

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



Mg.oec. **Sanita Reidzāne** ^{id}

promocijas darbs

KAILGRAUDU MIEŽI IERAUGA FERMENTĀCIJĀ
HULL-LESS BARLEY IN SOURDOUGH FERMENTATION

zinātnes doktora grāda

zinātnes doktore (*Ph.D.*) inženierzinātnēs un tehnoloģijās

iegūšanai

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

Promocijas darba autore

Jelgava
2024

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs “Kailgraudu mieži ierauga fermentācijā” izstrādāts laika posmā no 2020. gada februāra līdz 2023. gada decembrim Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) Pārtikas institūta (iepriekš Pārtikas tehnoloģijas fakultāte) laboratorijās. Paraugi analizēti arī Agroresursu un ekonomikas institūta (AREI) Stendes pētniecības centrā, LBTU Viedo tehnoloģiju nodaļā (VTN) un Pārtikas un fermentācijas centrā Igaunijā (TFTAK), Budapeštas Tehnoloģiju un Ekonomikas universitātes Lietišķās Biotehnoloģijas un pārtikas zinātnes departamentā. Statistiskā datu apstrāde veikta sadarbībā ar Inženierzinātņu un informācijas tehnoloģiju fakultātes Datoru sistēmu un datu zinātnes institūtu.

Promocijas darba **hipotēze**: kailgraudu mieži ir alternatīva izejviela ierauga fermentācijā un maizes gatavošanā.

Pētījuma **objekti**: kailgraudu miežu spontānais ieraugs, ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs un kailgraudu miežu ierauga maize.

Promocijas darba hipotēzi pierāda ar šādām **tēzēm**.

1. Fermentācijas optimālo tehnoloģisko parametru ietekmē notiek ieraugam raksturīgā mikrobiotas sukcesija.
2. Kailgraudu miežu spontānā ierauga mikrobioloģiskie un fizikālie rādītāji atbilst aktīva ierauga raksturojošiem rādītājiem un ar tīrkultūrām fermentētam ieraugam var iegūt paaugstinātu proteolītisko aktivitāti.
3. Kailgraudu miežu ierauga fermentācijā samazinās glutēna saturs attiecībā pret tā saturu miltos.
4. Ne-cietes polisaharīdu saturs maizē ietekmē tās fizikālās īpašības.

Promocijas darba **mērķis**: pētīt kailgraudu miežu ierauga fermentāciju un vērtēt tās ietekmi uz glutēna un ne-cietes polisaharīdu saturu un miežu maizes fizikālajām īpašībām.

Mērķu sasniegšanai izvirzītie **uzdevumi**.

1. Noteikt optimālos tehnoloģiskos parametrus kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijai un pienskābes baktēriju un mikroskopisko sēņu taksonomisko sastāvu ieraugā.
2. Izzināt mikrobiotas sukcesiju kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijā.
3. Vērtēt kailgraudu miežu spontānā un ar tīrkultūrām fermentēta ierauga kvalitātes rādītājus un reoloģiskās īpašības.
4. Izpētīt ar kailgraudu miežu ieraugu gatavotas kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizes fizikālās īpašības.
5. Noteikt glutēna saturu kailgraudu miežu ieraugā un kailgraudu miežu maizē.
6. Noteikt ne-cietes polisaharīdu saturu kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizē un analizēt to ietekmi uz maizes fizikālajām īpašībām.

Promocijas darbs **apkopots 3 nodaļās**.

1. nodaļā raksturoti ieraugu veidi un aprakstīti galvenie ierauga ietekmējošie faktori. Atspoguļota spontānā ierauga mikrobiota. Dots kailgraudu miežu kā alternatīvas izejvielas raksturojums. Aprakstīta ierauga un mīklas struktūras veidošanās. Sniegts pārskats par kailgraudu miežu miltu ķīmiskā sastāva un fizikālo īpašību izmaiņām ierauga fermentācijas laikā.

2. nodaļā sniegts pētījumā izmantoto materiālu un metožu izklāsts.

3. nodaļā apkopoti pētījumā iegūtie rezultāti.

- Raksturota mainīgo faktoru ietekme kailgraudu miežu ierauga fermentācijas trijos posmos un optimālo tehnoloģisko parametru noteikšana. Identificēta mikrobiota un analizēta tās sukcesija fermentācijas trijos posmos.

