievienošana konsekventi samazināja rudzu miltu KS, un šis samazinājums bija izteiktāks palielinoties iesala diastātiskajam spēkam un saturam. Šī tendence norādīja uz saistību starp pastiprinātu enzīmu aktivitāti, kas paātrina cietes hidrolīzes procesu. Jo lielāks ir pievienotā iesala diastātiskais spēks un daudzums, jo intensīvāk darbojas amolītiskie enzīmi un intensīvāk notiek cietes hidrolīzes process. Rezultātā samazinās cietes saturs, kas spēj noturēt viskozitāti, un līdz ar to arī samazinās krišanas skaitļa vērtība.



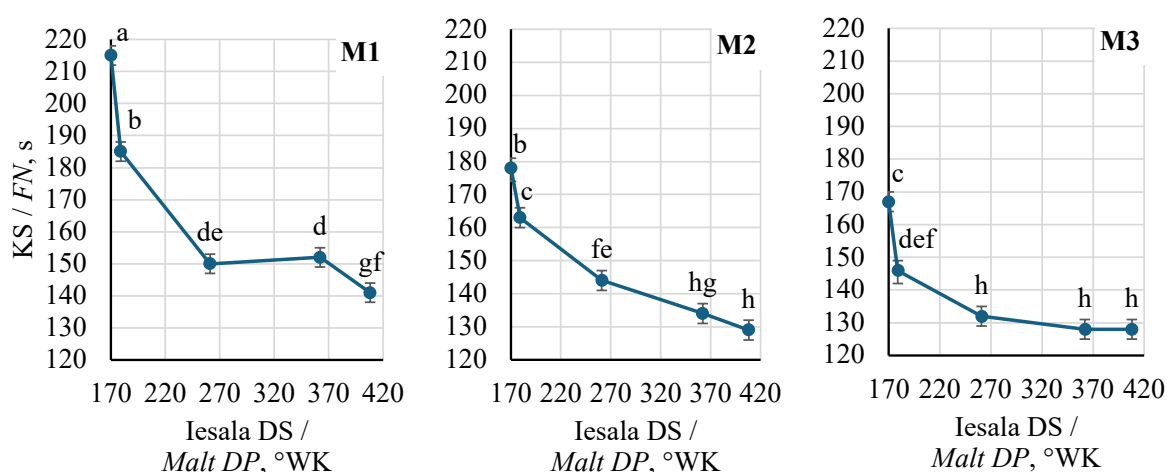
3.2. att. Dažādu iesala saturu (0.5%, 1.0%, 1.5%) un diastātiskā spēka ietekme uz KS rudzu miltu paraugiem M1, M2, M3 / Fig. 3.2. The Effect of Different Malt Concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%) and Diastatic Power on FN of Rye Flour Samples M1, M2, and M3

KS / FN – krišanas skaitlis / falling number. Rudzu miltu paraugi ar dažādu krišanas skaitli / Rye flour samples with different falling number: M1 – 210 s; M2 – 262 s; M3 – 346 s. Iesala paraugi ar dažādu distātisko spēku / Malt samples with different diastatic power: I1 – 170 °WK; I2 – 179 °WK; I3 – 261 °WK; I4 – 362 °WK; I5 – 408 °WK

Vidējās KS vērtības būtiski ($p \leq 0.05$) atšķirās 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 parauga 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). Turklāt iesali ar augstāku DS izraisīja izteiktāku KS samazinājumu, uzrādot spēcīgāku ietekmi uz cietes sadalīšanās intensitāti miltu un iesala paraugos. Cietes enzimatiskās hidrolīzes rezultātā iegūtie sadalīšanās produkti – galvenokārt dekstrīni un maltoze – kalpo kā būtisks substrāts raudzēšanas procesiem, vienlaikus veicinot maizes garšas, aromāta un struktūras veidošanos. Tādējādi, izmantojot iesalu ar augstāku DS un regulējot to pievienošanas daudzumu, iespējams ietekmēt plaucējuma ķīmisko sastāvu, nodrošinot labvēlīgus apstākļus mikrobiotas aktivitātei un raudzēšanas gaitai. Tomēr miltu paraugs M1 kombinācijā ar iesala paraugu I1, ar saturu 0.5% un I2 ar saturu 0.5%, iespējams, nenodrošina pietiekamu enzimatisko aktivitāti. Lielāks iesala saturs (1.5%) ar zemāku DS (piemēram M2 ar I1 vai I2) var radīt līdzīgu efektu kā mazāks iesala saturs (0.5%) ar augstāku DS (piemēram M2 ar I4 vai I5). Šis novērojums liecina, ka lielāks iesala ar zemāku DS saturs var nodrošināt līdzvērtīgu enzīmu darbību, kā mazāks iesala ar augstāku DS saturs, tādējādi būtu iespējams optimizēt un līdzsvarot rudzu plaucējuma gatavošanas procesu, regulējot pievienotā iesala daudzumu, kā arī sekojot līdzi iesala DS.

Iesala diastātiskais spēks (DS) un saturs būtiski ($p \leq 0.05$) ietekmē rudzu miltu krišanas skaitli (KS), kā redzams 3.3. attēlā. Tomēr, sasniedzot noteiktu DS līmeni, šī ietekme stabilizējas, norādot uz iespējamu enzīmu aktivitātes funkcionālo sliekšni. 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.



3.3. att. Nosacītās vidējās vērtības dažāda diastātiskā spēka (DS) iesalu ietekmei uz rudzu miltu krišanas skaitli (KS) / Fig. 3.3. *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. Rudzu miltu paraugi ar dažādu krišanas skaitli / Rye flour samples with different falling number: M1 – 210 s; M2 – 262 s; M3 – 346 s.

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. Tas nozīmē, ka iespējams optimizēt gan iesala

DS, gan saturu, lai panāktu maksimālu enzīmu efektivitāti, vienlaikus izvairoties no pārsātinājuma (Mäkinen & Arendt, 2012). Pareizi optimizējot šos parametrus, var uzlabot procesa efektivitāti, samazināt pārmērīgas cietes hidrolīzes risku, kā arī uzlabot mīklas reoloģiskās īpašības un gatavās maizes struktūru. Tā rezultātā tiek nodrošināts stabilāks ražošanas process.

Novērotais plato efekts, iespējams, atspoguļo substrāta piesātinājuma stāvokli, kurā pieejamā ciete tiek hidrolizēta līdz maksimāli iespējamajai pakāpei konkrētas reakcijas apstākļos. Sasniedzot šo robežpunktu, tālāka enzīmu aktivitātes palielināšana – piemēram, pievienojot iesaļus ar augstāku diastātisko spēku – vairs nenodrošina papildu krišanas skaitļa samazinājumu. Šādu efektu var pastiprināt arī hidrolīzes blakusproduktu, piemēram, maltozes vai glikozes, radītā atgriezeniskā inhibīcija, kā arī koenzīmu vai aktivatoru izsīkums, kas nepieciešami nepārtrauktai un efektīvai enzīmu katalītiskai darbībai (Robinson, 2015).

Rezultāti parādīja, ka nozīme ir gan pievienotā iesaļa daudzumam, gan iesaļa DS. Rudzu miltu paraugi ar iesaļu, 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 iesaļa 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 iesaļus (piemēram, M2: DP 362 vai DP 408). Šis novērojums liecina, ka lielāks iesaļa saturs var kompensēt zemāka diastātiskā spēka enzīmu aktivitāti, nodrošinot līdzīgu KS samazinājumu. Pievienojot 1.5% iesaļa ar augstu DS (piemēram, DS 408 °WK), KS vērtības visos miltu paraugos nokritās zem literatūrā aprakstītā optimālā diapazona. Šis rezultāts liecina, ka iesaļa izmantošana ar izteikti augstu DS var izraisīt pārmērīgu cietes hidrolīzi, kā rezultātā KS kļūst pārāk zems, kas var negatīvi ietekmēt mīklas īpašības un maizes struktūru (Olaerts et al., 2018; Shafisoltani et al., 2014).

Matemātiskais modelis krišanas skaitļa stabilizēšanai rudzu miltos

Lai paplašinātu pētījuma praktisko pielietojumu un nodrošinātu iespēju prognozēt KS, tika izstrādāts matemātiskais modelis (1. pielikums), kas atspoguļo prognozētās KS izmaiņas atkarībā no pievienotā iesaļa DS un tā pievienošanas daudzuma. Modelī izmantots rudzu iesaļs 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. Izvēlētie paraugi atspoguļo tipiskus KS rādītājus, kas raksturīgi praksē sastopamajiem rudzu miltiem. M1 un M2 paraugi ar augstu un vidēju KS atspoguļo rudzu miltu vidēju un zemu enzīmātisko aktivitāti, kas ir raksturīga biežāk izmantotajām rudzu šķirnēm sausos ražas novākšanas apstākļos un tiek izmantoti maizes nozarē. Savukārt M3 parauga KS (210 s) atbilst tādām miltu kvalitātes parametram, kādu maiznieki visbiežāk saņem no dzirnavnieka – šādos gadījumos KS jau ir iepriekš līdzsvarots, nodrošinot stabilu miltu enzīmātisko aktivitāti. Tomēr plaucējuma gatavošanas procesā maiznieks var papildus pievienot rudzu iesaļu, tādējādi pielāgojot plaucējuma tehnoloģiskās īpašības savām vajadzībām – piemēram, ietekmējot plaucējuma viskozitāti vai cukuru veidošanos. Šī pieeja ļauj elastīgi regulēt plaucējuma īpašības atbilstoši konkrētās maiznīcas tehnoloģiskajām prasībām, galaprodukta specifikācijai un garšas, struktūras īpašībām.

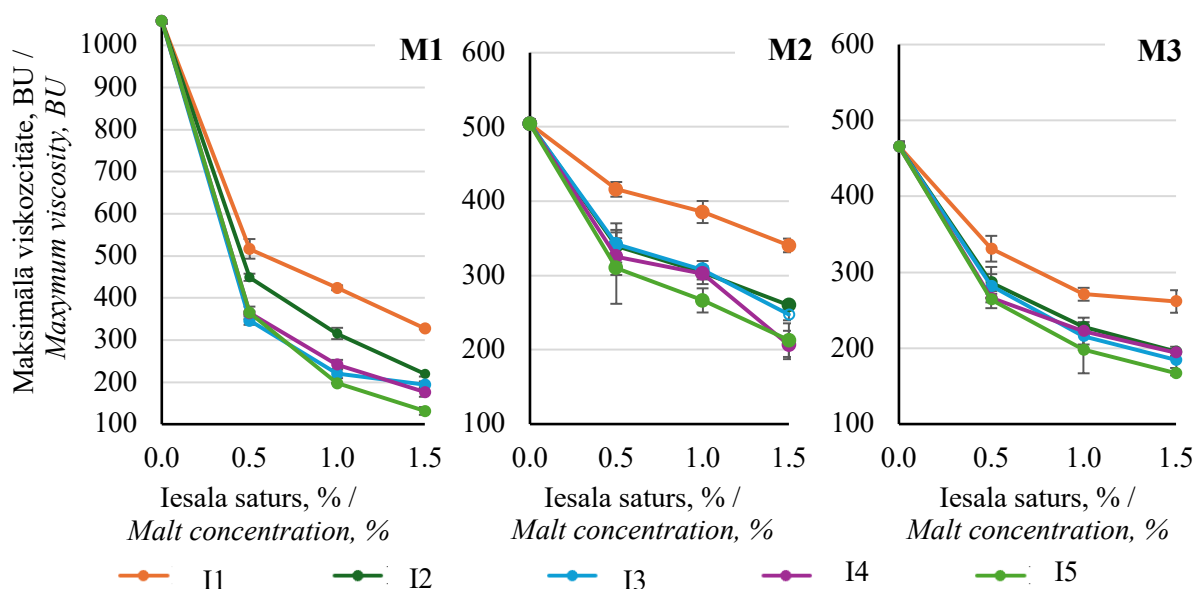
Modelis parāda variācijas, taču nenodefinē viennozīmīgi optimālu iesaļa satura un DS kombināciju, kāda būtu nepieciešama plaucējuma gatavošanai, jo to nosaka konkrētais tehnoloģiskais process. Rezultējošais KS ir atkarīgs no katra ražotāja individuālajām vēlmēm un iecerātā plaucējuma kvalitātes kritērijiem. Tomēr modelis sniedz iespēju, mainoties iesaļa DS, attiecīgi pielāgot tā pievienošanas daudzumu, lai nodrošinātu vēlamo enzīmu aktivitāti un saglabātu plaucējuma īpašību stabilitāti.

Pētījumā noteikts un modelī apstiprināts, ka lielāks rudzu nefermentētā iesaļa ar zemāku diastātisko spēku (DS) saturs (piemēram, 1.5%), var nodrošināt līdzvērtīgu enzīmu aktivitātes efektu un krišanas skaitļa samazinājumu kā mazāks iesaļa ar augstāku DS saturs (piemēram, 0.5%). Šī atziņa ir nozīmīga rudzu plaucējuma tehnoloģijas optimizācijā, jo ļauj ražošanas procesā elastīgi pielāgot iesaļu 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. MV ietekmē rudzu plaucējuma un mīklas reoloģiskās īpašības un maizes kvalitāti. Rudzu miltu paraugu maksimālā viskozitāte būtiski ($p \leq 0.05$) atšķiras, kas norāda uz miltu atšķirīgajām reoloģiskajām īpašībām un iespējamo ietekmi uz plaucējuma un mīklas veidošanās procesu. Augstākā MV (1058 ± 6 BU) konstatēta M1 paraugam ar zemāko KS, kas liecina par augstu cietes uzbriešanas spēju un, iespējams, lielāku ūdens saistīšanas spēju. Savukārt M2 un M3 paraugiem MV bija ievērojami zemāka – attiecīgi 504 ± 8 BU un 466 ± 10 BU. Rezultātu atšķirības varētu skaidrot ar rudzu miltu enzīmu aktivitātes, kā arī cietes kvalitātes un pentozānu satura atšķirībām miltu paraugos, kas ietekmē cietes klīsterizēšanās spēju un enzimatisko noārdīšanos termiskās apstrādes laikā (Stępniewska 2018, Stępniewska 2024).



3.4. att. Rudzu nefermentētā iesala DS un satura ietekme uz rudzu miltu (M1, M2, M3) maksimālo viskozitāti (BU) / Fig. 3.4. 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 ar dažādu krišanas skaitli / Rye flour samples with different falling number: M1 – 210 s; M2 – 262 s; M3 – 346 s. Iesala paraugi ar dažādu distātisko spēku / Malt samples with different diastatic power: I1 – 170 °WK; I2 – 179 °WK; I3 – 261 °WK; I4 – 362 °WK; I5 – 408 °WK.

Nefermentēta iesala ar atšķirīgu diastātisko spēku pievienošana rudzu miltiem būtiski ietekmēja miltu maksimālo viskozitāti. Iegūtie rezultāti demonstrē līdzīgu iesala ietekmi uz miltu-iesala paraugu viskozitāti kā KS gadījumā, uzsverot saistību starp iesala enzimatisko aktivitāti un cietes degradāciju.

Palielinoties iesala saturam, viskozitāte visos rudzu miltu-iesala paraugos statistiski nozīmīgi samazinās ($p < 0.0001$) (3.4. 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 ($r = -0.78$). Šie rezultāti saskan ar Hrušková et al. (2003) pētījumu, kurā tika konstatēta būtiska MV samazināšanās pēc iesala pievienošanas miltu maisījumiem. 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). Šis efekts ir saistīts arī ar amilopektīna struktūras iziršanu un iespējamām izmaiņām amilozes un amilopektīna proporcijā klīsterizācijas laikā (Gomand et al., 2011).

Lai analizētu diastātiskā spēka (DS) ietekmi uz miltu-iesala paraugu MV, tika izveidots statistiskais modelis (3.1. tabula). Tajā tika ņemta vērā arī iesala satura ietekme, savukārt, aprēķinātās (nosacītās) vidējās vērtības atspoguļo tikai DS ietekmi uz MV neatkarīgi no satura mainīguma.

Lai gan, palielinoties iesala DS, MV būtiski samazinājās, DS ietekme stabilizējās pēc noteikta līmeņa, kas nozīmē, ka turpmāks DS pieaugums būtiski neietekmēja viskozitātes samazinājumu. M1 paraugā iesalu I1 un I2 pievienošana izraisīja statistiski nozīmīgu maksimālās viskozitātes (MV) samazinājumu. Iesali I3 un I4 uzrādīja līdzvērtīgu efektu un palielinoties iesala DP – pievienojot iesalu I5 izraisīja tikai minimālu MV samazinājumu, kas liecina par enzīmu un substrāta mijiedarbības piesātinājuma sliekšni. Līdzīga tendence tika novērota arī M2 un M3 paraugos, kur iesali I1 un I2 būtiski ($p \leq 0.05$) samazināja MV, savukārt augstāka DS iesali neuzrādīja būtisku ietekmi.

Novērotā viskozitātes samazināšanās cieši saistīta ar cietes-amilolītiskā kompleksa pārveidi (Stępniewska et al., 2024). Uzbriedušās cietes graudi klīsterizējas, notiek amilozes šķīšana, kas padara šķīstošo frakciju pieejamu amilāzēm (Mangan et al., 2016). Papildus cietes pārmaiņām viskozitāti ietekmē arī pentozānu, īpaši arabinoksilānu, uzbriešana.

3.1. tabula / Table 3.1

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) ($^{\circ}$ WK) on the Maximum Viscosity of Rye Flour (BU)

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

BU – Brabendera vienības / *Brabender units*.

Rudzu miltu paraugi ar dažādu krišanas skaitli / *Rye flour samples with different falling number*: M1 – 210 s; M2 – 262 s; M3 – 346 s. Iesala paraugi ar dažādu diastātisko spēku / *Malt samples with different diastatic power*: I1 – 170 $^{\circ}$ WK; I2 – 179 $^{\circ}$ WK; I3 – 261 $^{\circ}$ WK; I4 – 362 $^{\circ}$ WK; I5 – 408 $^{\circ}$ WK. 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 ($p > 0.05$)*.

Pentozānu noārdīšana ar endoksilāzēm veicina viskozitātes samazināšanos, sašķēlot polisaharīdu matricu un veicinot šķidrās fāzes palielināšanos (Courtin & Delcour, 2002). Lai gan rudzu miltos ksilanāžu aktivitāte parasti ir zema, Salmenkallio-Marttila et al. (2005) pētījumi liecina, ka rudzu miltu ksilanāzēm ir izteikta ietekme uz miltu un ūdens suspensijas reoloģiskajām īpašībām sildīšanas laikā. Kā norādījuši Peng et al. (2020), kviešu iesala ksilanāzes noārda pentozānus līdz oligosaharīdiem, būtiski samazinot ūdenī šķīstošo arabinoksilānu viskozitāti. Pentozānu pozitīvā ietekme mīklas gatavošanā saistīta ar to spēju

veidot viskozu cieto fāzi šķidrums vidē, kas palīdz uzturēt mīklas struktūru un reoloģiskās īpašības (Jaksics et al., 2022).

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 uzsvēr 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 apgrūtina 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). Enzimātiskā hidrolīze, izmantojot augu izcelsmes un mikrobiālas izcelsmes enzīmus (Poonsrisawat et al., 2014), tostarp α -amilāzi, tiek uzskatīta par izplatītu metodi klīsterizētas cietes viskozitātes samazināšanā, kas sašķidrina klīsterizētu cieti, uzlabo plūstamību, ko izmanto gan pārtikas rūpniecībā, gan etanola ražošanā no cieti saturošām izejvielām (Ferry et al., 2005; Schweinberger et al., 2019).

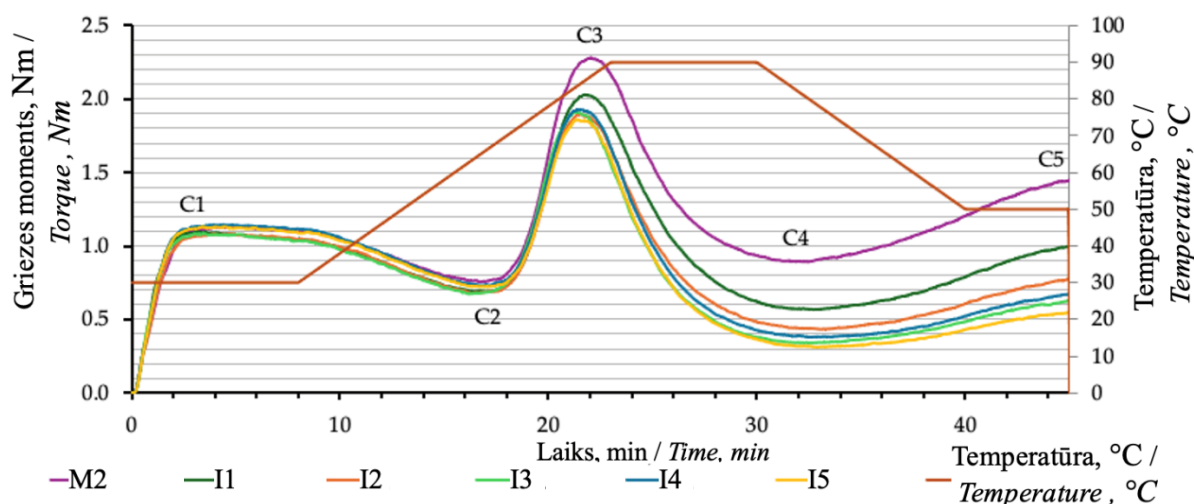
Jāņem vērā, ka literatūrā bieži minētās optimālās maksimālās viskozitātes vērtības rudzu miltiem (400–600 BU) (Verwimp et al., 2006) attiecas galvenokārt uz to piemērotību tieši mīklas mīcīšanai, nevis uz plaucējuma sagatavošanu. Rudzu plaucējumam, kas kalpo kā substrāts raudzēšanai, ir nepieciešama 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. Viskozitātes samazināšana ar enzīmu palīdzību, piemēram, pievienojot nefermentētu iesalu, ļauj veidot tehnoloģiski piemērotāku plaucējumu, uzlabojot tā reoloģiskās īpašības un veicinot stabilu raudzēšanas procesu. 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.

Kopumā nefermentētā iesala satura, diastātiskā spēka un rudzu miltu viskozitātes savstarpējā ietekme izceļ sarežģīto enzīmu un substrāta savstarpējo mijiedarbību, kas nosaka cietes un pentozānu hidrolīzi. Mērķtiecīga iesala izvēle ļauj pielāgot viskozitāti, kas ir svarīgs instruments rudzu plaucējuma gatavošanas stabilizēšanai, tādā veidā padarot procesu efektīvāku un stabilāku.

Miltu reoloģisko īpašību analīze (Mixolab)

Rudzu miltu paraugu ūdens absorbcija (ŪA) pēc Mixolab rezultātiem parādīja būtiskas atšķirības starp M1, M2 un M3 (attiecīgi 67.0%, 62.0% un 63.3%), kas liecina par atšķirīgu spēju saistīt ūdeni. Ūdens absorbciju ietekmē šķiedrvielu saturs, cietes un olbaltumvielu saturs, kā arī miltu maluma pakāpe. Šie rezultāti saskan ar iepriekšējiem pētījumiem, kas ziņo par pilngraudu rudzu miltu ŪA vērtībām 62.0–68.5% robežās (Aprodu & Banu, 2017; Ask et al., 1991; Sabovics et al., 2011). Pēc nefermentētā iesala pievienošanas visos miltu paraugos novērota neliela ŪA samazināšanās, kas saistāma ar polisaharīdu daļēju hidrolīzi un līdz ar to samazinātu ūdens piesaistes spēju. Enzīmu darbība izjauc polisaharīdu struktūru, samazinot spēju saistīt ūdeni. Saskaņā ar Jaksics et al. (2022), miltu ar līdzīgu ķīmisko sastāvu reoloģiskās īpašības var atšķirties enzīmu aktivitātes dēļ, kas vēlreiz apstiprina nefermentētā iesala lomu hidratācijas īpašību regulēšanā.

C2 punkts rudzu miltu mīklā raksturo tās strukturālo un mehānisko stabilitāti temperatūras paaugstināšanās sākumposmā, pirms notiek cietes klīsterizācija (3.5. att.).



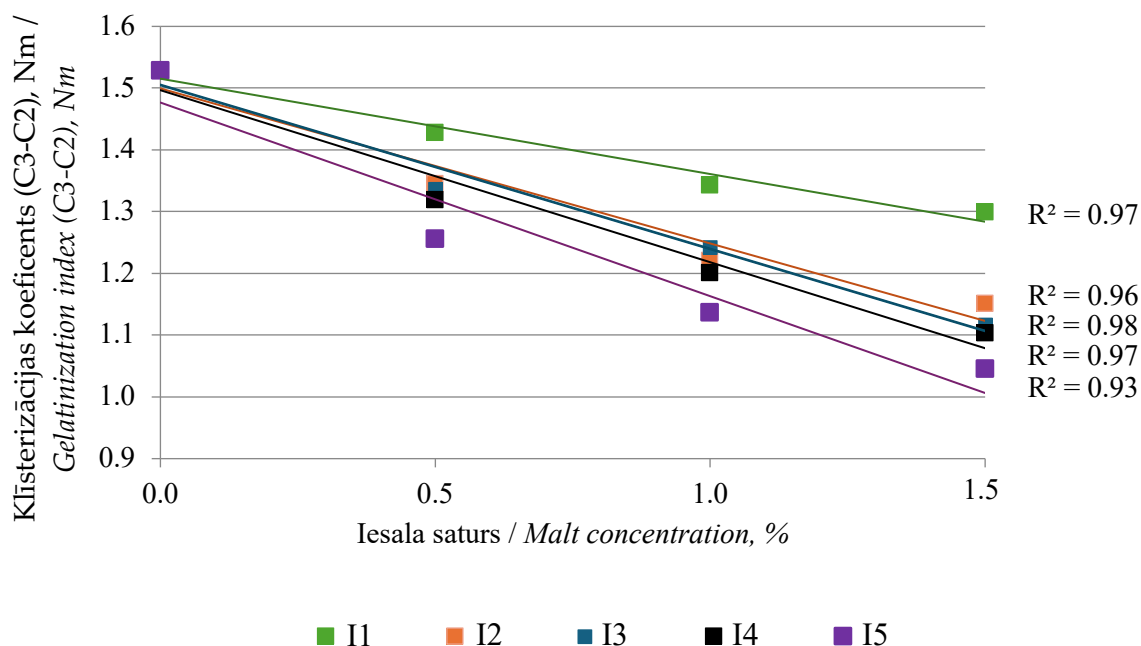
3.5. att. Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku (DS): 170, 179, 261, 362, 408 (°WK) un 1.0% satura ietekme uz rudzu miltu M2 (KS – 262 s) Mixolab rezultātiem (līknēm) / Fig. 3.5. *The Effect of Rye Unfermented Malt with Various Diastatic Power (DP): 170, 179, 261, 362, 408 (°WK) and a Concentration of 1.0% on the Mixolab Results (Curves) of Rye Flour M2 (FN – 262 s)*

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.

C2 punktu reģistrē pie 52–54 °C, kad mīklas viskozitāte sāk samazināties. Zemākas C2 vērtības rudzu miltos var liecināt par vājāku pentozānu tīklu, aktīvāku proteolītisko enzīmu darbību un kopumā zemāku strukturālo stabilitāti (Salamon et al., 2024). Atšķirībā no kviešu miltiem, kur šo fāzi galvenokārt ietekmē lipekļa denaturācija, rudzu miltu mīklās to nosaka nešķīstošo šķiedrvielu (it īpaši arabinoksilānu) spēja saistīt ūdeni un veidot viskozu struktūru.

Turpinot sildīšanu virs 60 °C, tiek sasniegts C3 punkts, kas 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%).

Lai novērtētu klīsterizācijas intensitāti, tika aprēķināts C3-C2 koeficients, kas raksturo viskozitātes pieaugumu klīsterizācijas uzsākšanās fāzē (3.6. att.). Tā vērtība samazinājās, pievienojot iesalus ar dažādu diastātisko spēku. Izteiktākais samazinājums tika novērots I1 un I2 (attiecīgi 1.53 Nm un 1.40 Nm, salīdzinot ar 1.79 Nm kontroles paraugā), bet I3–I5 (attiecīgi DS 261–408 °WK) iesalu grupā vērtības bija līdzīgas – attiecīgi 1.29, 1.28 un 1.22 Nm. Lai gan sākotnēji diastātiskā spēka palielināšana pastiprina šo efektu, augstāko vērtību (DS 261–408 °WK, attiecīgi I3–I5) diapazonā ietekme vairs būtiski nepalielinās, kas norāda uz enzīmu iedarbības piesātinājuma punktu – papildu enzīmu daudzums vairs nerada būtisku ietekmi. Augstās determinācijas koeficienta vērtības ($R^2 = 0.93–0.98$) visām līknēm apstiprina, ka enzīmu aktivitātes ietekme uz viskozitāti ir prognozējama un uzticama, īpaši svarīga ražošanas procesu modelēšanai un enzimatiskās aktivitātes vadīšanai tehnoloģiskos apstākļos.



3.6. att. Rudzu nefermentētā iesala ar dažādu diastātisko spēku (DS) un satura ietekme uz rudzu miltu M2 klīsterizācijas koeficientu (C3-C2) / Fig. 3.6. *Effect of Rye Unfermented Malt with Different Diastatic Power (DP) and Concentration on the Gelatinization Index (C3-C2) of Rye Flour M2*

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

Sasniedzot augstāku temperatūru (~90 °C), tiek reģistrēts C4 punkts, kas parāda mīklas viskozitātes samazināšanos ilgstošas termiskās apstrādes laikā. Šajā fāzē enzīmi darbojas intensīvi un viskozitātes kritums kļūst izteikts. Visos M1 paraugos iesala pievienošana būtiski samazināja C4 vērtību (no 1.45 Nm kontrolē līdz 0.93 Nm ar I1 un 0.78 Nm ar I2). Iesali ar augstāku DS (I3, I4, I5) uzrādīja līdzīgas vidējās vērtības – 0.59, 0.59 un 0.54 Nm, liecinot par enzīmu darbības stabilizāciju šajā diapazonā.

Viskozitātes starpību starp C3 un C4 punktiem (C3-C4) izmanto kā indikatoru cietes degradācijas intensitātei. Jo lielāka šī starpība, jo vairāk klīsterizētās cietes ir sašķelts enzīmu ietekmē. Kontroles paraugā C3-C4 bija 1.006 Nm, bet pievienojot I1 un I2 1.5% saturā, tā pieauga līdz 1.207 un 1.250 Nm. Ar I3 tā sasniedza 1.331 Nm, savukārt I4 un I5 iesalu gadījumā vērtības bija līdzīgas (1.272–1.304 Nm), kas norāda uz līdzvērtīgu enzīmu iedarbību un piesātinājuma efektu enzimatiskās aktivitātes ziņā.

Visos trīs rudzu miltu paraugos iesala satura palielināšana no 0.5% līdz 1.5% kopumā veicināja C3-C4 vērtības pieaugumu, kas norāda uz pastiprinātu enzīmu darbību. Tomēr pie augstāka diastātiskā spēka (piemēram, I5) šī ietekme vairs nebija lineāra – dažos gadījumos vērtības ar 1.5% saturu bija pat zemākas nekā ar 1.0%. Tas norāda, ka enzimatiskās aktivitātes efekts sasniedz piesātinājuma līmeni, kur papildu iesala daudzums vairs nenodrošina būtisku ietekmi, iespējams, substrāta ierobežojuma dēļ. Tādējādi optimālā iesala satura izvēle jābalsta uz konkrēto miltu enzimatiskajām īpašībām. Faktiskās C2, C3, C4 vērtības katram paraugam detalizēti norādītas 2. pielikumā.

Rezultāti apliecina, ka pievienotā iesala diastātiskais spēks un saturs būtiski ietekmē visus Mixolab parametrus, sākot no ūdens absorbcijas līdz cietes degradācijai. Tomēr ietekme nav lineāra – pie vidējās aktivitātes ietekme ir izteiktāka, bet pie augstākas – stabilizējas vai sasniedz piesātinājuma robežu.

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%). No trim analizētajiem rudzu miltu paraugiem (M1, M2, M3) paraugs M2 tika izvēlēts kā piemērotākais, jo tas uzrādīja vidējas tehnoloģiskās īpašības gan pēc krišanas skaitļa (262 s), gan maksimālās viskozitātes (504 BU), izvairoties no galējībām, kas varētu ietekmēt rezultātu interpretāciju.

Savukārt no pieciem iesala paraugiem izvēlēti trīs, pārstāvējot minimālo (I1), vidējo (I3) un maksimālo (I5) enzīmu aktivitāti. Iepriekšējās analīzes parādīja, ka šie trīs iesali reprezentē galvenos enzīmu aktivitātes līmeņus, kas būtiski atšķiras pēc α - un β -amilāzes aktivitātes un ietekmes uz miltu reoloģiskajām īpašībām. Tādējādi šāda izlases sašaurināšana nodrošina mērķtiecīgu un reprezentatīvu datu iegūšanu, vienlaikus optimizējot eksperimentālo dizainu un koncentrējoties uz būtiskākajām enzīmu un substrāta mijiedarbības izpausmēm rudzu plaucējuma tehnoloģijā.

3.1.3. Rudzu iesala satura un DS ietekme uz cukuru sastāvu pēc miltu cietes hidrolīzes (pārcukurošanas) un pēc 24 h raudzēšanas / *Effect of Rye Malt Content and Activity on the Sugar Composition after Flour Starch Hydrolysis (Saccharification) and after 24 Hours of Fermentation*

Cukuru saturs rudzu miltos un iesalu paraugos

Rudzu miltu cietes saturam ir nozīmīga loma pārcukurošanas un raudzēšanas procesos, kas tieši ietekmē maizes garšu, mīkstuma struktūru, porainību, mitrumu un kopējo kvalitāti, tostarp garozas krāsu un aromātu. Cukuru saturu plaucējumā ietekmē rudzu miltos esošās cietes īpašības un tās hidrolīze.

Saskaņā ar rezultātiem (3.2. tabula), rudzu miltos M2 visvairāk noteikta saharoze ($0.93 \pm 0.03 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Saharoze nodrošina mikroorganismus ar cukuru sākotnējā rūgšanas posmā, ja nepievieno papildus cukuru. Savukārt, fruktoze konstatēta $0.08 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Šīs vērtības sakrīt ar Pejcz et al. (2024) datiem, kas norāda uz fruktozes diapazonu no 0.052 līdz $0.48 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Tomēr Klupsaite et al. (2023) pētījumā fruktoze rudzu miltos netika konstatēta. Tika noteikts arī glikozes saturs – $0.06 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, kas atbilst Pejcz et al. (2024) rezultātiem, kuri konstatēja glikozes saturu $0.132 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Savukārt maltozes saturs rudzu miltos tika noteikta $0.05 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, kas atšķiras no Klupsaite et al. (2023) pētījuma, kur maltozes saturs sasniedza līdz pat $1.02 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$.

3.2. tabula / Table 3.2

Cukuru saturs rudzu miltu un iesala paraugos / *Sugar Content in Rye Flour and Malt Samples*

Cukuri / Sugar	Cukuru saturs, g 100 g ⁻¹ sausnas / Sugar content, g 100 g ⁻¹ dw			
	M2	I1	I3	I5
Saharoze / Sucrose	0.93 ± 0.03	2.31 ± 0.00	2.39 ± 0.08	3.18 ± 0.08
Maltoze / Maltose	0.05 ± 0.01	1.16 ± 0.03	0.82 ± 0.01	1.29 ± 0.05
Glikoze / Glucose	0.06 ± 0.02	0.75 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.67 ± 0.01
Fruktoze / Fructose	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01
Pārējie / Other	0.58 ± 0.02	0.39 ± 0.01	0.66 ± 0.01	0.69 ± 0.02
Kopējie / Total	1.70 ± 0.03	4.69 ± 0.08	4.44 ± 0.08	5.92 ± 0.21

M2 – rudzu milti / rye flour (krišanas skaitlis / FN – 262 s); I1 – nefermentētais iesals / unfermented malt (DS / DP – 170 °WK); I3 – nefermentētais iesals / unfermented malt (DS / DP – 261 °WK); I5 – nefermentētais iesals / unfermented malt (DS / DP – 408 °WK).

Cukuru daudzveidību un atšķirīgo saturu rudzu miltos var skaidrot ar vairākiem faktoriem, kas saistīti gan ar graudu audzēšanas agrotehniskajiem apstākļiem, gan uzglabāšanas

laikā notiekošajiem bioķīmiskajiem un mikrobioloģiskajiem procesiem. Agrotehniskie apstākļi, piemēram, augsnes sastāvs, meteoroloģiskie apstākļi (nokrišņu daudzums, temperatūra veģetācijas laikā), kā arī graudaugu šķirne ietekmē graudu ķīmisko sastāvu. Cukuru biosintēze graudos ir cieši saistīta ar ogļhidrātu metabolismu augšanas un nogatavošanās laikā, un nelabvēlīgi augšanas apstākļi, piemēram, sausums vai siltuma stress, var mainīt saharozes, glikozes un fruktozes uzkrāšanos. Savukārt, paaugstinātā mitrumā vai temperatūrā, var aktivizēties enzīmi (piemēram, amilāzes), kas veicina cietes hidrolīzi līdz vienkāršajiem cukuriem. Tas var izraisīt cukuru satura pieaugumu, īpaši reducējošo cukuru (piemēram, glikozes un maltozes) īpatsvaru (Halford et al., 2015). Saharozes koncentrāciju lielā mērā nosaka ģenētiskie faktori, savukārt glikozes līmeni ietekmē gan ģenētiskie, gan agrotehniskie apstākļi. Maltozes un fruktozes koncentrācija galvenokārt ir atkarīga no vides apstākļiem (Curtis et al., 2010). Uzglabāšanas laikā norisinās palēnināti bioķīmiskie procesi graudos, graudu elpošana, un tās laikā notiek cietes un cukuru pārvēršana enerģijā, samazinot kopējo cukuru saturu.

Visos analizētajos iesala paraugos (I1, I3, I5) cukuru saturs bija būtiski ($p \leq 0.05$) augstāks salīdzinājumā ar rudzu miltu paraugu (M2), kas liecina, ka iesala gatavošanas procesā būtiski palielinās gan reducējošo cukuru, gan nereducējošo (saharozes) cukuru daudzums. Palielināta enzīmu aktivitāte iesala gatavošanas laikā veicina vienkāršo cukuru uzkrāšanos, noārdot polisaharīdus (Charmier et al., 2021). Augstākais saharozes, maltozes un glikozes saturs tika novērots iesala paraugos, savukārt fruktozes saturs visos paraugos bija zems un salīdzinoši nemainīgs. Tomēr, neskatoties uz atšķirīgo iesala diastātisko spēku (I1 – 170 °WK, I3 – 262 °WK, I5 – 409 °WK), cukuru saturs neuzrāda viennozīmīgu pieauguma tendenci atbilstoši šiem rādītājiem. Piemēram, I1 paraugā ar zemāko diastātisko spēku tika konstatēts lielāks glikozes un maltozes saturs nekā I3 paraugā, kuram ir augstāks diastātiskais spēks. Līdz ar to rezultāti liecina, ka, lai gan kopumā iesala gatavošanas procesā būtiski palielinās cukuru saturs, nav novērojama tieša korelācija starp diastātisko spēku un iegūto cukuru saturu rudzu nefermentētajā iesalā.

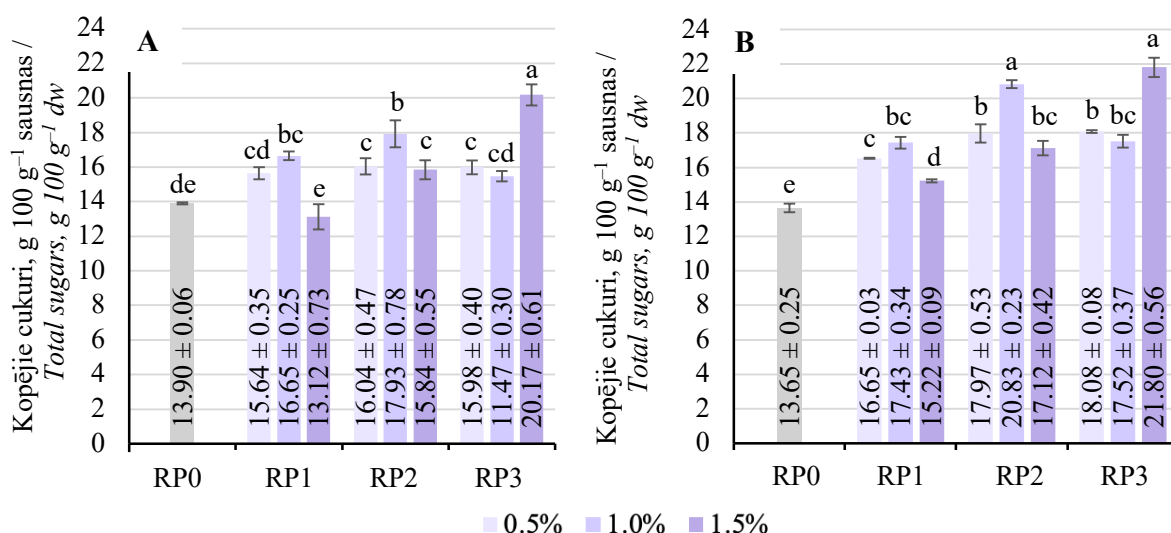
Cukuru saturs miltu un iesala paraugos pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas

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 (3.7.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. Piemēram, 1.5% iesala pievienošana RP1 un RP2 paraugos nenodrošināja būtiski augstāku cukuru saturu salīdzinājumā ar kontroles paraugu (RP0), un rezultāti būtiski neatšķīrās ($p > 0.05$). Visaugstākais cukuru saturs tika novērots RP3 paraugam ar iesalu DS 408 °WK un tā saturu 1.5% (20.17 ± 1.61 g 100 g⁻¹), kas norāda uz intensīvāku cietes hidrolīzi un cukuru veidošanos. Pēc 24 h raudzēšanas (3.7.B att.) kopējais cukuru saturs kontroles paraugā saglabājās līdzīgā līmenī (13.65 ± 0.25 g 100 g⁻¹), savukārt paraugos ar pievienotu iesalu tika novērots neliels cukuru satura palielinājums. Paraugs RP3 ar iesala saturu 1.5% saglabāja visaugstāko cukuru saturu (21.06 ± 0.56 g 100 g⁻¹) arī pēc 24 h raudzēšanas. Taču arī šajā posmā netika novērota lineāra sakarība starp iesala saturu un kopējo cukuru saturu.

Iesalā esošo α - un β -amilāžu aktivitātes uzrādīja statistiski nozīmīgu korelāciju ar kopējo cukuru saturu pārcukurota plaucējuma paraugos ($r = 0.57$ un $r = 0.54$ attiecīgi), kas norāda uz šo enzīmu nozīmi cietes hidrolīzē šajā procesa posmā.



3.7. att. Kopējo cukuru saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Fig. 3.7. 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).

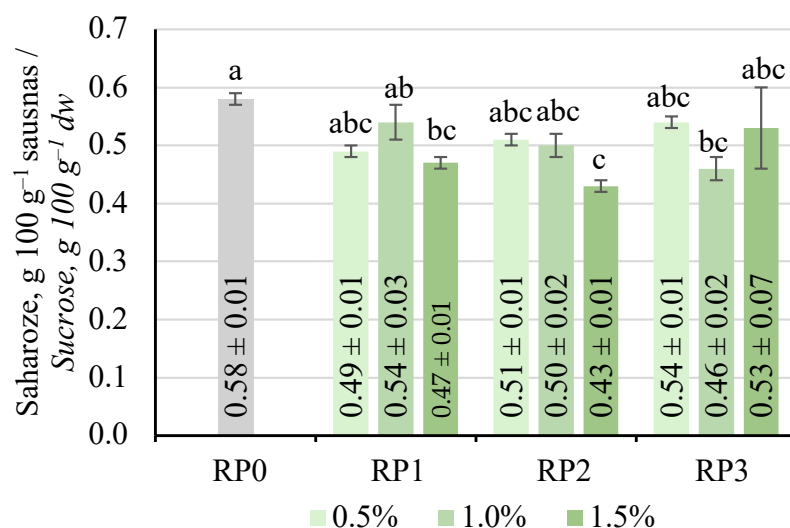
Atšķirīgie burti (attēlā A: a–d, attēlā B: a–e) uz kolonnām norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a–d in Figure A and a–e in Figure B) on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Saharoze

Rudzu plaucējuma paraugos pēc pārcukurošanas fāzes saharozes saturs svārstījās no 0.43 līdz 0.58 g 100 g⁻¹ sausnas (3.8. att.). Augstākais saharozes saturs konstatēts kontroles paraugā (RP0 0.58 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas), 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. Straujā saharozes patēriņa dinamika agrīnajā raudzēšanas fāzē atspoguļo pienskābes baktēriju metabolo efektivitāti, pārvēršot pieejamos cukurus organiskajās skābēs, tādējādi veicinot mīklas paskābināšanos un garšas veidošanos (Rehman et al., 2006). Kā arī saharoze var sadalīties glikozē un fruktozē, kas, savukārt tālāk var izraisīt šo cukuru satura izmaiņas pēc 24 h raudzēšanas.



3.8. att. Saharozes saturs plaucējuma pēc pārcukurošanas /
Fig. 3.8. *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 (3.9.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 sausas), un svārstījās no 13.32 līdz 18.18 g 100 g⁻¹ sausas. Izņēmums bija RP1 paraugs ar 1.5% iesala saturu, kur maltozes līmenis (13.54 ± 0.27 g 100 g⁻¹ sausas) būtiski neatšķīrās no kontroles. Visaugstākais maltozes saturs tika konstatēts paraugā RP3 ar 1.5% iesala saturu – 18.18 ± 1.39 g 100 g⁻¹ sausas, 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 (3.9.B att.) maltozes saturs visos paraugos saglabājās salīdzinoši augsts, un vairākos gadījumos pat pieauga, salīdzinot ar pārcukurošanas fāzi, īpaši paraugos RP2 un RP3. Piemēram, RP3 paraugā maltozes saturs sasniedza 19.74 ± 0.46 g 100 g⁻¹ sausas, kas bija augstākais rādītājs starp visiem paraugiem. 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 sausas), kas atkārtoti norāda uz iespējamu enzimatiskās aktivitātes atšķirību starp dažādiem iesala paraugiem un komplekso mijiedarbību starp procesiem (gan veidojās cukuri, gan tiek patērēti, pārvērsti).

Šie rezultāti saskan ar iepriekšējiem pētījumiem, kuros tika novērots, ka maltoze ir dominējošais cukurs rudzu plaucējumā, salīdzinot ar citiem cukuriem, un tās veidošanās ir cieši saistīta ar amilāžu aktivitāti un plaucēšanas apstākļiem (temperatūru, laiku, pH). Optimāli

A

Maltose, g 100 g⁻¹ saunas /
Maltose, g 100 g⁻¹ dw

Strain	0.5%	1.0%	1.5%
RP0	11.77 ± 0.01 (de)	13.54 ± 0.27 (cd)	14.58 ± 0.16 (bc)
RP1	10.90 ± 0.60 (e)	13.92 ± 0.35 (bcd)	15.94 ± 0.64 (ab)
RP2	13.50 ± 0.43 (cd)	13.84 ± 0.36 (bcd)	13.32 ± 0.23 (cd)
RP3	18.18 ± 0.39 (a)	13.32 ± 0.23 (cd)	18.18 ± 0.39 (a)

B

Maltose, g 100 g⁻¹ saunas /
Maltose, g 100 g⁻¹ dw

Strain	0.5%	1.0%	1.5%
RP0	11.33 ± 0.13 (f)	14.26 ± 0.01 (d)	15.51 ± 0.25 (bc)
RP1	12.56 ± 0.02 (e)	15.86 ± 0.46 (b)	18.76 ± 0.17 (a)
RP2	14.46 ± 0.38 (cd)	16.33 ± 0.04 (b)	15.33 ± 0.33 (bcd)
RP3	19.74 ± 0.46 (a)	15.33 ± 0.33 (bcd)	19.74 ± 0.46 (a)

0.5% 1.0% 1.5%

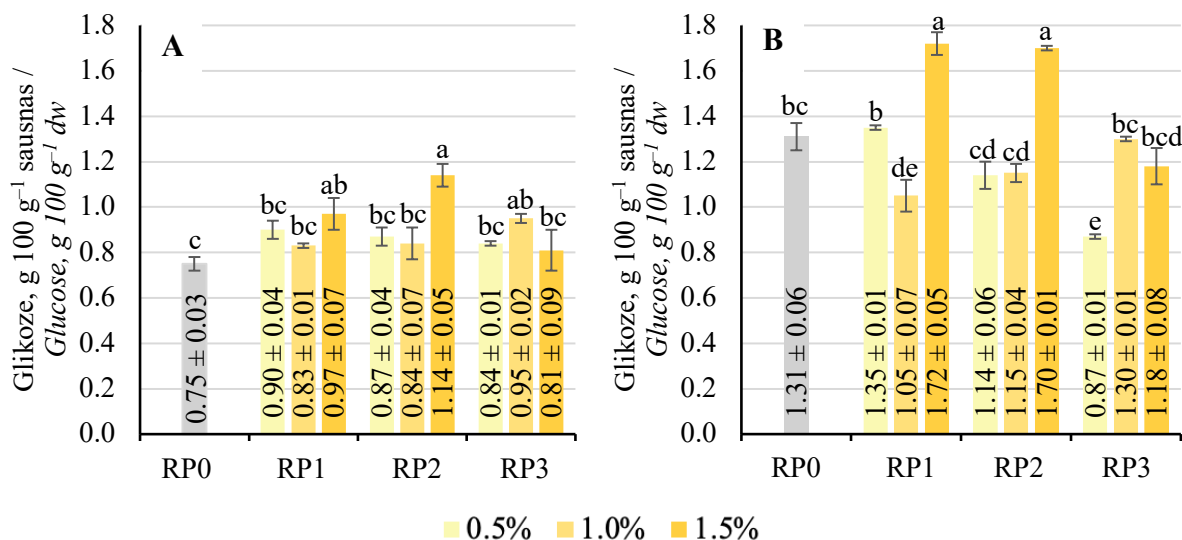
RP0 – rudzu miltu M2 plaucējums bez pievienota iesala / *rye flour M2 scald sample without malt*;
 RP1, RP2, RP3 – plaucējuma paraugi pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Plaucējuma paraugi gatavoti no rudzu miltu M2 un iesala I1 (RP1), no rudzu miltu M2 un iesala I3 (RP2) un no rudzu miltu M2 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).*

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.

Glikozes veidošanos pārcukurotā plaucējuma un pēc 24 h raudzēšanas ietekmē vairāki faktori, tostarp pievienotā iesaļa enzīmu aktivitāte (īpaši α - un β -amilāzes), rudzu miltu cietes kvalitāte, plaucējuma viskozitāte un mikroorganismu vielmaiņas aktivitāte. Glikoze veidojas galvenokārt kā cietes enzīmatiskās hidrolīzes produkts – amilolītiskie enzīmi (α - un β -amilāze) sašķel cieti dekstrīnos un maltozē, bet tālāk maltozi var hidrolizēt glikozē citi enzīmi, piemēram, maltāze vai mikroorganismu producētas glikozidāzes. Papildu glikozes avots ir saharozes hidrolīze, kurā invertāze šo disaharīdu sašķel glikozē un fruktozē (Gänzle, 2014; Struyf, 2017). Šo procesu intensitāti nosaka gan enzīmu pieejamība un aktivitāte, gan plaucējuma struktūra (viskozitāte) un raudzēšanas apstākļi.

63

(Muralikrishna & Nirmala, 2005). Šī enzīmu aktivitāte nodrošina nepārtrauktu cietes sadalīšanos un glikozes veidošanos pārcukurošanās laikā. Šis process nodrošina vairāk izmantojamu cukuru, rauga un pienskābes baktēriju šūnām raudzēšanas laikā (Petersen et al., 2005).



3.10. att. Glikozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B) / Fig. 3.10. *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).

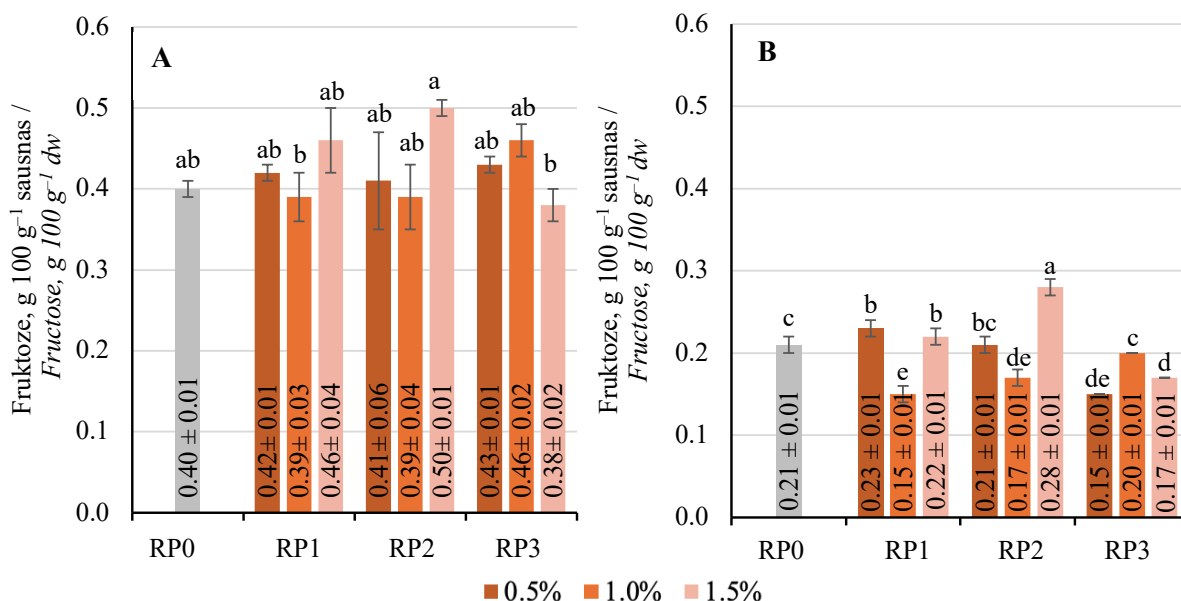
Atšķirīgie burti (attēlā A: a–c, attēlā B (a–e) uz kolonnām norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem / Different letters (a–c in Figure A and a–e in Figure B) on bars indicate significant differences ($p \leq 0.05$) between the samples.

Pēc 24 h raudzēšanas glikozes saturs visos paraugos palielinājās (3.10.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. Lai gan pienskābes baktērijas parasti tieši nepiedalās cietes šķelšanā, dažas sugas var izdalīt glikozilhidrolāzes, kas papildus veicina vienkāršo cukuru atbrīvošanos raudzēšanas laikā (Gänzle et al., 2007).

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.).



3.11. att. **Fruktozes saturs plaucējumā pēc pārcukurošanas (A) un pēc 24 h raudzēšanas (B)** / Fig. 3.11. **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.

Šīs fruktozes satura variācijas plaucējumā, kurā izmantotas dažādas aktivitātes iesali, varētu būt saistītas ar fruktooligosaharīdu enzimatisko pārvēršanu reducējošos cukuros, īpaši fruktozē. Enzīmu aktivitāte plaucējuma gatavošanas procesā veicina sarežģīto ogļhidrātu, tostarp fruktooligosaharīdu, noārdīšanos līdz fruktozei. 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 (3.11.B att.) salīdzinot ar paraugiem pēc pārcukurošanās. Izteiktākais fruktozes satura samazinājums bija par 29% un 19%, rudzu miltiem pievienojot attiecīgi 0.5% un 1.5% iesalu I5 (RP3). 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. Interesanti, ka, pievienojot 1% iesala I3, fruktozes saturs raudzēšanas laikā samazinājās par 19%, bet ar 1.5% – palielinājās par 33%, tomēr likumsakarības netika konstatētas. Šīs svārstības var liecināt par pienskābes baktēriju selektīvu cukuru izmantošanu, kas atkarīga no celma īpašībām (Calabrese et al., 2022; Zheng et al., 2015) un pieejamo cukuru profila plaucējumā.

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.

3.1. Nodaļas kopsavilkums / *Summary of Chapter 3.1*

Nefermentētā rudzu iesala diastātiskais spēks un saturs būtiski ietekmēja rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības – krišanas skaitli, maksimālo viskozitāti un Mixolab parametrus. Palielinot iesala saturu, iespējams panākt līdzīgu efektu, kā pievienojot iesalu ar augstāku diastātisko spēku mazākā daudzumā. Pētījumā tika noteikts, ka iesals ar DS virs 261 °WK uzrāda līdzīgu ietekmi bez būtiskām atšķirībām, kas var norādīt uz enzimatiskās aktivitātes piesātinājuma sliekšni.

Iesala pievienošana izraisa rudzu miltu krišanas skaitļa samazinājumu, kas kļūva izteiktāks, palielinoties gan iesala saturam, gan tā DS. Tomēr novērots, ka zemāka DS iesals (170–179 °WK) lielākā koncentrācijā (1.5%) var nodrošināt līdzvērtīgu KS samazinājumu kā augstāka DS iesals (362–408 °WK) zemākā koncentrācijā (0.5%), ļaujot elastīgi pielāgot plaucējuma sastāvu dažādu izejvielu pieejamības gadījumā. Turklāt, lai paplašinātu pētījuma praktisko nozīmi un nodrošinātu iespēju prognozēt rudzu miltu tehnoloģiskās īpašības dažādās kombinācijās ar iesalu, tika izstrādāts matemātiskais modelis, kas apraksta krišanas skaitļa izmaiņas atkarībā no pievienotā rudzu nefermentētā iesala diastātiskā spēka un tā pievienošanas daudzuma. Modelī tika izmantoti dati no trim rudzu miltu paraugiem (M1, M2, M3), kas atspoguļo dažādu izejvielu kvalitāti ar sākotnējo KS no 210 līdz 346 s. Šis modelis sniedz iespēju ražošanas apstākļos paredzami izvērtēt nepieciešamo iesala DS un daudzuma

kombināciju, lai panāktu vēlamo KS un plaucējuma īpašības. Tas ļauj maizniekam elastīgi izvēlēties izejvielu kombinācijas, ņemot vērā ne tikai tehnoloģisko efektu, bet arī ekonomiskos aspektus, optimizējot iesala patēriņu.

Maksimālā viskozitāte plaucējumos samazinās, palielinoties iesala saturam, kas atspoguļoja intensīvāku cietes hidrolīzi. Korelācijas koeficienti starp iesala saturu un viskozitāti visos miltu paraugos bija statistiski nozīmīgi un negatīvi ($r = -0.67$ līdz -0.78), kas apstiprina enzīmu aktivitātes ietekmi uz cietes hidrolīzi. Viskozitātes samazināšanās tehnoloģiski ir nozīmīga, jo tā uzlabo plaucējuma apstrādes īpašības un mikroorganismiem pieejamās barības vielas.

Mixolab parametri parāda, ka, pievienojot iesalu ar atšķirīgu DS, būtiski samazinās cietes klīsterizācijas maksimums (C3), klīsterizācijas indekss (C3-C2) un viskozitātes kritums termiskās apstrādes laikā (C3-C4), īpaši pie augstākas enzīmu aktivitātes. Tomēr šie rādītāji stabilizējās, izmantojot iesalu ar DS virs 261°WK , liecinot, ka turpmāks DS pieaugums nenodrošina papildu efektu uz tehnoloģiskajām īpašībām.

Pievienotā iesala saturs un diastātiskais spēks ietekmēja kopējo cukuru saturu – tas palielinājās, tomēr netika novērota tieša, proporcionāla sakarība starp iesala DS vai saturu un iegūto cukuru daudzumu. Saharozes saturs pēc pārcukurošanas bija salīdzinoši zems, savukārt maltoze un glikoze bija dominējošie cukuri. Pēc 24 h raudzēšanas visos paraugos saharoze vairs netika konstatēta, taču maltozes un glikozes saturs saglabājās augsts vai pat palielinājās. Šis cukuru atlikums liecina par vēl pastāvošu raudzēšanas potenciālu, kas var tikt izmantots, pagarinot raudzēšanas laiku.

The diastatic power and content of diastatic rye malt significantly affected the technological properties of rye flour – falling number, maximum viscosity, and Mixolab parameters. Increasing the malt content can achieve a similar effect as adding malt with higher diastatic power in smaller amounts. The study determined that malt with a diastatic power above 261°WK exhibited a comparable effect without significant differences, which may indicate a saturation threshold for enzymatic activity.

The addition of malt decreased the falling number of rye flour, which became more pronounced with increasing malt content and diastatic power. However, it was observed that lower-DS malt ($170\text{--}179^{\circ}\text{WK}$) in higher concentrations (1.5%) can ensure a comparable reduction in falling number as higher-DS malt ($362\text{--}408^{\circ}\text{WK}$) in lower concentrations (0.5%), allowing for flexible adjustment of scald composition depending on raw material availability. Moreover, a mathematical model was developed to expand the practical relevance of the study and enable the prediction of the technological properties of rye flour in various combinations with malt. This model describes changes in falling number depending on the diastatic power of added rye malt and its dosage. The model was based on data from three rye flour samples (M1, M2, M3), representing different raw material quality levels with initial falling numbers ranging from 210 to 346 s. This model enables predictable evaluation of the required combination of malt diastatic power and dosage under production conditions to achieve the desired falling number and scald properties. It allows bakers to select raw material combinations flexibly, considering the technological effect and economic aspects, optimizing malt usage.

The maximum viscosity in scalds decreased with increasing malt content, reflecting more intensive starch hydrolysis. The correlation coefficients between malt content and viscosity were statistically significant and negative in all flour samples ($r = -0.67$ to -0.78), confirming the impact of enzymatic activity on starch breakdown. Decreased viscosity is technologically important as it improves scald handling and increases nutrient availability for microorganisms.

Mixolab parameters showed that the addition of malt with varying diastatic power significantly reduced the starch gelatinization peak (C3), the gelatinization index (C3-C2), and the viscosity drop during thermal treatment (C3-C4), especially at higher enzymatic activity. However, these parameters stabilized when using malt with a DS above 261°WK , indicating

that further increases in DS do not provide additional improvements in technological properties.

The added malt content and diastatic power increased the total sugar content. However, no direct proportional relationship was observed between the DS or dosage and the amount of sugars formed. The sucrose content after saccharification was relatively low, whereas maltose and glucose were the dominant sugars. After 24 h of fermentation, sucrose was no longer detectable in any sample, while maltose and glucose levels remained high or increased. This residual sugar content indicates remaining fermentation potential, which could be utilized by extending the fermentation time.

3.2. Mikrobiotas un ķīmiskā sastāva izmaiņas plaucējuma pārcukurošanas un ilgstošas raudzēšanas laikā / *Microbial and Chemical Composition Changes After Scald Saccharification and Prolonged Fermentation*

Plaucējums ir kompleksa sistēma, kura fizikālās, ķīmiskās un mikrobioloģiskās īpašības būtiski mainās raudzēšanas laikā, ietekmējot gan tā struktūru, gan bioķīmiskos procesus. Šīs izmaiņas ir saistītas ar plaucējuma galveno strukturālo elementu – cietes, cukuru, šķiedrvielu un olbaltumvielu – savstarpējo mijiedarbību, kā arī mikroorganismu aktivitāti.

Ciete ir viens no galvenajiem plaucējuma komponentiem, kas plaucējuma gatavošanas laikā klīsterizējas un tiek pakļauta enzimatiskajai hidrolīzei, nodrošinot piemērotu vidi mikroorganismu attīstībai un metabolītu sintēzei. Cukuru saturs plaucējumā ir būtisks faktors, kas nosaka raudzēšanas intensitāti un gala produkta īpašības – pietiekams cukuru saturs veicina PB attīstību un organisko skābju veidošanos, kas ietekmē plaucējuma pH.

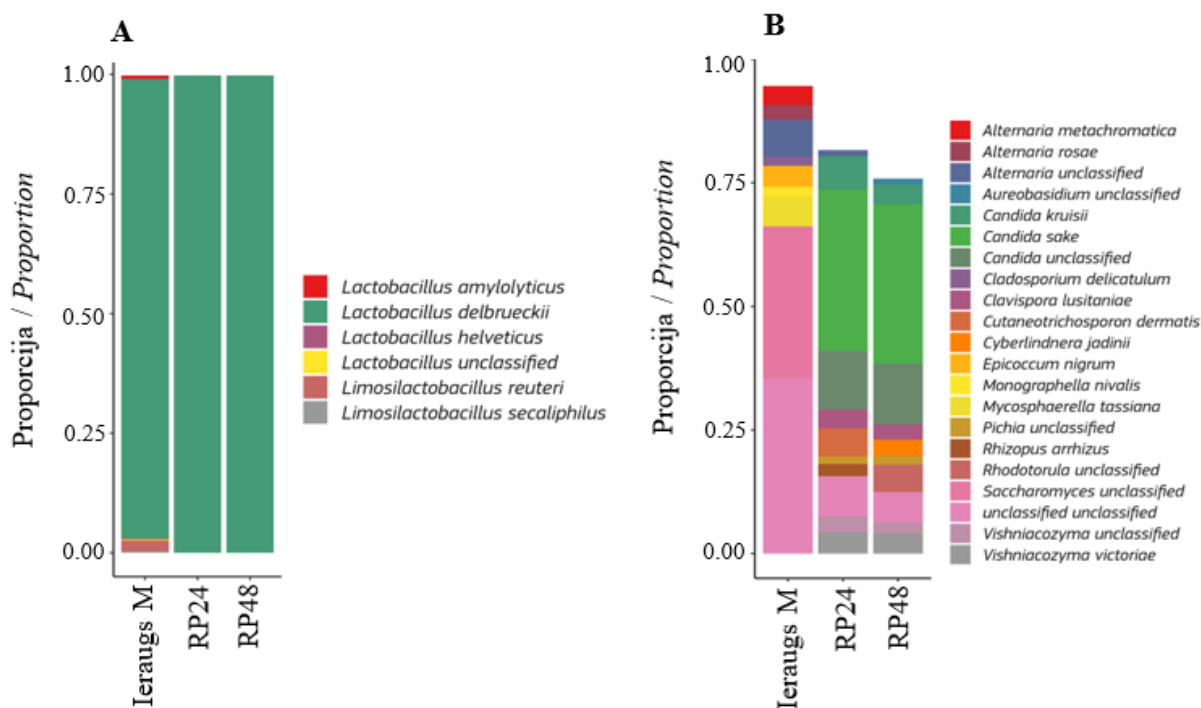
Mikroorganismu vairošanās raudzēšanas laikā ir cieši saistīta ar barības vides sastāvu un raudzēšanas apstākļiem, galvenokārt, temperatūru un laiku. PB raudzēšanas procesā pamatā veido pienskābi, kas pazemina pH un ietekmē gan mīklas īpašības, maizes struktūru, gan raudzēšanas dinamiku. Turklāt mikroorganismi producē eksopolisaharīdus, kas veicina plaucējuma struktūras stabilitāti un mitruma noturību. Tomēr pārmērīga organisko skābju veidošanās var negatīvi ietekmēt plaucējuma sensorās īpašības, padarot to pārlietu skābu vai mazāk elastīgu.

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).

3.2.1. Mikrobiotas raksturojums raudzētā plaucējumā / *Microbial Characterization of Fermented Scald*

Mikroorganismu identifikācijas rezultāti uzrādīja, ka Ieraugā P un raudzētā plaucējumā (24 h) dominēja *Lactobacillus delbrueckii* un saglabāja dominanci arī pēc 48 h raudzēšanas (3.12.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. (3.12.B att.). Ieraugā M dominēja *Saccharomyces* spp. un ar retāku pārstāvniecību konstatēja *Alternaria* spp., *Mycosphaerella tassiana* mikroskopiskās sēnes.

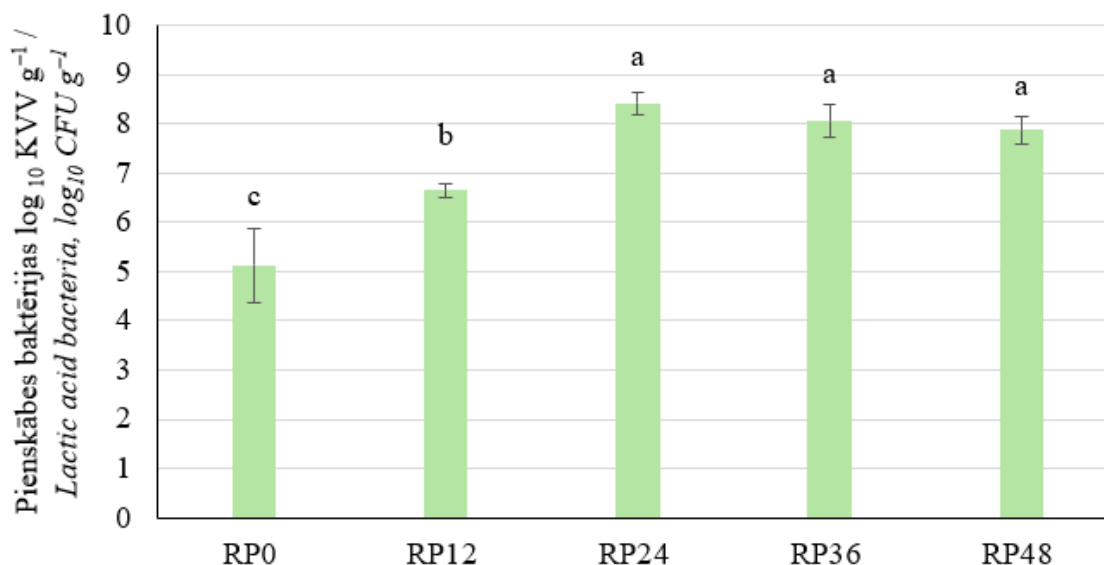


3.12. att. **Pienskābes baktēriju (A) un mikroskopisko sēņu (B) daudzveidība ieraugā un raudzētā plaucējumā** / Fig. 3.12. **Diversity of Lactic Acid Bacteria (A) and Microscopic Fungi (B) in Sourdough and Fermented Scald**

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 (3.13. 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. Arī Kozlinskis et al. (2010) konstatējuši *Lactobacillus delbrueckii* līdzās *Lactiplantibacillus plantarum*, *Companilactobacillus alimentarius*, *Latilactobacillus curvatus* spontānā rudzu ieraugā un spontānā rudzu ieraugā ar bioloģiski aktivētu graudu miltu piedevu (Kozlinskis et al., 2010). Plaucēšana samazina mikroorganismu (pienskābes baktēriju un mikroskopisko sēņu) skaitu (Li et al., 2022), kas vērtējams pozitīvi, jo daļēji iznīcina arī nelabvēlīgās baktērijas un mikroskopiskās sēnes, kas dabiski sastopamas miltu mikrobiotā. Taču tāpēc plaucējuma raudzēšanai nepieciešams izmantot ieraugu kā mikroorganismu avotu.



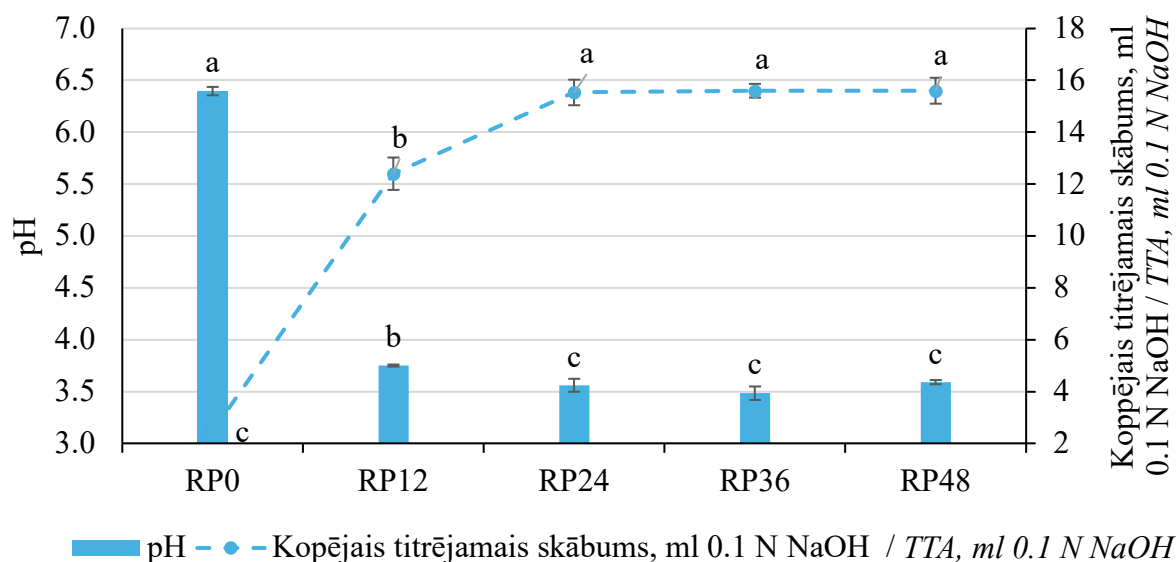
3.13. att. **Pienskābes baktēriju KVV skaita izmaiņas neraudzētā un raudzētā plaucējuma 48 h raudzēšanas laikā** / Fig 3.13. **Changes in Lactic Acid Bacteria CFU During Fermentation in Non-fermented and Fermented Scald over 48 Hours**

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 ($p \leq 0.05$).

Arora et al. (2021) norāda, ka dažādu ieraugu mikrobiotā identificētas *Saccharomyces*, *Candida*, *Kazakhstania*, *Rhodotorula*, *Torulopsis* ģints mikroskopiskās sēnes. Vuyst et al. (2016) atzīst, ka *Candida* labi pielāgojas ierauga vidē. Turklāt $pH < 4$, paaugstināta raudzēšanas temperatūra (35–55 °C) un ilgstošs raudzēšanas laiks (24–48 h) rada nelabvēlīgus apstākļus *Saccharomyces* augšanai, kas izskaidrotu to, ka Ieraugā P dominēja *Candida sake* un *Candida kruisii*. Taču Ieraugā M dominēja *Saccharomyces*, kas nepieciešama mīklas rūgšanas nodrošināšanai. Pētnieki norāda, ka ceptuves ieraugā novēro vienu vai divu raugu sugu klātbūtni, starp kurām visbiežāk atrastas *Saccharomyces cerevisiae* un *Candida humilis* (De Vuyst et al., 2017). Ieraugos novērota specifiska raugu un pienskābes baktēriju simbioze, kuras pamatā varētu būt metabolisma īpatnības, kā piemēram *Candida glabrata* augšana atkarīga no glikozes klātbūtnes vidē un tāpēc tās sastopamas kopā ar pienskābes baktērijām, kuras metabolismā izmanto maltozi. Šajā pētījumā raudzētā plaucējumā novērota *Lactobacillus delbrueckii* un *Candida* spp. asociācija.

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 (3.14. 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. Līdzīgus rezultātus ieguva arī Cizeikiene et.al. (2020), kuri pētīja pilngraudu kviešu ierauga raudzēšanu 40 °C temperatūrā ar *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*. Viņu pētījums parādīja pH samazināšanos zem 3.5, ko pavadīja augstāks titrējamā skābuma līmenis – 16 ml NaOH. Līdzīgi pH strauji samazinājās pirmajās 24 stundās, kam sekoja stabilizācija atlikušajā 72 h raudzēšanas periodā.



3.14. att. Raudzēta plaucējuma pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, raudzējot dažādu ilgumu / Fig 3.14. 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 ($p \leq 0.05$).

3.2.2. Cukuru satura izmaiņas plaucējuma raudzēšanas laikā / Changes in Sugar Content During Scald Fermentation

Raudzēšanas laikā notiekošās cukuru satura izmaiņas atspoguļo mikroorganismu darbību un barības vides pārveides dinamiku (3.3. 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 (3.3. 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 pārcukurošanās fāzes (1.01 ± 0.09 g 100 g⁻¹ sausnas), taču raudzēšanas gaitā tas būtiski samazinājās, sasniedzot 0.25 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas pēc 48 stundām (3.3. 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 (3.3. tabula).

3.3. tabula / Table 3.3

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

Cukuri, Sugars,	Rudzu plaucējuma paraugs / 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*.

Noteiktais cukuru saturs bija lielāks plaucējuma paraugos pētījuma II posmā, salīdzinot ar pētījuma I posmā noteikto daudzumu pēc pārcukurošanas un pēc 24 h raudzēšanas. Atšķirības skaidrojamas ar eksperimenta mērogu un vidi — I posmā tika izmantots neliels plaucējuma apjoms (4,20 kg) laboratorijas apstākļos, savukārt II posmā eksperiments tika veikts ražošanas apstākļos ar ievērojami lielāku plaucējuma daudzumu (60,72 kg). Plaucējuma gatavošanai laboratorijas apstākļos piemēroja raudzēšanas ilgumu un temperatūru atbilstoši ražošanas apstākļiem. Tomēr rezultātu atšķirības var būt saistīts ar lielāku plaucējuma apjomu, atšķirīgu izmantoto raudzēšanas trauku materiālu un attiecīgi tā siltumvadītības īpašībām. Lielā masa (60.72 kg) koka kublā nodrošina lēnāku un vienmērīgāku atdzišanu, jo siltums saglabājas ilgāk, un iekšējā temperatūra krītas lēnāk nekā ārējā. Tas var pagarināt aktīvāko amilolīzes posmu (īpaši ap $55\text{--}50^\circ\text{C}$), kad enzīmi visaktīvāk šķel cieti līdz maltozei. Turklāt koka kubls nodrošina labāku siltuma izolāciju, un temperatūru visā masā ir iespēja nodrošināt viendabīgāku, tādējādi radot vienmērīgākus apstākļus enzimatiskajai aktivitātei. Savukārt laboratorijas apstākļos ar mazāku plaucējuma daudzumu un metāla trauku, temperatūras svārstības var būt izteiktākas (piemēram, malas atdziest ātrāk, iekšpuse – ilgāk karsta), kas ieteimē enzīmu darbību nevienmērīgi un kopumā var samazināt cukur veidošanās intensitāti.

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, cieta) 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. Homofermentatīvās PB, piemēram, *Lactobacillus delbrueckii*, glikozi pārsvarā metabolizē, izmantojot Embdena–Majerhofa (EMP) glikolīzes ceļu, kā galaproduktu veidojot pienskābi. Šajā procesā no vienas glikozes molekulas tiek iegūtas divas pienskābes molekulas un neliels daudzums ATP, kas nodrošina baktēriju enerģijas bilanci.

Līdztekus cukuru patēriņam homofermentatīvā metabolismā, raudzēšanas laikā norisinās arī cukuru hidrolīze un transformācija. Disaharīdi, piemēram, saharoze un maltoze, mikroorganismu producētu enzīmu ietekmē var tikt sašķelti par atbilstošajiem monosaharīdiem – galvenokārt glikozi un fruktozi. Šo reakciju katalizē invertāze (saharāzes-izomaltāzes komplekss), maltāze, kā arī amilāzes (Gänzle & Follador, 2012).

Papildus disaharīdu šķelšanai raudzēšanas laikā turpina darboties arī amilolītiskie enzīmi, piemēram, β -amilāze un glukoamilāze, kas šķel 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.

3.2.3. Organisko skābju saturs rudzu plaucējumā / *Organic Acid Content in Rye Scald*

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 3.4. tabulā.

3.4. tabula / *Table 3.4*

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

Organiskās skābes / <i>Organic acids,</i>	Organisko skābju saturs (g 100 g ⁻¹ sausnas) rudzu plaucējuma paraugos / <i>Organic acid content (g 100 g⁻¹ dw) in rye scald samples</i>				
	RP0	RP12	RP24	RP36	RP48
Pienskābe / <i>Lactic acid</i>	0.27 $\pm$ 0.01c	2.83 $\pm$ 0.07b	3.74 $\pm$ 0.16a	3.85 $\pm$ 0.03a	3.72 $\pm$ 0.32a
Etiķskābe / <i>Acetic acid</i>	0.03 $\pm$ 0.01b	0.12 $\pm$ 0.02a	0.01 $\pm$ 0.00b	0.01 $\pm$ 0.00b	0.01 $\pm$ 0.00b

3.4. tabulas turpinājums / *Continuation of Table 3.4*

Organiskās skābes / <i>Organic acids,</i>	Organisko skābju saturs (g 100 g ⁻¹ sausnas) rudzu plaucējuma paraugos / <i>Organic acid content (g 100 g⁻¹ dw) in rye scald samples</i>				
	RP0	RP12	RP24	RP36	RP48
Propionskābe / <i>Propionic acid</i>	ND	ND	0.01 ± 0.00a	0.01 ± 0.00a	0.01 ± 0.00a
Sviestskābe / <i>Butyric acid</i>	0.09 ± 0.02b	0.18 ± 0.01a	0.01 ± 0.00c	0.01 ± 0.00c	0.01 ± 0.00c
Succinic acid / <i>Dzintarskābe</i>	0.07 ± 0.01b	0.16 ± 0.01a	0.14 ± 0.00a	0.14 ± 0.02a	0.13 ± 0.01a
Oxalic acid / <i>Skābenāskābe</i>	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.01a	0.03 ± 0.01a	0.04 ± 0.02a
Hīnskābe / <i>Quinic acid</i>	0.55 ± 0.03a	0.76 ± 0.07a	0.72 ± 0.16a	0.78 ± 0.13a	0.74 ± 0.21a
Vīnskābe / <i>Tartaric acid</i>	0.21 ± 0.02a	0.25 ± 0.03a	0.24 ± 0.06a	0.28 ± 0.06a	0.25 ± 0.06a
Ābolskābe / <i>Malic acid</i>	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. Pienkābes veidošanās raudzēšanas laikā izskaidro pH samazināšanos un kopējā titrējamā skābuma pieaugumu raudzētā plaucējumā.

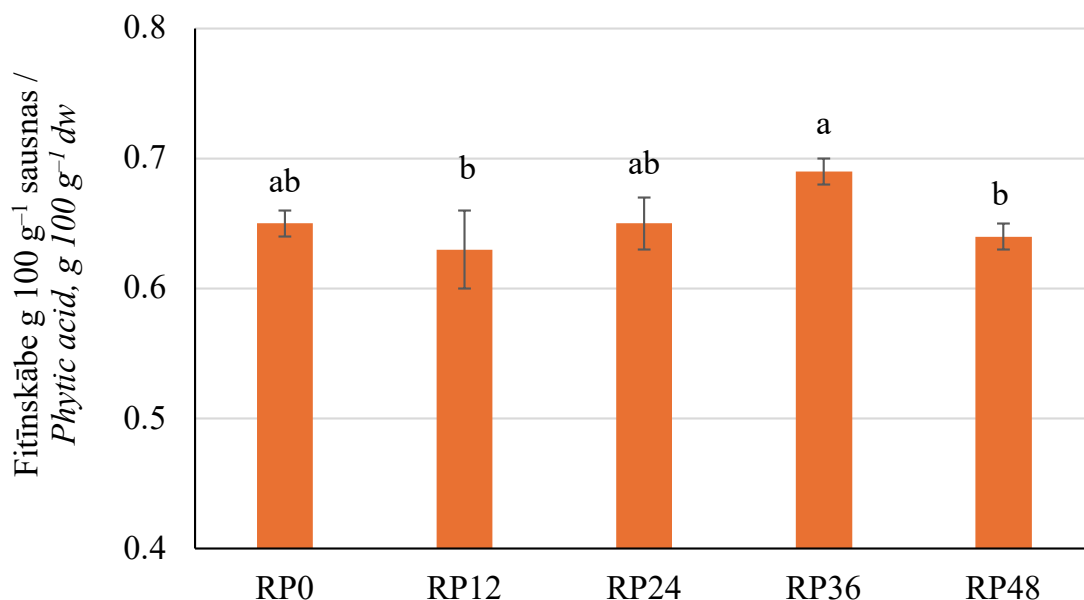
3.2.4. Raudzēšanas laika ietekme uz fitīnskābes saturu rudzu plaucējumā / *Effect of Fermentation Time on Phytic Acid Content in Rye Flour Scald*

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.

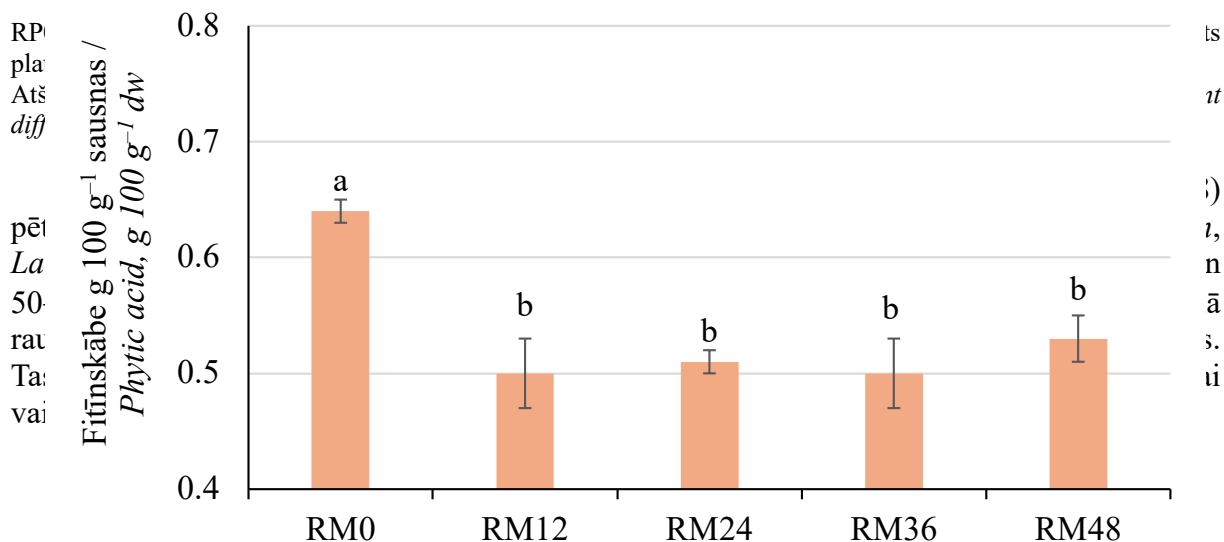
Fitīnskābes saturs rudzu plaucējumā pēc pārcukurošanas fāzes bija 0.65 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas (3.15. att.). Raudzēšanas laikā tika novērotas nelielas svārstības fitīnskābes saturā, taču būtisks tās samazinājums netika konstatēts. Plaucējuma raudzēšanas laikā strauja fitīnskābes noārdīšanās netika novērota, 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 termofīlām pienskābes baktērijām *L.bulgaricus*, *L.acidophylus* un *L.rossiae* vidē, kurā pH<3.5 40 °C temperatūrā.



3.15. att. **Fitīnskābes saturs neraudzētā un raudzētā plaucējuma** / Fig. 3.15. **Phytic Acid**

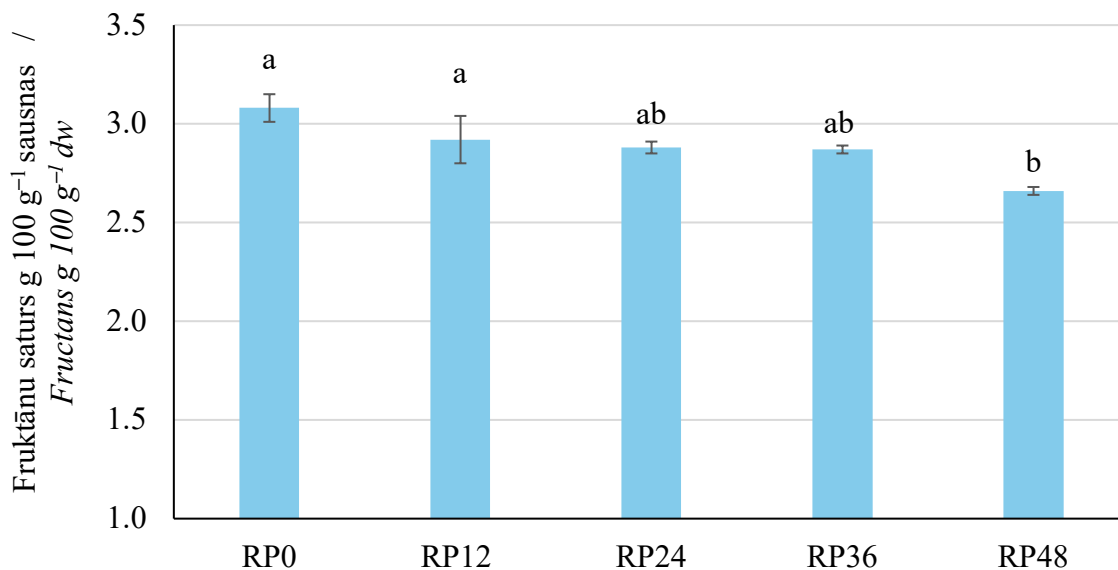


rezultātā, un tās intensitāte ir atkarīga no raudzēšanas apstākļiem un iesaistīto mikroorganismu metabolītiem.

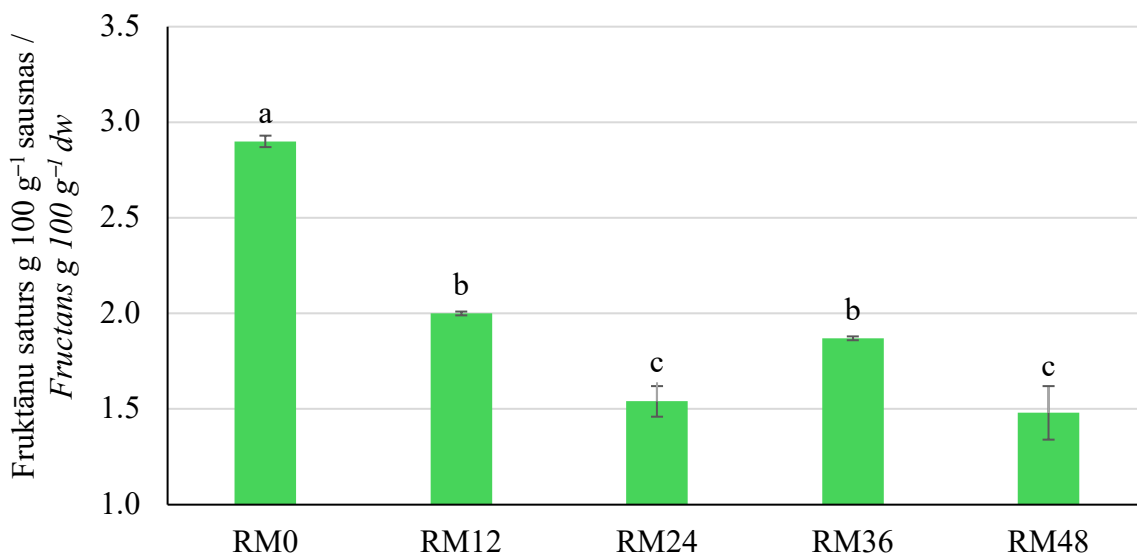
Fruktānu saturs rudzu miltos noteikts 3.31 ± 0.31 g 100 g⁻¹ sausas. Līdzīgu rezultātu konstatēja Schmidt & Sciruba (2021) rudzu pingraudu miltos, nosakot fruktānu saturu 3.35 g 100 g⁻¹ sausas. Andersson et al. (2009) pētījumā analizētas 18 pilngraudu rudzu šķirnes, kurās fruktānu saturs svārstījās no 3.6–4.6% sausnā.

Fruktānu saturs rudzu plaucējuma pēc pārcukurošanās fāzes noteikts 3.08 ± 0.07 g 100 g⁻¹ sausas (3.16. att.). Raudzēšanas laikā tika novērots pakāpenisks fruktānu satura samazinājums – pēc 12 stundām tas samazinājās līdz 2.92 ± 0.12 g uz 100 g⁻¹ sausas. 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.



3.16. att. **Fruktānu saturs neraudzētā un raudzētā plaucējumā atkarībā no raudzēšanas lauma** / Fig. 3.16. **Fructan Content in Unfarmed Seald and Seald Fermented far**



Rudzu maizes paraugos ar pievienotu sauso ieraugu (8%), kas izmantots tikai kā skābinātājs, lai samazinātu rudzu miltu amilāžu aktivitāti, noteikts augstāks fruktānu saturs ($2.3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) (Pejcz et al., 2024). Iegūtie rezultāti norāda, ka *L.delbrueckii* nepiemīt izteiktas fruktānu degradācijas īpašības, kas rudzu plaucējuma raudzēšanas laikā varētu nozīmīgi samazināt fruktānu daudzumu.

3.2. Nodaļas kopsavilkums / Summary of Chapter 3.2

Rudzu plaucējuma gatavošanas procesā norisinās būtiskas ķīmiskā sastāva un mikrobiotas pārmaiņas, kas tieši ietekmē tā bioķīmiskās īpašības un potenciāli – gala produkta īpašības. Raudzēšanas substrāts, temperatūra un ilgums nosaka dominējošo mikroorganismu sastāvu un vairošanās dinamiku, kā rezultātā to aktivitāte nosaka pH, skābuma, cukuru, organisko skābju un citu savienojumu izmaiņas.

Pētījumā konstatēts, ka plaucējuma raudzēšanas laikā dominē pienskābes baktērijas, īpaši *Lactobacillus delbrueckii*, kas nodrošina pienskābes veidošanos, pH samazinājumu un skābuma pieaugumu. Raugu vairošanās plaucējumā bija ierobežota, tādēļ tehnoloģija paredz, ka mīklas raudzēšanai tiek pievienots ieraugs – Ieraugs M, kurš satur vairāk raugus ($8.5 \pm 0.2 \log_{10} \text{KVV g}^{-1}$).

Cukuru satura izmaiņas ilgstošas raudzēšanas laikā norāda uz intensīvu mikroorganismu vielmaiņas darbību – tika novērots kopējo cukuru, īpaši glikozes un maltozes, relatīvi augsts atlikums, kā arī saharozes sadalīšanās. Vienlaikus tika novērota arī noteiktu cukuru pārveide un to satura palielinājums, ko var skaidrot ar cietes enzimatisko hidrolīzi. Kopējo cukuru augstais saturs plaucējumā pēc pārcukurošanās un raudzēšanas laikā norāda uz barības vides pieejamību plaucējuma pienskābes baktēriju un raugu metabolismam.

Raudzēšanas laikā pēc 12–24 h būtiski palielinās pienskābes saturs un paliek stabils līdz raudzēšanas beigām. Šīs izmaiņas ir saistītas ar *Lactobacillus delbrueckii* homofermentatīvajām īpašībām, kā arī iezīmē pH kritumu un titrējamā skābuma pieaugumu.

Lai arī literatūrā aprakstīta fitīnskābes noārdīšanās iespējamība raudzēšanas laikā, šajā pētījuma posmā tā būtiski nemainījās, iespējams, raudzēšanā iesaistīto mikroorganismu ierobežotās fitāzes aktivitātes dēļ. Arī fruktānu sadalīšanās bija mērena un norisinājās pakāpeniski, norādot uz *Lactobacillus delbrueckii* ierobežotu fruktānu hidrolītisko potenciālu.

Kopumā rezultāti parāda, ka plaucējuma raudzēšanas laikā notiek būtiskas cukuru satura izmaiņas un tiek ietekmēts pienskābes baktēriju producēto organisko skābju sastāvs un saturs. Tomēr pēc 24 h raudzēšanas šie rādītāji stabilizējas, un turpmāka raudzēšana līdz 48 h nerada būtiskas papildu izmaiņas ne cukuru, ne organisko skābju saturā. Tāpat netika novērota fruktānu un fitīnskābes satura samazināšanās raudzētā plaucējumā pēc 24 h, kas norāda uz mikroorganismu enzimatiskās aktivitātes ierobežojumu šajos procesos. Līdz ar to ilgstoši raudzēts plaucējums (24–48 h) ir uzskatāms par ķīmiski un mikrobioloģiski stabilu materiālu, kas piemērots rudzu maizes ražošanai un ļauj elastīgi pielāgot procesu dažādiem ražošanas apstākļiem un apjomiem.

During the preparation of rye scald, significant changes occur in its chemical composition and microbiota, directly affecting its biochemical properties and potentially the characteristics of the final product. The fermentation substrate, temperature, and duration determine the composition and growth dynamics of the dominant microorganisms, whose activity influences changes in pH, acidity, sugar content, organic acids, and other compounds.

*The study found that lactic acid bacteria, particularly *Lactobacillus delbrueckii*, dominated during scald fermentation, promoting lactic acid production, decreased pH, and increased acidity. Yeast propagation in the scald was limited; therefore, the technology includes the addition of a starter culture, Sourdough D, for dough fermentation, which contains a higher yeast count ($8.5 \pm 0.2 \log_{10} \text{CFU g}^{-1}$).*

Changes in sugar content during prolonged fermentation indicate intensive microbial metabolic activity – relatively high residual levels of total sugars, mainly glucose and maltose, were observed, along with sucrose degradation. Additionally, the transformation and accumulation of certain sugars were noted, which can be attributed to enzymatic starch hydrolysis. The high sugar content in the scald after saccharification and fermentation confirms the availability of nutrients for the metabolism of lactic acid bacteria and yeasts.

*Between 12 and 24 hours of fermentation, lactic acid content increased significantly and remained stable until fermentation's end. These changes are linked to the homofermentative properties of *Lactobacillus delbrueckii* and are accompanied by a pH decrease and an increase in titratable acidity.*

Although literature describes the potential for phytic acid degradation during fermentation, no significant change was observed at this study stage – likely due to the limited phytase activity of the involved microorganisms. Fructan degradation was also moderate and

occurred gradually, indicating the limited hydrolytic potential of *Lactobacillus delbrueckii* toward fructans.

The results show that scald fermentation significantly changes sugar content and affects the composition and concentration of organic acids produced by lactic acid bacteria. However, after 24 hours of fermentation, these indicators stabilize, and further fermentation up to 48 hours does not result in significant additional changes in sugar or organic acid content. Similarly, no further reduction in fructan or phytic acid content was observed in the fermented scald beyond 24 hours, indicating limited enzymatic activity of the microorganisms involved in these processes. Therefore, scald fermented for 24–48 hours can be considered chemically and microbiologically stable and suitable for rye bread production, offering flexibility in adapting the process to different production conditions and volumes.

3.3. Rudzu maizes kvalitātes novērtējums / Evaluation of Rye Bread Quality

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. Iepriekšējā nodaļā tika konstatēts, ka ilgstošas raudzēšanas laikā plaucējumā dominē *Lactobacillus delbrueckii*, kas veicina pH samazināšanos un pienskābes uzkrāšanos, taču ierobežoti ietekmē fitīnskābes un fruktānu degradāciju. Fruktānu saturs raudzēšanas laikā nedaudz samazinājās, bet fitīnskābes līmenis būtiski nemainījās, kas norāda uz plaucējuma mikrobiotas ierobežoto spēju veicināt šo savienojumu noārdīšanos.

Tāpat visos raudzēšanas laika posmos tika novērots augsts kopējo cukuru atlikums, īpaši maltozes un glikozes formā, kas saglabājās arī pēc ilgstošas raudzēšanas. Šis atlikums veido potenciāli aktīvu barības vidi, kas kopā ar organisko skābju klātbūtni var ietekmēt mikrobiotas darbību mīklas raudzēšanas laikā un vienlaikus veidot pamatu maizes garšas, aromāta un struktūras izmaiņām.

Lai gan plaucējums ir galvenā mīklas gatavošanas sastāvdaļa, rudzu maizes cepšanas procesā tam tiek pievienoti arī papildus rudzu milti un ieraugs ar aktīvu raugu darbību, kas var mainīt mīklas bioķīmiskos parametrus un ietekmēt gala produkta kvalitāti. Tāpēc ir būtiski izvērtēt, kā šī kompleksā sistēma – raudzēts plaucējums un tālākais mīklas raudzēšanas posms – ietekmē rudzu maizes ķīmisko sastāvu un sensorās īpašības.

Šajā nodaļā tiek analizēta gala produkta kvalitāte – rudzu maize, kas gatavota ar dažādu ilgumu raudzētiem plaucējumiem. Tiek vērtētas izmaiņas cukuru, organisko skābju, fitīnskābes un fruktānu saturā, kā arī veikta sensorā vērtēšana, lai noteiktu, kā raudzēšanas ilgums ietekmē maizes garšu, aromātu un struktūru.

3.3.1. Cukuru saturs rudzu maizes paraugos / Sugar Content in Rye Bread Samples

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 (3.3. tabula). Gatavojot mīklu, papildus tiek pievienoti rudzu pilngraudu milti – tajos esošie cukuri (kopējie cukuri 2.04 ± 0.03 g 100 g⁻¹ sausas) 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 3.5. tabulā.

Fruktozes saturs maizes paraugos pieauga, palielinoties plaucējuma raudzēšanas ilgumam, sākot no 0.37 ± 0.04 g 100 g⁻¹ sausnas RB0 un sasniedzot maksimumu 0.89 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas RB24. Glikozes saturs uzrādīja nebūtiskas ($p = 0.076$) svārstības raudzēšanas gaitā, ar visaugstāko saturu RM36 (0.56 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas) un zemāko saturu RM48 (0.43 ± 0.03 g 100 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.

3.5. tabula / Table 3.5

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 (g 100 g ⁻¹ sausnas) rudzu maizes paraugos / Content of sugars (g 100 g ⁻¹ 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.

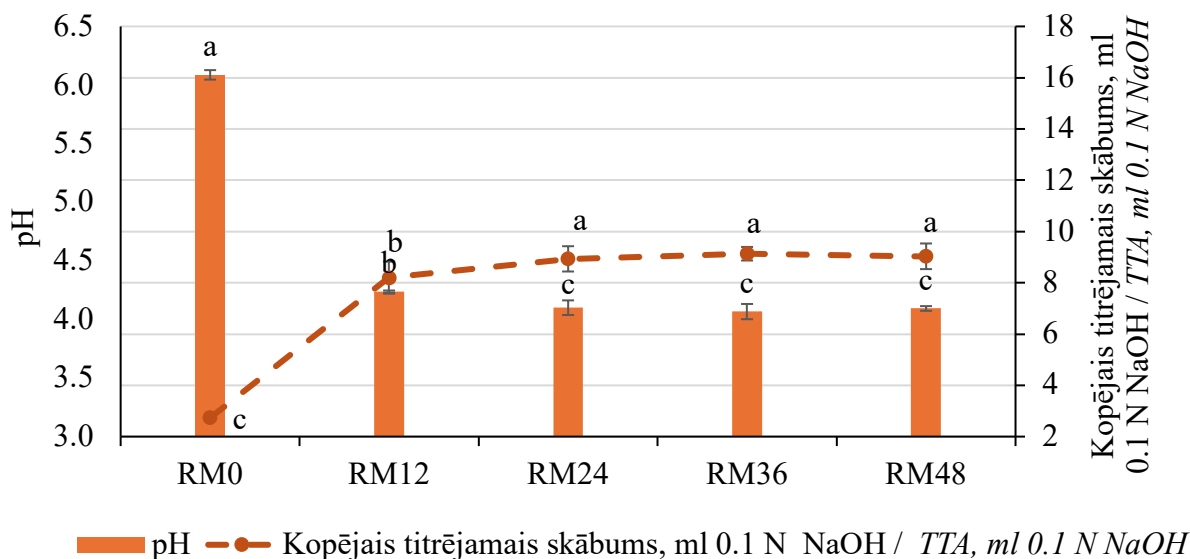
Plaucējuma raudzēšanas ilgums ietekmēja maizes cukuru profilu, īpaši attiecībā uz fruktozi un saharozi, savukārt maltozes un glikozes saturs saglabājas relatīvi stabils. Maizē ar neraudzētu plaucējumu konstatēts viszemākais fruktozes saturs, salīdzinot ar maizi, kas gatavota, izmantojot raudzētu plaucējumu. Fruktozes saturs maizē veidojies no mīklā pievienotiem miltiem. Tomēr pilngraudu miltos novērots zems fruktozes saturs (0.08 g 100 g⁻¹

sausnas). Taču var būt arī netieši fruktozes rašanās ceļi. Fruktoze var veidoties arī saharozes sadalīšanās ceļā invertāzes ietekmē. Mīklas raudzēšanas laikā iespējama fruktānu sadalīšanās, veidojot brīvu fruktozi. Abos minētajos gadījumos būtiska nozīme ir pienskābes baktēriju un raugu aktivitātei. Cukuru izmaiņas var skaidrot arī ar plaucējuma pH svārstībām, PB un raugu vairošanās intensitāti. 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.

3.3.2. Organisko skābju saturs rudzu maizē / *Organic Acid Content in Rye Bread*

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.

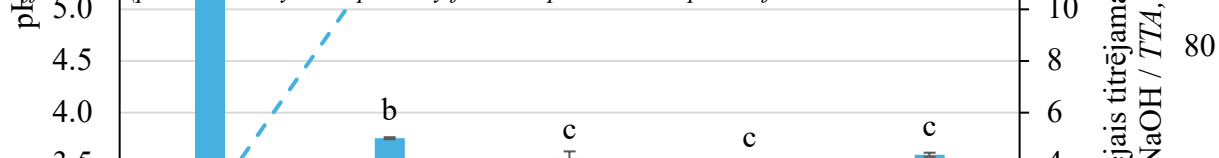
Maizes paraugiem tika novērota līdzīga skābuma izmaiņu tendence kā plaucējumā raudzēšanas laikā. Maizes paraugs RM0, kurā plaucējums netika raudzēts, uzrādīja augstāko pH 6.09 ± 0.04 un zemāko titrējamo skābumu 2.7 ± 0.12 ml 0.1 N NaOH (3.17. att.). Izmantojot 12 h raudzētu plaucējumu, rudzu maizes paraugu 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.



3.17. att. Rudzu maizes pH un kopējā titrējamā skābuma (ml 0.1 N NaOH) vērtības, izmantojot dažādu ilgumu raudzētu plaucējumu / *Fig 3.17. 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 plaucējuma 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 (3.6. tabula). Pienskābes saturs pieauga no $0.81 \pm 0.06 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas maizē ar neraudzētu plaucējumu (RM0) līdz $2.06 \pm 0.12 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas RM36, un turpmākas būtiskas ($p \leq 0.05$) izmaiņas RM48 ($2.00 \pm 0.13 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ sausnas) netika novērotas. Tomēr pienskābes saturs maizē bija zemāks nekā plaucējuma, 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.

3.6. tabula / Table 3.6

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

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.

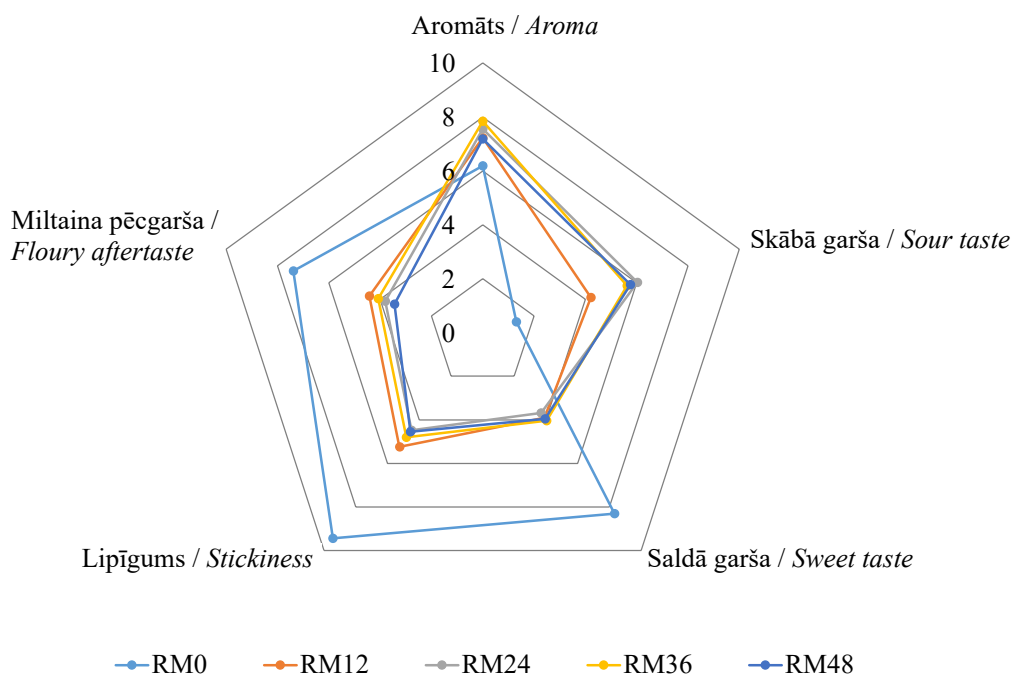
Atšķirīgi burti (a–c) norāda uz būtiskām atšķirībām ($p \leq 0.05$) starp paraugiem rindā / a–c indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$) in a row.

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.

3.3.3. Rudzu maizes sensorās novērtēšanas rezultāti, maizes gatavošanā izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu / *Sensory Evaluation Results of Rye Bread Prepared with Scalds Fermented for Different Durations*

Maizes paraugu (RM0, RM12, RM24, RM36 un RM48) sensorajā vērtēšanā tika analizētas izmaiņas aromāta, skābās garšas, saldās garšas, lipīguma un miltainās pēcgaršas intensitātē. 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 (3.18. att.).



3.18. att. Vidējais sensorās intensitātes novērtējums rudzu maizes paraugiem, kas gatavoti, izmantojot dažāda ilguma raudzētu plaucējumu / *Figure 3.18. 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.*

Rudzu maizes paraugam RM36 aromāta intensitāte bija visizteiktākā (7.84 ± 1.95), taču aromāta intensitātē nepastāv būtiska atšķirība arī starp RM12, RM24 un RM48 paraugiem. Tas norāda uz izteiktāku aromātu maizei ar ilgāk raudzētu plaucējumu, salīdzinot ar maizes aromātu, kura gatavota no neraudzēta plaucējuma (RM0, 6.19 ± 2.34).

Skābās garšas intensitāte palielinājās līdz ar raudzēšanas ilgumu, taču raudzējot 24 un vairāk stundas, būtiska atšķirība starp paraugiem vairs netika konstatēta. Vismazākā skābās garšas intensitāte tika konstatēta paraugam RM0 (1.31 ± 0.71), bet būtisks pieaugums bija vērojams paraugos, kas tika raudzēti 12 h (RM12, 4.22 ± 2.01) un 24 h (RM24, 6.03 ± 1.65). Starp RM24, RM36 un RM48 skābās garšas intensitātē netika konstatētas būtiskas ($p \leq 0.05$) atšķirības, kas norāda, ka raudzēšanas laika pagarināšana virs 24 stundām būtiski nepalielina skābumu un ka raudzēšanas process ir stabilizējies. Pēc organisko skābju profila rezultātiem, kur dominējošā bija pienskābe, tās saturs un kopējais organisko skābju saturs maizes paraugiem, kuriem izmantots 24 h un ilgāk raudzēts plaucējums, būtiski neatšķīrās. Tas var pamatot skābās garšas intensitātes stabilitāti starp paraugiem.

Salduma intensitāte bija visaugstākā kontroles paraugā (RM0, 8.31 ± 2.62) un pakāpeniski samazinājās līdz ar raudzēšanas ilguma palielināšanu, sasniedzot viszemāko saldās garšas intensitāti maizes paraugam, kas gatavots ar 48 h raudzētu plaucējumu (RM48, 3.95 ± 2.25). Salduma intensitātē nepastāvēja būtiska atšķirība starp maizes paraugiem, kuriem izmantots plaucējums, kas raudzēts 12 un vairāk stundas. Lai gan kopējais cukuru saturs maizes paraugos būtiski neatšķīrās (3.5. tabula), maltozes un saharozes saturs paraugiem, kur izmantots plaucējums, kas raudzēts 12 un vairāk stundas, samazinājās, ietekmējot arī saldās garšas intensitāti.

Lipīgums bija visizteiktākais maizes paraugam, kurā tika izmantots neraudzēts plaucējums (RM0, 9.44 ± 1.96) un raudzēšanas laikā samazinājās. Starp RM12, RM24, RM36 un RM48 lipīguma intensitātē nebija būtisku atšķirību.

Miltainās pēcgaršas izvērtējums parādīja, ka RM0 (7.38 ± 2.12) būtiski atšķīrās no pārējiem paraugiem. Tas norāda, ka raudzēšanas kopumā (12–48 h) samazināja miltainās pēcgaršas intensitāti, tādējādi uzlabojot maizes sensoro vērtējumu.

Plaucējuma cukuri kopā ar organiskajām skābēm ir pamats, kas veido rudzu maizes raksturīgo saldskābo garšu. Līdz ar to 24 h plaucējuma raudzēšanas ilgums var tikt uzskatīts par pietiekamu, lai panāktu līdzsvarotu un stabilu maizes saldās un skābās garšas intensitāti.

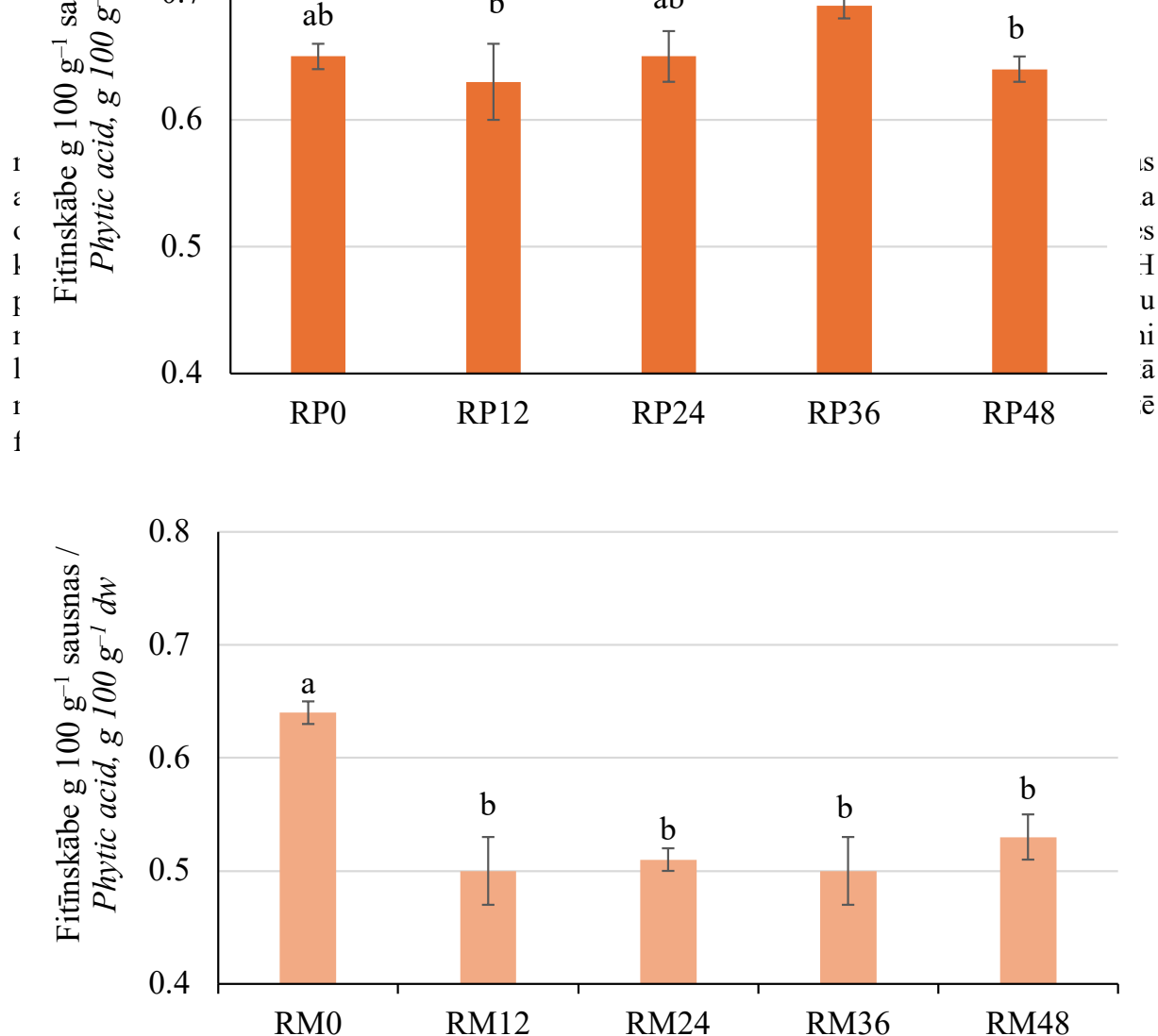
Sensoro īpašību intensitātes izpēte apstiprina, ka ilgstoša plaucējuma raudzēšana 24–48 h ilgumā būtiski nemaina rudzu maizes garšas un struktūras īpašības, kas liecina, ka šādu plaucējumu iespējams efektīvi izmantot stabila un prognozējama maizes gatavošanas procesa organizēšanai.

3.3.4. Fitīnskābes saturs maizes paraugos / *Phytic Acid Content in Bread Samples*

Maizes paraugos tika novērota būtiska ($p \leq 0.05$) fitīnskābes satura samazināšanās (3.19. 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



3.19. att. **Fitīnskābes saturs maizē ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu /**
Fig 3.19. 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 ($p \leq 0.05$).

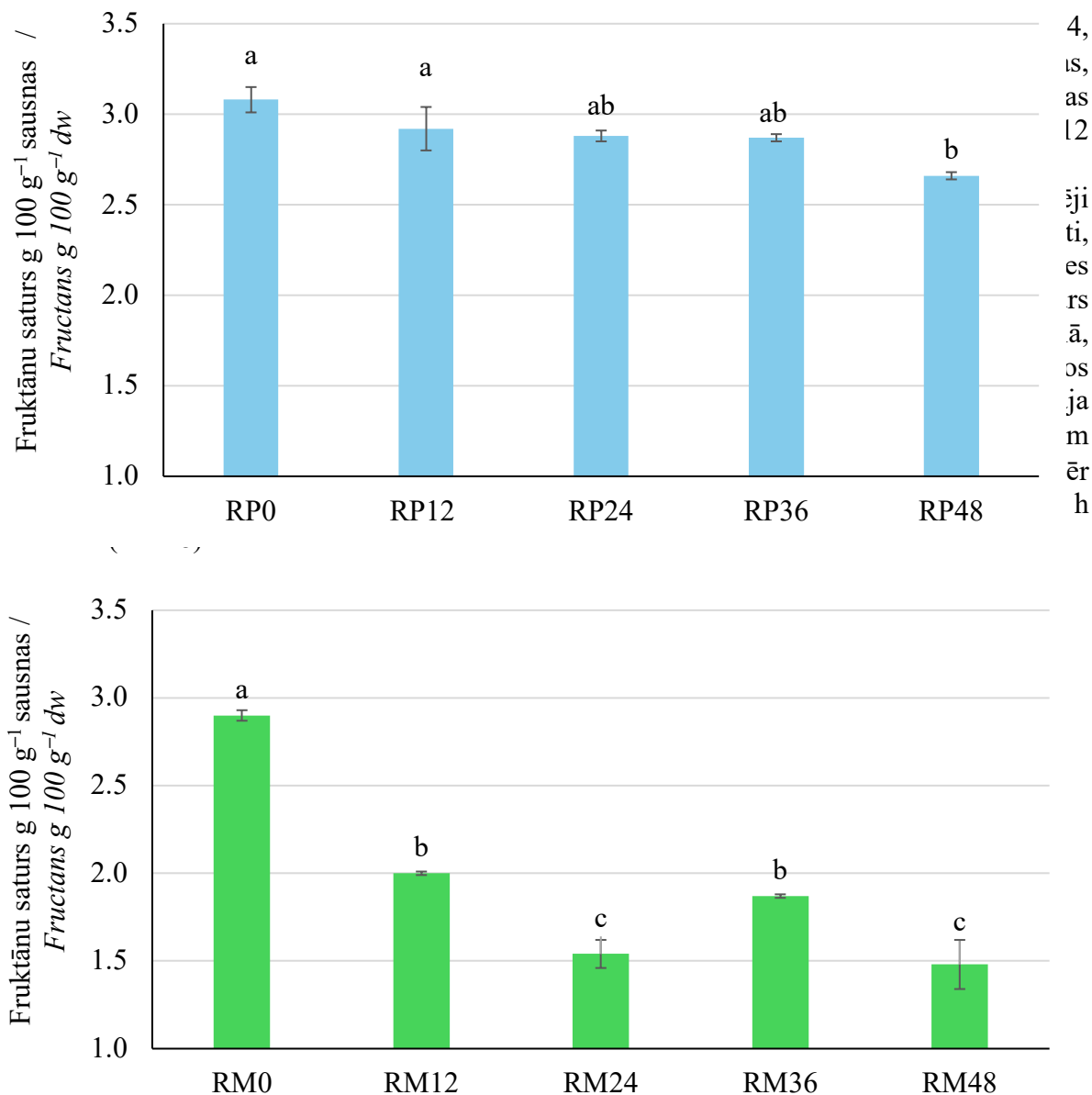
Fitīnskābes samazināšanās rudzu maizē ir cieši saistīta ar raudzēšanas procesā notiekošajām bioķīmiskajām pārmaiņām, kur izšķiroša nozīme ir gan ierauga mikrobiotas sastāvam un tās enzimatiskajām īpašībām, gan arī vides skābumam, kas ietekmē fitāzes enzīmu aktivitāti un līdz ar to fitātu noārdīšanās efektivitāti. 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.

3.3.5. Fruktānu saturs maizes paraugos / Fructan Content in Bread Samples

Fruktāni ietekmē rudzu maizes uzturvērtību un potenciālo ietekmi uz gremošanas sistēmu. Rudzu maizē fruktānu saturs var būtiski atšķirties atkarībā no izvēlēta maizes gatavošanas tehnoloģiskā procesa (raudzēts plaucējums, mīklas raudzēšana ar ieraugu, mīklas raudzēšana ar raugu u.c.), no graudu šķirnes, no miltu veida, gan mīklas sagatavošanas un raudzēšanas apstākļiem. 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 (3.20. att.), kas tika gatavota no neraudzēta rudzu plaucējuma, bija 2.90 ± 0.03 g 100 g⁻¹ sausnas. Tika novērots būtisks ($p \leq 0.05$) fruktānu satura samazinājums, un, izmantojot 12 h raudzētu plaucējumu, tas samazinājās līdz 2.00 ± 0.01 g 100 g⁻¹ sausnas. Palielinoties plaucējuma raudzēšanas ilgumam, fruktānu saturs



3.20. att. **Fruktānu saturs maizē ar dažādu plaucējuma raudzēšanas ilgumu /**

Fig 3.20. 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. Salīdzinājumam, Andersson et al. (2009) pētījumā noteikto fruktānu saturs bija 1.9% sausnas ar raugu raudzētā rudzu sausmaizītē un 3.4% sausnas ar ieraugu gatavotā rudzu maizē. Līdzīgi Schmidt & Marcus (2021) pētījumā, kur tika analizēti pilngraudu rudzu miltu maizes paraugi, kas raudzēti, izmantojot trīs dažādas tehnoloģijas, fruktānu saturs variēja 1.91–1.94 g 100 g⁻¹ sausnas. Savukārt Whelan et al. (2011) pētījumā, kur tika analizētas komerciāli iegādājamas maizes, tika noteikts furktānu saturs rudzu maizē 3.31 g 100 g⁻¹ sausnas, bet Karppinen (2003) pētījumā noteikts 2.1–2.8 g 100 g⁻¹ sausnas dažādās komercālās rudzu maizēs. Šie salīdzinājuma dati apstiprina, ka raudzēšanas ilgums, ierauga mikroorganismu sastāvs un izmantojamo miltu ķīmiskais sastāvs ir nozīmīgi faktori, kas ietekmē fruktānu saturu rudzu maizē.

3.3. Nodaļas kopsavilkums / *Summary of Chapter 3.3*

Šajā nodaļā apskatīta rudzu plaucējuma raudzēšanas ietekme uz rudzu maizes kvalitāti. Pētījumā konstatēts, ka rudzu maizē, kuras gatavošanā izmantots 12–24 h raudzēts plaucējums, notiek būtiskas ($p \leq 0.05$) cukuru un organisko skābju satura izmaiņas. Maizē, kas gatavota ar 24 h raudzētu plaucējumu, pienskābes saturs palielinājās līdz 1.19 ± 0.13 g 100 g⁻¹, un stabilizējās, izmantojot 24–48 h raudzētu plaucējumu. Fruktozes saturs būtiski palielinājās, savukārt saharozes saturs pakāpeniski samazinājās, ja izmantots 12–24 h raudzēts plaucējums. Maizes sensoro īpašību rādītāji parādīja, ka plaucējums, kas raudzēts 24 līdz 48 h nodrošina stabili nemainīgu maizes garšas profilu.

Fitīnskābes saturs rudzu maizē samazinājās, ja tika izmantots plaucējums pēc 12 h raudzēšanas, salīdzinot ar maizi, kas gatavota no neraudzēta plaucējuma. Tomēr ilgāks raudzēšanas laiks (24–48 h) vairs nenodrošināja papildu samazinājumu. Fruktānu saturs rudzu maizē samazinājās, izmantojot 12–24 stundām raudzētu plaucējumu, taču plaucējuma raudzēšanas ilguma palielināšana līdz 36 vai 48 stundām nedeva papildu ietekmi.

Kopumā rezultāti liecina, ka 24 h ilga plaucējuma raudzēšana ir optimāla, lai iegūtu maizi ar stabilu ķīmisko sastāvu un sensorajām īpašībām. Ilgāks plaucējuma raudzēšanas laiks (24–48 h) nodrošina tehnoloģiskā procesa noturību un elastību, taču nerada būtiskas izmaiņas fitīnskābes un fruktānu saturā. Tas apstiprina, ka stabils hidrolīzes process un raudzēta plaucējuma izmantošana ir nozīmīga rudzu maizes kvalitātes uzlabošanā. Savukārt ilgstoša raudzēšana (24–48 h) nerada papildus izmaiņas ne maizes sensorajās īpašībās, ne uzturvērtību raksturojošajos rādītājos, tādējādi to var uzskatīt par stabilu un pielāgojamu materiālu rudzu maizes gatavošanā. Atkarībā no ražošanas apstākļiem un nepieciešamajiem apjomiem vienlīdz labi izmantojams ir gan 24 h, gan 36 h, gan 48 h raudzēts plaucējums.

This chapter examines the impact of scald fermentation duration on the quality of rye bread. The study found that significant changes ($p \leq 0.05$) in the content of sugars and organic acids occurred in rye bread prepared with scald fermented for 12–24 hours. In bread made with a 24-hour fermented scald, lactic acid content increased to 1.19 ± 0.13 g 100 g⁻¹ and stabilized when using scald fermented for 24–48 hours. Fructose content increased significantly, while sucrose content gradually decreased when a 12–24 hour fermented scald was used. Sensory evaluation results indicated that scald fermented for 24 to 48 hours ensured a consistently stable flavor profile of the bread.

Phytic acid content in rye bread decreased when a scald fermented for 12 hours was used, compared to bread prepared with unfermented scald. However, extending the fermentation time to 24–48 hours did not result in further reduction. Fructan content in rye bread also decreased with 12–24 hour fermented scald, but increasing the fermentation duration to 36 or 48 hours had no additional effect.

Overall, the results indicate that a 24-hour scald fermentation is optimal for producing rye bread with a stable chemical composition and favorable sensory properties. A longer fermentation time (24–48 hours) contributes to process stability and flexibility, but does not

lead to significant further changes in phytic acid or fructan content. This confirms that a stable hydrolysis process and the use of fermented scald are important for improving rye bread quality. While fermentation plays a key role, prolonged fermentation (24–48 hours) does not result in additional changes in the sensory characteristics or nutritional value indicators of the bread, and thus can be considered a stable and adaptable material for rye bread production. Depending on production conditions and volume, scald fermented for 24, 36, or 48 hours can be used equally effectively.

SECINĀJUMI / *CONCLUSIONS*

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 enzimatisko 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 mazies 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 / *RECOMMENDATIONS*

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 ieteicams 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.

LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES

1. AACC. (2000a). *AACC 02-31.01 Titratable Acidity*. AACC: St Paul, MN, USA.
2. AACC. (2000b). *AACC 02-52:1999 Hydrogen-Ion Activity (pH) - Electrometric Method*. AACC: St Paul, MN, USA.
3. AACC. (2000c). *AACC 22-02.01 Measurement of alpha-Amylase in Plant and Microbial Materials Using the Ceraphla Method*. AACC: St Paul, MN, USA.
4. AACC. (2000d). *AACC 32-32.01 Measurement of Total Fructan in Foods by an Enzymatic/Spectrophotometric Method*. AACC: St Paul, MN, USA.
5. AACC. (2000e). *AACC 56-81.03 Determination of Falling Number. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. AACC: St Paul, MN, USA.
6. Akamine, I. T., Mansoldo, F. R. P., & Vermelho, A. B. (2023). Probiotics in the Sourdough Bread Fermentation: Current Status. *Fermentation*, 9, 90. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020090>
7. Andersson, R., Fransson, G., Tietjen, M., & Åman, P. (2009). Content and molecular-weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 2004–2008. <https://doi.org/10.1021/jf801280f>
8. Aprodu, I., & Banu, I. (2017). Milling, functional and thermo-mechanical properties of wheat, rye, triticale, barley and oat. *Journal of Cereal Science*, 77, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.07.009>
9. Arora, K., Ameer, H., Polo, A., Di Cagno, R., Rizzello, C. G., & Gobbetti, M. (2021). Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: A systematic review. *Trends in Food Science and Technology*, 108, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.008>
10. Ask, L., Nair, B., & Asp, N. G. (1991). Effect of scalding procedures on the degradation of starch in rye products. *Journal of Cereal Science*, 13, 15–26. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80024-6](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80024-6)
11. Autio, K., Härkönen, H., Parkkonen, T., Frigård, T., Poutanen, K., Siika-aho, M., & Åman, P. (1996). Effects of purified endo- β -xylanase and endo- β -glucanase on the structural and baking characteristics of rye doughs. *LWT - Food Science and Technology*, 29(1), 18–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0003>
12. Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Dziekońska-Kubczak, U., Patelski, P., & Strak, E. (2016). Fermentation results and chemical composition of agricultural distillates obtained from rye and barley grains and the corresponding malts as a source of amylolytic enzymes and starch. *Molecules*, 21, 1320. <https://doi.org/10.3390/molecules21101320>
13. Bangar, S. P., Ashogbon, A. O., Singh, A., Chaudhary, V., & Whiteside, W. S. (2022). Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. *Carbohydrate Polymers*, 287, 119265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119265>
14. Barrera, G. N., Tadini, C. C., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2016). Use of alpha-amylase and amyloglucosidase combinations to minimize the bread quality problems caused by high levels of damaged starch. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3675–3684. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2337-2>
15. Bartkiene, E., Lele, V., Ruzauskas, M., Domig, K. J., Starkute, V., Zavistanaviciute, P., Bartkevics, V., Pugajeva, I., Klupsaite, D., Juodeikiene, G., Mickiene, R., & Rocha, J. M. (2020). Lactic acid bacteria isolation from spontaneous sourdough and their characterization including antimicrobial and antifungal properties evaluation. *Microorganisms*, 8, 64. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010064>
16. Bellini, M., Tonarelli, S., Nagy, A. G., Pancetti, A., Costa, F., Ricchiuti, A., de Bortoli, N., Mosca, M., Marchi, S., & Rossi, A. (2020). Low FODMAP diet: evidence, doubts, and hopes. *Nutrients*, 12, 148. <https://doi.org/10.3390/nu12010148>
17. Bera, S., Sabikhi, L., & Singh, A. K. (2018). Assessment of malting characteristics of different Indian barley cultivars. *Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 704–711. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2981-1>

18. Bondia-Pons, I., Aura, A. M., Vuorela, S., Kolehmainen, M., Mykkänen, H., & Poutanen, K. (2009). Rye phenolics in nutrition and health. *Journal of Cereal Science*, 49(3), 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.01.007>
19. Borowska, M., Ispiryan, L., Neylon, E., Sahin, A. W., Murphy, C. P., Zannini, E., Arendt, E. K., & Coffey, A. (2023). Screening and Application of Novel Homofermentative Lactic Acid Bacteria Results in Low-FODMAP Whole-Wheat Bread. *Fermentation*, 9, 336. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040336>
20. Brinch-Pedersen, H., Madsen, C. K., Holme, I. B., & Dionisio, G. (2014). Increased understanding of the cereal phytase complement for better mineral bio-availability and resource management. *Journal of Cereal Science*, 59, 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.003>
21. Brites, C. M., Santos, C. A. L. Dos, Bagulho, A. S., & Beirão-Da-Costa, M. L. (2008). Effect of wheat puroindoline alleles on functional properties of starch. *European Food Research and Technology*, 226, 1205–1212. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0711-z>
22. Buksa, K., Nowotna, A., Praznik, W., Gambuś, H., Ziobro, R., & Krawontka, J. (2010). The role of pentosans and starch in baking of wholemeal rye bread. *Food Research International*, 43(8), 2045–2051. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.06.005>
23. Buksa, K., Ziobro, R., Nowotna, A., & Gambuś, H. (2013). The influence of native and modified arabinoxylan preparations on baking properties of rye flour. *Journal of Cereal Science*, 58, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.04.007>
24. Calabrese, F. M., Ameer, H., Nikoloudaki, O., Celano, G., Vacca, M., Junior, W. Jfl., Manzari, C., Vertè, F., Di Cagno, R., Pesole, G., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2022). Metabolic framework of spontaneous and synthetic sourdough metacommunities to reveal microbial players responsible for resilience and performance. *Microbiome*, 10, 148. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01301-3>
25. Cannon, A. E., Marston, E. J., Kiszonas, A. M., Hauvermale, A. L., & See, D. R. (2022). Late-maturity α -amylase (LMA): exploring the underlying mechanisms and end-use quality effects in wheat. *Planta*, 255, 2. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03749-3>
26. Caporaso, J. G., Lauber, C. L., Walters, W. A., Berg-Lyons, D., Lozupone, C. A., Turnbaugh, P. J., Fierer, N., & Knight, R. (2011). Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(1), 4516–4522. <https://doi.org/10.1073/pnas.1000080107>
27. Cardoso, R. V. C., Fernandes, Â., Heleno, S. A., Rodrigues, P., González-Paramás, A. M., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). Physicochemical characterization and microbiology of wheat and rye flours. *Food Chemistry*, 280, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.063>
28. Charmier, L. M. J., McLoughlin, C., & McCleary, B. V. (2021). Diastatic power and maltose value: a method for the measurement of amylolytic enzymes in malt. *Journal of the Institute of Brewing*, 127, 327–344. <https://doi.org/10.1002/jib.665>
29. Cizekiene, D., Jagelaviciute, J., Stankevicius, M., & Maruska, A. (2020). Thermophilic lactic acid bacteria affect the characteristics of sourdough and whole-grain wheat bread. *Food Bioscience*, 38(October), 100791. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100791>
30. Colin, W., & Bushuk, W. (2017). Rye: Grain-Quality Characteristics and Management of Quality Requirements. In *Cereal Grains: Assessing and Managing Quality: Second Edition* (Second Edi, pp. 153–178). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100719-8.00009-7>
31. Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2002). Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread-making. *Journal of Cereal Science*, 35(3), 225–243. <https://doi.org/10.1006/jcsc.2001.0433>
32. Curtis, T. Y., Powers, S. J., Balagiannis, D., Elmore, J. S., Mottram, D. S., Parry, M. A. J., Rakszegi, M., Bedö, Z., Shewry, P. R., & Halford, N. G. (2010). Free amino acids and

- sugars in rye grain: Implications for acrylamide formation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(3), 1959–1969. <https://doi.org/10.1021/jf903577b>
33. De Vuyst, L., Harth, H., Van Kerrebroeck, S., & Leroy, F. (2016). Yeast diversity of sourdoughs and associated metabolic properties and functionalities. *International Journal of Food Microbiology*, 239, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.07.018>
 34. De Vuyst, L., & Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science and Technology*, 16, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>
 35. De Vuyst, L., Van Kerrebroeck, S., & Leroy, F. (2017). Microbial Ecology and Process Technology of Sourdough Fermentation. *Advances in Applied Microbiology*, 100, 49–160. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2017.02.003>
 36. Deleu, L. J., Lemmens, E., Redant, L., & Delcour, J. A. (2020). The major constituents of rye (*Secale cereale* L.) flour and their role in the production of rye bread, a food product to which a multitude of health aspects are ascribed. *Cereal Chemistry*, 97(4), 739–754. <https://doi.org/10.1002/cche.10306>
 37. Donmez, D., Pinho, L., Patel, B., Desam, P., & Campanella, O. H. (2021). Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation. *Current Opinion in Food Science*, 39, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.018>
 38. Dziki, D. (2022). Rye Flour and Rye Bran: New Perspectives for Use. *Processes*, 10, 293. <https://doi.org/10.3390/pr10020293>
 39. EFSA. (2010). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA Journal*, 8(3), 1462. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1462>
 40. EFSA. (2012). Update on acrylamide levels in food from monitoring years 2007 to 2010. *EFSA Journal*, 10(10), 2938. <https://doi.org/https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2938>
 41. Ferry, A. L., Hort, J., Mitchell, J., Lagarrigue, S., & Vallès-Pàmies, B. (2005). Effect of amylase on starch paste viscosity and its implications for flavour perception. *Journal of Texture Studies*, 35, 511–524. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2004.35503.x>
 42. Gailite, A., Gaile, A., Gaile, I., Voronova, A., Veinberga, I., Kokare, A., & Rungis, D. E. (2013). Genotypic assessment of the Latvian rye (*Secale cereale* L.) collection. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 67(3), 264–267. <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0046>
 43. Gänzle, M. G. (2014). Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*, 37, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.007>
 44. Gänzle, M. G. (2015). Lactic metabolism revisited: Metabolism of lactic acid bacteria in food fermentations and food spoilage. *Current Opinion in Food Science*, 2, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.03.001>
 45. Gänzle, M. G., & Follador, R. (2012). Metabolism of oligosaccharides and starch in lactobacilli: A review. *Frontiers in Microbiology*, 3, 340. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00340>
 46. Gänzle, M. G., Loponen, J., & Gobetti, M. (2008). Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality. *Trends in Food Science and Technology*, 19(10), 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.002>
 47. Gänzle, M. G., Vermeulen, N., & Vogel, R. F. (2007). Carbohydrate, peptide and lipid metabolism of lactic acid bacteria in sourdough. *Food Microbiology*, 24, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.006>
 48. Gao, Q., Liu, C., & Zheng, X. (2018). Effect of heat treatment of rye flour on rye-wheat steamed bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 1109–1119. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13662>
 49. García-Estapa, R. M., Guerra-Hernández, E., & García-Villanova, B. (1999). Phytic acid content in milled cereal products and breads. *Food Research International*, 32(3), 217–221. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00092-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00092-7)

50. Georg-Kraemer, J. E., Mundstock, E. C., & Cavalli-Molina, S. (2001). Developmental Expression of Amylases During Barley Malting. *Journal of Cereal Science*, 33(3), 279–288. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2001.0367>
51. Gomand, S. V., Verwimp, T., Goesaert, H., & Delcour, J. A. (2011). Structural and physicochemical characterisation of rye starch. *Carbohydrate Research*, 346, 2727–2735. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2011.09.024>
52. Göttlich, M., Brown, J. A., & Brandt, M. J. (2023). Traditional Breads from Germany. In M. Garcia-Vaquero, K. Pastor, G. E. Orhun, A. McElhatton, & J. M. F. Rocha (Eds.), *Traditional European Breads: An Illustrative Compendium of Ancestral Knowledge and Cultural Heritage* (pp. 115–136). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23352-4_6
53. Halford, N. G., Curtis, T. Y., Chen, Z., & Huang, J. (2015). Effects of abiotic stress and crop management on cereal grain composition: Implications for food quality and safety. *Journal of Experimental Botany*, 66(5), 1145–1156. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru473>
54. Hansen, H. B., Rasmussen, C. V., Bach Knudsen, K. E., & Hansen, Å. (2003). Effects of genotype and harvest year on content and composition of dietary fibre in rye (*Secale cereale* L.) grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(1), 76–85. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1284>
55. Haros, M., Bielecka, M., Honke, J., & Sanz, Y. (2008). Phytate-Degrading Activity in Lactic Acid Bacteria. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58(1), 33–40.
56. He, Y., Lin, Y. L., Chen, C., Tsai, M. H., & Lin, A. H. M. (2019). Impacts of Starch and the Interactions Between Starch and Other Macromolecules on Wheat Falling Number. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(3), 641–654. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12430>
57. Hernández-Carapia, M. Á., Escalona-Buendía, H. B., & Verde-Calvo, J. R. (2021). Influence of temperature and germination time on diastatic power of blue and red maize (*Zea mays* L.) malts. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 33(1), 56–66. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2021.v33.i1.2352>
58. Hrušková, M., Švec, I., & Kučerová, I. (2003). Effect of malt flour addition on the rheological properties of wheat fermented dough. *Czech Journal of Food Sciences*, 21(6), 210–218. <https://doi.org/10.17221/3500-cjfs>
59. Hübner, F., Schehl, B. D., Gebruers, K., Courtin, C. M., Delcour, J. A., & Arendt, E. K. (2010). Influence of germination time and temperature on the properties of rye malt and rye malt based worts. *Journal of Cereal Science*, 52(1), 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.005>
60. ICC. (1992). *ICC 126/1 Method for using the Brabender Amylograph*. International Association for Cereal Science and Technology. <https://icc.or.at/icc-standards/standards-overview/126-1-standard-method>
61. ICC. (2011). *ICC 173 Whole Meal and Flour from T.aestivum. Determination of Rheological Behavior as a Function of Mixing and Temperature Increase*. <https://icc.or.at/icc-standards/standards-overview/126-1-standard-method>
62. Ikram, A., Saeed, F., Arshad, M. U., Afzaal, M., & Anjum, F. M. (2021). Structural and nutritional portrayal of rye-supplemented bread using fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. *Food Science and Nutrition*, 9, 6314–6321. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2592>
63. ISO. (1998). *ISO 15214:1998 Microbiology of food and animal feeding stuffs. Horizontal method for the enumeration of mesophilic lactic acid bacteria-Colony count technique at 30 degrees C*. ISO: Geneva, Switzerland, 1998.
64. ISO. (2003). *ISO 4121 Sensory analysis-Guidelines for the use of quantitative response scales*. ISO: Geneva, Switzerland, 2003.
65. ISO. (2007). *ISO 8589:2007 Sensory analysis-General Guidance for design of test rooms*. ISO: Geneva, Switzerland, 2007.

66. ISO. (2008). *ISO 21527 Microbiology of food and animal feeding stuffs. Horizontal method for the enumeration of yeasts and molds*. ISO: Geneva, Switzerland, 2008.
67. ISO. (2009). *ISO 11133-1:2009 Microbiology of food and animal feeding stuffs-Guidelines on preparation and production of culture media*. ISO: Geneva, Switzerland, 2009.
68. ISO. (2013). *ISO 17718:2013 Wholemeal and flour from wheat (Triticum aestivum L.). Determination of rheological behaviour as a function of mixing and temperature increase*. ISO: Geneva, Switzerland, 2013.
69. ISO. (2017). *ISO 6887-1:2017 Microbiology of the food chain-Preparation of test samples, initial suspension and decimal dilutions for microbiological examination*. ISO: Geneva, Switzerland, 2017.
70. ISO. (2024). *ISO 7218:2024 Microbiology of the food chain — General requirements and guidance for microbiological examinations*. ISO: Geneva, Switzerland, 2024.
71. Ispiryan, L., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2022). FODMAP modulation as a dietary therapy for IBS: Scientific and market perspective. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1491–1516. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12903>
72. Jaksics, E., Németh, R., Farkas, A., Horváth, R., Dúzs, D., Drozdik, Á. A., Csányi, B., Bidló, G., Simon, K., & Tömösközi, S. (2022). Comparative compositional and functional characterisation of rye varieties and novel industrial milling fractions. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 4463–4472. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15780>
73. Jonsson, K., Andersson, R., Bach Knudsen, K. E., Hallmans, G., Hanhineva, K., Katina, K., Kolehmainen, M., Kyrø, C., Langton, M., Nordlund, E., Lærke, H. N., Olsen, A., Poutanen, K., Tjønneland, A., & Landberg, R. (2018). Rye and health - Where do we stand and where do we go? *Trends in Food Science and Technology*, 79(May), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.018>
74. Karppinen, S., Myllymäki, O., Forssell, P., & Poutanen, K. (2003). Fructan content of rye and rye products. *Cereal Chemistry*, 80(2), 168–171. <https://doi.org/10.1094/CCEM.2003.80.2.168>
75. Kaur, P., Singh Sandhu, K., Singh Purewal, S., Kaur, M., & Kumar Singh, S. (2021). Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits. *Food Research International*, 150, 110769. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110769>
76. Khubber, S., Marti-Quijal, F. J., Tomasevic, I., Remize, F., & Barba, F. J. (2022). Lactic acid fermentation as a useful strategy to recover antimicrobial and antioxidant compounds from food and by-products. *Current Opinion in Food Science*, 43, 189–198. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2021.11.013>
77. Klava, D., Kunkulberga, D., Duka, G., & Murniece, R. (2023). Traditional latvian Sourdough rye bread. In M. Garcia-Vaguero, K. Pastor, G. E. Orhun, A. McElhatton, & J. M. F. Rocha (Eds.), *Traditional European Breads: An Illustrative Compendium of Ancestral Knowledge and Cultural Heritage*. Switzerland: Springer Nature AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23352-4>
78. Kleerebezem, M., & Hugenholtz, J. (2003). Metabolic pathway engineering in lactic acid bacteria. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(2), 232–237. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00033-8)
79. Klupsaite, D., Starkute, V., Zokaityte, E., Cernauskas, D., Mockus, E., Kentra, E., Sliazaite, R., Abramaviciute, G., Sakaite, P., Komarova, V., Tatarunaite, I., Radziune, S., Gliubiciute, P., Zimkaite, M., Kuncė, J., Avizienyte, S., Povilaityte, M., Sokolova, K., Rocha, J. M., ... Bartkiene, E. (2023). The contribution of scalded and scalded-fermented rye wholemeal flour to quality parameters and acrylamide formation in semi-wheat-rye bread. *Foods*, 12, 937. <https://doi.org/10.3390/foods12050937>
80. Koj, K., & Pejcz, E. (2023). Rye Dietary Fiber Components upon the Influence of Fermentation Inoculated with Probiotic Microorganisms. *Molecules*, 28, 1912. <https://doi.org/10.3390/molecules28041910>

81. Kozlinskis, E., Skudra, L., Rakcejeva, T., & Kunkulberga, D. (2010). Changes in the chemical and microbiological properties of spontaneous rye sourdough during fermentation. *LLU Raksti*, 25(320), 67–77.
82. Kulathunga, J., & Simsek, S. (2024). Stone milling conditions and starter culture source influence phytic acid content and antioxidant activity in whole-grain sourdough bread. *Cereal Chemistry*, 101(2), 313–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cche.10755>
83. Kulp, K., & Lorenz, K. (2003). *Handbook of Dough Fermentations*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. <https://doi.org/10.1201/9780203911884>
84. Kunkulberga, D. (1999). *Pētījumi par rudzu maizes kvalitātes uzlabošanas iespējām: disertācijas kopsavilkums Dr.inž.zinātniskā grāda iegūšanai*. LLU.
85. Kunkulberga, D., Linina, A., Kronberga, A., Kokare, A., & Lenenkova, I. (2017). Grain quality of winter rye cultivars grown in Latvia. *Baltic Conference on Food Science and Technology FOODBALT "Food Science Technology in a Changing World,"* 121–125. <https://doi.org/10.22616/foodbalt.2017.015>
86. Kunkulberga, D., & Segliņš, V. (2010). *Maizes ražošanas tehnoloģija*. RTU Izdevniecība.
87. Kunkulberga Daiga, & Segliņš Valdis. (2010). *Maizes ražošanas tehnoloģija*. RTU Izdevniecība.
88. Laatikainen, R., Jalanka, J., Loponen, J., Hongisto, S. M., Hillilä, M., Koskenpato, J., Korpela, R., & Salonen, A. (2019). Randomised clinical trial: Effect of low-FODMAP rye bread versus regular rye bread on the intestinal microbiota of irritable bowel syndrome patients: Association with individual symptom variation. *BMC Nutrition*, 5, 12. <https://doi.org/10.1186/s40795-019-0278-7>
89. Laatikainen, R., Koskenpato, J., Hongisto, S. M., Loponen, J., Poussa, T., Hillilä, M., & Korpela, R. (2016). Randomised clinical trial: low-FODMAP rye bread vs. regular rye bread to relieve the symptoms of irritable bowel syndrome. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 44(5), 460–470. <https://doi.org/10.1111/apt.13726>
90. Leenhardt, F., Levrat-Verny, M. A., Chanliaud, E., & Rémésy, C. (2005). Moderate decrease of pH by sourdough fermentation is sufficient to reduce phytate content of whole wheat flour through endogenous phytase activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 98–102. <https://doi.org/10.1021/jf049193q>
91. Leroy, F., & De Vuyst, L. (2004). Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science & Technology*, 15(2), 67–78. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2003.09.004>
92. Li, H. F., Dai, F. J., Zhang, L. L., & Li, Z. J. (2022). Characterization of scalded dough and its impact on the growth of mixed yeasts originating from Jiaozi. *Food Bioscience*, 49(January), 101920. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101920>
93. Limbad, M., Maddox, N. G., Hamid, N., & Kantono, K. (2020). Sensory and physicochemical characterization of sourdough bread prepared with a coconut water kefir starter. *Foods*, 9, 1165. <https://doi.org/10.3390/foods9091165>
94. Linina, A., Augspole, I., Romanova, I., & Kuzel, S. (2020). Winter rye (*Secale cereale* L.) antioxidant capacity, total phenolic content and quality indices. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 3), 1751–1759. <https://doi.org/10.15159/AR.20.113>
95. Linina, A., Kunkulberga, D., Kronberga, A., & Locmele, I. (2019). Winter rye grain quality of hybrid and population cultivars. *Agronomy Research*, 17, 1380–1389. <https://doi.org/10.15159/AR.19.058>
96. Lopez, H. W., Krespine, V., Guy, G., Messenger, A., Demigne, C., & Remesy, C. (2001). Prolonged fermentation of whole wheat sourdough reduces phytate level and increases soluble magnesium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(5), 2657–2662. <https://doi.org/10.1021/jf001255z>
97. Loponen, J., & Gänzle, M. G. (2018). Use of sourdough in low FODMAP baking. *Foods*, 7, 96. <https://doi.org/10.3390/foods7070096>
98. Luti, S., Luti, S., Mazzoli, L., Ramazzotti, M., Galli, V., Venturi, M., Marino, G., Lehmann,

- M., Guerrini, S., Granchi, L., Paoli, P., & Pazzagli, L. (2020). Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected Lactobacilli strains are retained in breads. *Food Chemistry*, 322, 126710. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126710>
99. Mäkinen, O. E., & Arendt, E. K. (2012). Oat malt as a baking ingredient - A comparative study of the impact of oat, barley and wheat malts on bread and dough properties. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.08.009>
 100. Mangan, D., Szafranska, A., McKie, V., & McCleary, B. V. (2016). Investigation into the use of the amylase SD assay of milled wheat extracts as a predictor of baked bread quality. *Journal of Cereal Science*, 70(July), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.015>
 101. Masojć, P., & Milczarski, P. (2009). Relationship between QTLs for preharvest sprouting and alpha-amylase activity in rye grain. *Molecular Breeding*, 23(1), 75–84. <https://doi.org/10.1007/s11032-008-9215-1>
 102. Menezes, L. A. A., De Marco, I., Neves Oliveira dos Santos, N., Costa Nunes, C., Leite Cartabiano, C. E., Molognoni, L., Pereira, G. V. d. M., Daguer, H., & De Dea Lindner, J. (2021). Reducing FODMAPs and improving bread quality using type II sourdough with selected starter cultures. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(7), 912–922. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1892603>
 103. Mihhalevski, A., Nisamedtinov, I., Hälvin, K., Ošeka, A., & Paalme, T. (2013). Stability of B-complex vitamins and dietary fiber during rye sourdough bread production. *Journal of Cereal Science*, 57, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.09.007>
 104. Mikulski, D., & Klosowski, G. (2015). Phytic acid concentration in selected raw materials and analysis of its hydrolysis rate with the use of microbial phytases during the mashing process. *Journal of the Institute of Brewing*, 121(2), 213–218. <https://doi.org/10.1002/jib.221>
 105. Mir, S. A., Manickavasagan, A., & Shah, M. A. (2019). *Whole Grains*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781351104760>
 106. Molina-Infante, J., Serra, J., Fernandez-Bañares, F., & Mearin, F. (2016). The low-FODMAP diet for irritable bowel syndrome: Lights and shadows. *Gastroenterologia y Hepatologia*, 39(2), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.gastrohep.2015.07.009>
 107. Montemurro, M., Pontonio, E., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2019). Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005>
 108. Muralikrishna, G., & Nirmala, M. (2005). Cereal α -amylases - An overview. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.12.002>
 109. 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. <https://doi.org/10.3390/foods12244475>
 110. 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods14060979>
 111. Németh, R., & Tömösközi, S. (2021). Rye: Current state and future trends in research and applications. *Acta Alimentaria*, 50(4), 620–640. <https://doi.org/10.1556/066.2021.00162>
 112. Nielsen, M. M., Damstrup, M. L., Dal Thomsen, A., Rasmussen, S. K., & Hansen, Å. (2007). Phytase activity and degradation of phytic acid during rye bread making. *European Food Research and Technology*, 225(2), 173–181. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0397-7>
 113. Nilsson, M., Andersson, R., Andersson, R. E., Autio, K., & Åman, P. (2000). Heterogeneity in a water-extractable rye arabinoxylan with a low degree of disubstitution. *Carbohydrate Polymers*, 41, 397–405. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00100-9)
 114. Nuobariene, L., Cizeikiene, D., Gradzeviciute, E., Hansen, Å. S., Rasmussen, S. K.,

- Juodeikiene, G., & Vogensen, F. K. (2015). Phytase-active lactic acid bacteria from sourdoughs: Isolation and identification. *LWT*, 63(1), 766–772. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.018>
115. Nyyssölä, A., Ellilä, S., Nordlund, E., & Poutanen, K. (2020). Reduction of FODMAP content by bioprocessing. *Trends in Food Science and Technology*, 99(November 2019), 257–272. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.004>
 116. Oest, M., Bindrich, U., Voß, A., Kaiser, H., & Rohn, S. (2020). Rye bread defects: Analysis of composition and further influence factors as determinants of dry-baking. *Foods*, 9, 1900. <https://doi.org/10.3390/foods9121900>
 117. Ofoedu, C. E., Iwouno, J. O., Ojimba, N. C., Chacha, J. S., Okafor, D. C., & Anwaegbu, O. M. (2022). Effect of malting regimen on diastatic power, cold and hot water extracts of malts from sorghum. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 4328–4336. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15759>
 118. Olaerts, H., De Bondt, Y., & Courtin, C. M. (2018). Density separation as a strategy to reduce the enzyme load of preharvest sprouted wheat and enhance its bread making quality. *Food Chemistry*, 241, 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.027>
 119. Osman, A., Hartung, C. B., Lingens, J. B., Rohn, K., Schreiner, T., Ahmed, M. F. E., Hankel, J., Abd El-Wahab, A., & Visscher, C. (2022). Fermentation Characteristics of Rye and Sorghum Depending on Water: Feed Ratio. *Fermentation*, 8, 155. <https://doi.org/10.3390/fermentation8040155>
 120. Ozoliņa, V. (2012). *Bioloģiski aktīvo vielu izmaiņas rudzu maizes ražošanas procesā: promocijas darbs Dr.sc.ing zinātniskā grāda iegūšanai*. LLU.
 121. Parenti, O., Guerrini, L., Canuti, V., Angeloni, G., Masella, P., & Zanoni, B. (2019). The effect of the addition of gelatinized flour on dough rheology and quality of bread made from brown wheat flour. *Lwt*, 106(February), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.066>
 122. Pejcz, E., Lachowicz-Wiśniewska, S., Nowicka, P., Wojciechowiec-Budzisz, A., & Harasym, J. (2024). Enhancing antioxidant activity and modulating FODMAPs levels in inoculated sourdough rye bread. *LWT*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115905>
 123. Pejcz, E., Szychaj, R., & Gil, Z. (2020). Technological methods for reducing the content of fructan in rye bread. *European Food Research and Technology*, 8, 663. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03537-5>
 124. Peng, Z., & Jin, Y. (2020). Purification, identification, and characterization of an endo-1,4-β-xylanase from wheat malt. *Molecules*, 25, 1572. <https://doi.org/10.3390/molecules25071572>
 125. Pérez-Alvarado, O., Zepeda-Hernández, A., García-Amezquita, L. E., Requena, T., Vinderola, G., & García-Cayuela, T. (2022). Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits. *Frontiers in Microbiology*, 13, 969460. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.969460>
 126. Petersen, M. A., Hansen, Å., Venskaityte, A., Juodeikiene, G., & Sventickaitė, A. (2005). Flavour of rye bread made with scalded flour. In S. P. Cauvain, S. S. Salmon, & L. S. Young (Eds.), *Using Cereal Science and Technology for the Benefit of Consumers* (pp. 69–73). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845690632.3.69>
 127. Plessas, S., Fisher, A., Koureta, K., Psarianos, C., Nigam, P., & Koutinas, A. A. (2008). Application of *Kluyveromyces marxianus*, *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* and *L. helveticus* for sourdough bread making. *Food Chemistry*, 106(3), 985–990. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.012>
 128. Pontonio, E., Arora, K., Dingeo, C., Carafa, I., Celano, G., Scarpino, V., Genot, B., Gobetti, M., & Di Cagno, R. (2021). Commercial Organic Versus Conventional Whole Rye and Wheat Flours for Making Sourdough Bread: Safety, Nutritional, and Sensory Implications. *Frontiers in Microbiology*, 12, 674413.

- <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.674413>
129. Poonsrisawat, A., Wanlapatit, S., Paemanee, A., Eurwilaichitr, L., Piyachomkwan, K., & Champreda, V. (2014). Viscosity reduction of cassava for very high gravity ethanol fermentation using cell wall degrading enzymes from *Aspergillus aculeatus*. *Process Biochemistry*, 49(11), 1950–1957. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.07.016>
 130. Radenkova, V., Juhnevica-Radenkova, K., Kviesis, J., Lazdina, D., Valdovska, A., Vallejo, F., & Lacis, G. (2021). Lignocellulose-degrading enzymes: A biotechnology platform for ferulic acid production from agro-industrial side streams. *Foods*, 10, 3056. <https://doi.org/10.3390/foods10123056>
 131. Ravyts, F., & De Vuyst, L. (2011). Prevalence and impact of single-strain starter cultures of lactic acid bacteria on metabolite formation in sourdough. *Food Microbiology*, 28(6), 1129–1139. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.03.004>
 132. Rehman, S., Paterson, A., & Piggot, J. R. (2006). Flavour in sourdough breads: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.03.006>
 133. Reidzane, S., Kruma, Z., Kazantseva, J., Traksmas, A., & Klava, D. (2021). Determination of technological parameters and characterization of microbiota of the spontaneous sourdough fermentation of hull-less barley. *Foods*, 10, 2253. <https://doi.org/10.3390/foods10102253>
 134. Rizzello, C. G., & De Angelis, M. (2022). *Lactobacillus delbrueckii* Group☆. In P. L. H. McSweeney & J. P. McNamara (Eds.), *Encyclopedia of Dairy Sciences (Third Edition)* (Third Edit, pp. 287–292). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00141-0>
 135. Rizzello, C. G., Lorusso, A., Russo, V., Pinto, D., Marzani, B., & Gobbetti, M. (2017). Improving the antioxidant properties of quinoa flour through fermentation with selected autochthonous lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 241, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.035>
 136. Robinson, P. K. (2015). Enzymes: principles and biotechnological applications. *Essays in Biochemistry*, 59, 75. <https://doi.org/10.1042/BSE0590001>
 137. Rodriguez-Ramiro, I., Brearley, C. A., Bruggraber, S. F. A., Perfecto, A., Shewry, P., & Fairweather-Tait, S. (2017). Assessment of iron bioavailability from different bread making processes using an in vitro intestinal cell model. *Food Chemistry*, 228, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.130>
 138. Rosicka-Kaczmarek, J., Komisarzyk, A., Nebesny, E., & Makowski, B. (2016). The influence of arabinoxylans on the quality of grain industry products. *European Food Research and Technology*, 242(3), 295–303. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2549-0>
 139. Sabovics, M., Gudreniece, L., Kince, T., & Semjonovs, P. (2017). Investigation of fructans increasing possibilities in rye bread. *Food Science and Technology in a Changing World*, 96–101. <https://doi.org/10.22616/foodbalt.2017.022>
 140. Sabovics, M., Straumite, E., & Galoburda, R. (2011). Assessment of the rheological properties of flour using the Mixolab. *6th Baltic Conference on Food Science and Technology: Innovations for Food Science and Production, FOODBALT-2011 - Conference Proceedings*, 33–38. <https://cabidigitallibrary.org>
 141. Sahin, A. W., Zannini, E., Coffey, A., & Arendt, E. K. (2019). Sugar reduction in bakery products: Current strategies and sourdough technology as a potential novel approach. *Food Research International*, 126, 108583. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108583>
 142. Salmenkallio-Marttila, M., & Hovinen, S. (2005). Enzyme activities, dietary fibre components and rheological properties of wholemeal flours from rye cultivars grown in Finland. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(8), 1350–1356. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2128>
 143. Sandberg, J. C., Björck, I. M. E., & Nilsson, A. C. (2017). Effects of whole grain rye, with and without resistant starch type 2 supplementation, on glucose tolerance, gut hormones,

- inflammation and appetite regulation in an 11-14.5 hour perspective; a randomized controlled study in healthy subjects. *Nutrition Journal*, 16, 25. <https://doi.org/10.1186/s12937-017-0246-5>
144. Sarand, I., Traksmā, A., Klava, D., Kunkulberga, D., Straumite, E., Galoburda, R., Murniece, R., Juodeikiene, G., Bartkevics, V., & Bartkiene, E. (2023). Traditional Breads from the Baltic Countries (Estonia, Latvia, Lithuania). In M. Garcia-Vaquero, K. Pastor, G. E. Orhun, A. McElhatton, & J. M. F. Rocha (Eds.), *Traditional European Breads: An Illustrative Compendium of Ancestral Knowledge and Cultural Heritage* (pp. 41–59). Switzerland: Springer Nature AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23352-4>
 145. Schmidt, M., & Sciurba, E. (2021). Determination of FODMAP contents of common wheat and rye breads and the effects of processing on the final contents. *European Food Research and Technology*, 247(2), 395–410. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03633-6>
 146. Schweinberger, C. M., Trierweiler, J. O., & Trierweiler, L. F. (2019). Preheating Followed by Simultaneous Viscosity Reduction, Hydrolysis, and Fermentation: Simplifying the Process of Ethanol Production from Sweet Potato. *BioEnergy Research*, 12(1), 94–102. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9953-9>
 147. Seal, C. J., Courtin, C. M., Venema, K., & de Vries, J. (2021). Health benefits of whole grain: effects on dietary carbohydrate quality, the gut microbiome, and consequences of processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2742–2768. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12728>
 148. Shafisoltani, M., Salehifar, M., & Hashemi, M. (2014). Effects of enzymatic treatment using Response Surface Methodology on the quality of bread flour. *Food Chemistry*, 148, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.026>
 149. Sinani, A., Sana, M., Seferi, E., & Shehaj, M. (2015). The Effect of A-Amylase in Rehology Features of Some Wheat Cultivars and Their Harmonization for Producing Baking According To Customer Requirements. *Global Journal of Biology, Agriculture & Health Sciences*, 4(1), 56–64. <https://doi.org/10.24105/gjbahs>
 150. Sluková, M., Jurkaninová, L., Gillarová, S., Horáčková, Š., & Skřivan, P. (2021). Rye – Nutritional and technological evaluation in Czech cereal technology – A review: Sourdoughs and bread. *Czech Journal of Food Sciences*, 39(2), 65–70. <https://doi.org/10.17221/204/2020-CJFS>
 151. Stępniewska, S., Cacak-Pietrzak, G., Szafrńska, A., Ostrowska-Liżęza, E., & Dziki, D. (2021). Assessment of the starch-amylolytic complex of rye flours by traditional methods and modern one. *Materials*, 14(24), 7603. <https://doi.org/10.3390/ma14247603>
 152. Stępniewska, S., Cacak-Pietrzak, G., Szafrńska, A., Ostrowska-Liżęza, E., Salamon, A., & Kowalska, H. (2024). Assessment of the Baking Properties of Rye Flour Based on the Polysaccharide Content and Properties. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/app14072772>
 153. Stępniewska, S., Słowik, E., Cacak-Pietrzak, G., Romankiewicz, D., Szafrńska, A., & Dziki, D. (2018). Prediction of rye flour baking quality based on parameters of swelling curve. *European Food Research and Technology*, 244(6), 989–997. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3014-z>
 154. Straumīte, E. (2006). *Latvijā ražotu rudzu miltu cepamīpašību izpēte : promocijas darbs inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda iegūšanai pārtikas zinātnē, pārtikas procesu un iekārtu apakšnozarē*. Latvijas Lauksaimniecības universitāte.
 155. Struyf, N., Laurent, J., Lefevre, B., Verspreet, J., Verstrepen, K. J., & Courtin, C. M. (2017). Establishing the relative importance of damaged starch and fructan as sources of fermentable sugars in wheat flour and whole meal bread dough fermentations. *Food Chemistry*, 218, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.004>
 156. Struyf, N., Laurent, J., Verspreet, J., Verstrepen, K. J., & Courtin, C. M. (2017). *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* cocultures allow reduction of fermentable oligo-, Di-, and monosaccharides and polyols levels in whole wheat bread.

- Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(39), 8704–8713. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02793>
157. Struyf, N., Verspreet, J., & Courtin, C. M. (2016). The effect of amylolytic activity and substrate availability on sugar release in non-yeasted dough. *Journal of Cereal Science*, 69, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.016>
 158. Sugiura, F., Ito, S., & Arai, E. (2017). Effect of pregelatinized starch paste on the ease of swallowing high-moisture content bread. *Journal of Food Engineering*, 214, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.021>
 159. Szentmiklóssy, M. K. J., Jaksics, E., Farkas, A., Pusztai, Kemény, S., Németh, R., & Tömösközi, S. (2023). Fibre and short-chain carbohydrate composition in rye varieties, novel industrial milling fractions and breads. *Acta Alimentaria*, 52, 177–189. <https://doi.org/10.1556/066.2022.00221>
 160. Tarazona, L. K. J., Berbesi, C. M. A., Vera, Y. C., Contreras-Velásquez, J. C., Bermúdez, V., Rojas, E., Faria, J., Martínez, M., Rodríguez-Monroy, C., Villareal-González, R., Pestana-Nobles, J. P., & Reyna, N. (2018). A functional bread designed with rye flour and stevia sweetener: A sensory and microbiological analysis. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(2), 68–73.
 161. Täufel, A., Böhm, H., & Flamme, W. (1997). Protein Inhibitors of Alpha-amylase in Mature and Germinating Grain of Rye (*Secale cereale*). *Journal of Cereal Science*, 25(3), 267–273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0093>
 162. Van Der Maarel, M. J. E. C., Van Der Veen, B., Uitdehaag, J. C. M., Leemhuis, H., & Dijkhuizen, L. (2002). Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family. *Journal of Biotechnology*, 94, 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00407-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00407-2)
 163. Van der Meulen, R., Grosu-Tudor, S., Mozzi, F., Vaningelgem, F., Zamfir, M., Font de Valdez, G., & De Vuyst, L. (2007). Screening of lactic acid bacteria isolates from dairy and cereal products for exopolysaccharide production and genes involved. *International Journal of Food Microbiology*, 118, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.014>
 164. Vasyukova, A. T., Kononenko, M. M., Alekseev, A. E., Moshkin, A. V., & Tikhonov, D. A. (2020). Influence of malt on the intensity of the enzymatic processes. *Journal of Critical Reviews*, 7(7), 479–482. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.07.83>
 165. Verwimp, T., Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2006). Rye Constituents and Their Impact on Rye Processing. In Y. H. Hui (Ed.), *Food Biochemistry and Food Processing* (pp. 567–592). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470277577.ch25>
 166. Verwimp, T., Vandeputte, G. E., Marrant, K., & Delcour, J. A. (2004). Isolation and characterisation of rye starch. *Journal of Cereal Science*, 39, 85–90. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00068-7)
 167. Wang, Li, L., & Zheng, X. (2020). A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. *Food Chemistry*, 315, 126267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126267>
 168. Wang, Y., Jin, Z., Barr, J., Gillespie, J., Simsek, S., Horsley, R. D., & Schwarz, P. B. (2018). Micro-Malting for the quality evaluation of rye (*Secale cereale*) genotypes. *Fermentation*, 4, 50. <https://doi.org/10.3390/fermentation4030050>
 169. Whelan, K., Abrahmsohn, O., David, G. J. P., Staudacher, H., Irving, P., Lomer, M. C. E., & Ellis, P. R. (2011). Fructan content of commonly consumed wheat, rye and gluten-free breads. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(5), 498–503. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.553588>
 170. Wu, F., Li, J., Yang, N., Chen, Y., Jin, Y., & Xu, X. (2017). The Roles of Starch Structures in the Pasting Properties of Wheat Starch with Different Degrees of Damage. *Starch-Stärke*, 70, 1700190. <https://doi.org/10.1002/star.201700190>
 171. Xie, A., Li, X., Zhou, D., Bai, Y., & Jin, Z. (2024). Research on the quantitative relationship

- of the viscosity reduction effect of large-ring cyclodextrin on potato starch during gelatinization process and mechanism analysis. *Carbohydrate Polymers*, 342(June), 122371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122371>
- 172.Yamauchi, H., Yamada, D., Murayama, D., Santiago, D. M., Orikasa, Y., Koaze, H., Nakaura, Y., Inouchi, N., & Noda, T. (2014). The staling and texture of bread made using the Yudane dough method. *Food Science and Technology Research*, 20(5), 1071–1078. <https://doi.org/10.3136/fstr.20.1071>
 - 173.Zannini, E., & Arendt, E. K. (2018). Low FODMAPs and gluten-free foods for irritable bowel syndrome treatment: Lights and shadows. *Food Research International*, 110(January 2017), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.04.001>
 - 174.Zhang, H., Li, Z., Xie, F., Wang, G., Song, Z., & Ai, L. (2024). Inhibitory mechanism of arabinoxylan and β -glucan from hull-less barley on α -amylase activity: A comparison study. *Food Hydrocolloids*, 153(March), 109994. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109994>
 - 175.Zheng, J., Ruan, L., Sun, M., & Gänzle, M. (2015). A genomic view of Lactobacilli and Pediococci demonstrates that phylogeny matches ecology and physiology. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(20), 7233–7243. <https://doi.org/10.1128/AEM.02116-15>
 - 176.Zhou, M. M., & Li, Z. J. (2021). Characteristics of scalded dough fermented by co-cultures of *Saccharomyces cerevisiae* Y10, *Wickerhamomyces anomalus* Y13 and *Torulaspora delbrueckii* Y22. *International Journal of Food Science and Technology*, 56, 5923–5930. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15232>

PIELIKUMI / *APPENDICES*

Rudzu miltu krišanas skaitļa (s) prognozētās vērtības atkarībā no pievienotā iesala diastātiskā spēka un satura (%) / *Estimated Values of Falling Number (s) of Rye Flour as Affected by the Diastatic Power and Concentration (%) of the Added Malt*

Rudzu milti M1 / <i>Rye Flour M1</i>											
Iesala diastātiskais spēks / <i>Malt diastatic power,</i> °WK	Iesala saturs / <i>Malt concentration, %</i>										
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
170	229	222	216	209	202	195	188	181	174	168	161
190	224	218	211	204	197	190	183	176	169	163	156
210	219	213	206	199	192	185	178	171	165	158	151
230	215	208	201	194	187	180	173	166	160	153	146
250	210	203	196	189	182	175	168	162	155	148	141
270	205	198	191	184	177	170	163	157	150	143	136
290	200	193	186	179	172	165	158	152	145	138	131
310	195	188	181	174	167	160	154	147	140	133	126
330	190	183	176	169	162	155	149	142	135	128	121
350	185	178	171	164	157	151	144	137	130	123	116
370	180	173	166	159	152	146	139	132	125	118	111
390	175	168	161	154	148	141	134	127	120	113	106
410	170	163	156	149	143	136	129	122	115	108	101
Rudzu milti M2 / <i>Rye Flour M2</i>											
Iesala diastātiskais spēks / <i>Malt diastatic power,</i> °WK	Iesala saturs / <i>Malt concentration, %</i>										
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
170	194	189	184	179	174	169	164	159	154	149	144
190	190	185	180	175	170	165	160	155	150	145	140
210	187	182	177	172	167	162	157	152	147	142	137
230	183	178	173	168	163	158	153	148	143	138	133
250	179	174	169	164	159	154	149	144	139	134	129
270	176	171	166	161	156	151	146	141	136	131	126
290	172	167	162	157	152	147	142	137	132	127	122
310	169	164	159	154	149	144	139	134	129	124	118
330	165	160	155	150	145	140	135	130	125	120	115
350	161	156	151	146	141	136	131	126	121	116	111
370	158	153	148	143	138	133	128	123	118	113	108
390	154	149	144	139	134	129	124	119	114	109	104
410	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100

1. pielikuma turpinājums / *Continuation of Appendix 1*

Rudzu milti M3 / <i>Rye Flour M3</i>											
Iesala diastātiskais spēks / <i>Malt diastatic power,</i> °WK	Iesala saturs / <i>Malt concentration, %</i>										
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
170	172	168	165	161	157	154	150	146	142	139	135
190	170	166	162	158	155	151	147	144	140	136	132
210	167	163	160	156	152	148	145	141	137	134	130
230	164	161	157	153	150	146	142	138	135	131	127
250	162	158	154	151	147	143	140	136	132	128	125
270	159	156	152	148	144	141	137	133	130	126	122
290	157	153	149	146	142	138	134	131	127	123	120
310	154	150	147	143	139	135	132	128	124	121	117
330	151	148	144	140	137	133	129	125	122	118	114
350	149	145	141	138	134	130	127	123	119	115	112
370	146	143	139	135	131	128	124	120	117	113	109
390	144	140	136	133	129	125	121	118	114	110	107
410	141	137	134	130	126	123	119	115	111	108	104

Rudzu iesala ar dažādu diastātisko spēku (170, 179, 261, 362, 408 °WK) un satura (0.5, 1.0, 1.5%) ietekme uz rudzu miltu M1, M2, M3 Mixolab rezultātiem / Effect of rye malt with different diastatic power (170, 179, 261, 362, 408 °WK) and concentration (0.5, 1.0, 1.5%) on Mixolab parameters of rye flour samples M1, M2, M3

Mixolab reoloģiskie parametri / Mixolab rheological parameters	Iesala saturš / Malt conc., %	I1 (DS / DP 170 °WK)			I2 (DS / DP 179 °WK)			I3 (DS / DP 261 °WK)			I4 (DS / DP 362 °WK)			I5 (DS / DP 408 °WK)		
		Iesala saturš / Malt concentration, %			Iesala saturš / Malt concentration, %			Iesala saturš / Malt concentration, %			Iesala saturš / Malt concentration, %			Iesala saturš / Malt concentration, %		
		0	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0
Rudzu milti M1 / Rye flour M1																
WA (%)	67.00	64.20	64.20	64.20	66.70	66.70	66.70	65.00	65.00	65.00	65.90	65.90	65.90	65.00	65.00	65.00
Cs (Nm)	1.10	1.08	1.05	1.03	1.03	1.05	1.04	1.05	1.03	1.05	1.09	1.12	1.03	1.10	1.09	1.09
C1-C2 (Nm)	0.37	0.41	0.41	0.41	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.42	0.39	0.40	0.41	0.41
C3-C2 (Nm)	1.53	1.43	1.34	1.30	1.35	1.22	1.15	1.34	1.24	1.12	1.32	1.20	1.10	1.26	1.14	1.05
C3-C4 (Nm)	1.39	1.43	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.55	1.58	1.53	1.54	1.55	1.53	1.53	1.55	1.52
C5-C4 (Nm)	0.55	0.51	0.43	0.35	0.48	0.35	0.26	0.38	0.29	0.18	0.42	0.29	0.18	0.37	0.24	0.17
Rudzu milti M2 / Rye flour M2																
WA (%)	62.00	60.70	60.70	60.70	60.90	60.90	60.90	61.00	61.00	61.00	61.50	61.50	61.50	61.90	61.90	61.90
Cs (Nm)	1.13	1.09	1.09	1.04	1.06	1.07	1.11	1.11	1.07	1.10	1.10	1.10	1.11	1.10	1.10	1.06
C1-C2 (Nm)	0.47	0.52	0.52	0.49	0.56	0.53	0.53	0.54	0.52	0.52	0.51	0.53	0.54	0.51	0.51	0.49
C3-C2 (Nm)	1.79	1.69	1.53	1.38	1.49	1.42	1.30	1.45	1.24	1.18	1.42	1.27	1.15	1.38	1.21	1.08
C3-C4 (Nm)	1.01	1.20	1.20	1.21	1.13	1.23	1.25	1.28	1.32	1.33	1.28	1.32	1.32	1.27	1.30	1.28
C5-C4 (Nm)	0.60	0.61	0.57	0.48	0.53	0.43	0.41	0.50	0.35	0.30	0.50	0.40	0.27	0.52	0.34	0.24
Rudzu milti M3 / Rye flour M3																
WA (%)	63.30	60.70	60.70	60.70	60.90	60.90	60.90	61.00	61.00	61.00	61.50	61.50	61.50	61.90	61.90	61.90
Cs (Nm)	1.07	1.06	1.06	1.04	1.03	1.03	1.06	1.06	1.06	1.08	1.05	1.05	1.02	1.01	1.06	1.05
C1-C2 (Nm)	0.45	0.45	0.46	0.46	0.45	0.47	0.48	0.44	0.46	0.48	0.46	0.45	0.47	0.44	0.48	0.47
C3-C2 (Nm)	1.47	1.47	1.44	1.38	1.44	1.35	1.28	1.41	1.30	1.23	1.40	1.25	1.20	1.36	1.22	1.11
C3-C4 (Nm)	1.43	1.50	1.56	1.55	1.49	1.51	1.54	1.57	1.58	1.58	1.55	1.54	1.53	1.55	1.54	1.49
C5-C4 (Nm)	0.50	0.37	0.33	0.29	0.35	0.29	0.24	0.29	0.22	0.18	0.31	0.21	0.16	0.26	0.20	0.15