- Apkopoti kailgraudu miežu ierauga mikrobioloģiskie (pienskābes baktēriju, raugu kolonijas veidojošo vienību skaits), fizikālie (pH, kompleksā viskozitāte, zudumu un uzkrājuma moduļi) un ķīmiskie (skābums, proteolītiskā aktivitāte) rādītāji; analizēta struktūras veidošanās un izmaiņas ierauga un mīklas fermentācijā.
- Noteikts glutēna saturs kailgraudu miežu miltos, ieraugā un analizētas tā izmaiņas kailgraudu miežu maizē.
- Analizēts β -glikānu, fruktānu, mannānu saturs ar kailgraudu miežu ieraugu gatavotā maizē un to ietekme uz maizes fizikālajām īpašībām.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, darba apjoms 100 lpp., 16 tabulas, 23 attēli, 173 literatūras avoti un 4 pielikumi.

Pētījums veikts ar LBTU programmas “Zinātniskās kapacitātes stiprināšana Latvijas Lauksaimniecības universitātē” projekta Nr. 3.2.-10 / 125 “Biotehnoloģiskie risinājumi miežu ierauga izstrādē ar samazinātu glutēna saturu” līdzfinansējumu. Pētījumā izmantots programmas “Fundamentālo pētījumu veikšana LLU” projekts Nr. 2020-LLU-141 “Bioloģiski aktīvo savienojumu izpēte miežu pilngraudu maizē” atbalsts.

Promocijas darba izstrāde finansēta no “LLU pāreja uz jauno doktorantūras finansēšanas modeli” projekta Nr. 8.2.2.0 /20 /1 /001”.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

ANNOTATION

The doctoral thesis "Hull-less barley in sourdough fermentation" was developed from February 2020 to December 2023 in the Latvia University of Life Sciences and Technologies (LBTU) Food Institute (former Faculty of Food Technology) laboratories. The analyses of samples were conducted at the Institute of Agricultural Resources and Economics (AREI) of Stende Research Centre, Division of Smart Technologies (LBTU), Center of Food and Fermentation Technologies (TFTAK) in Estonia, Budapest University of Technology and Economics, Department of Applied Biotechnology and Food Science. Statistical data processing was conducted in collaboration with the Institute of Computer Systems and Data Science of the Faculty of Engineering and Information Technologies.

The **hypothesis** of doctoral thesis: hull-less barley is an alternative raw material for sourdough fermentation and breadmaking.

Research **objects**: hull-less barley spontaneous sourdough, with starter cultures fermented sourdough, as well as hull-less barley sourdough bread.

The following **theses** have proved the hypothesis.

1. Under the influence of optimal technological fermentation parameters, the succession of typical sourdough microbiota occurs.
2. The microbiological and physical indicators of the spontaneous sourdough of hull-less barley resemble the characteristic indicators of active sourdough, and sourdough fermented with starter cultures can possess enhanced proteolytic activity.
3. The gluten content in hull-less barley sourdough fermentation decreases relative to its content in flour.
4. The content of non-starch polysaccharides affects the physical properties of bread.

The **aim** of doctoral thesis: to study the fermentation of hull-less barley sourdough and evaluate its effect on the content of gluten and non-starch polysaccharides and the physical properties of barley bread.

The tasks set to achieve the **goals**.

1. To determine the optimal technological parameters for the spontaneous fermentation of hull-less barley and the taxonomic composition of lactic acid bacteria and microscopic fungi.
2. To specify the microbiota succession in the spontaneous sourdough fermentation of hull-less barley.
3. To evaluate the quality indicators and rheological properties of hull-less barley sourdough fermented spontaneously and with starter cultures.
4. To study the physical properties of hull-less barley and wholegrain wheat bread prepared with hull-less barley sourdough.
5. To determine the gluten content in hull-less barley sourdough and hull-less barley bread.
6. To analyze the content of non-starch polysaccharides in hull-less barley and wholegrain wheat bread and to explain their effect on the physical properties of the bread.

The thesis is summarized in **three chapters**.

Chapter 1 characterizes the types of sourdough and describes the main influencing factors of sourdough. Reflected spontaneous sourdough microbiota. Characteristics of hull-less barley as an alternative raw material are given. The information regarding the structure of sourdough and dough is provided. An insight into changes in flour's chemical composition and physical properties during sourdough fermentation is provided.

Chapter 2 outlines the materials and methods used in the study.

Chapter 3 summarizes the results of the study.

- The influence of variable factors in the three steps of fermentation of hull-less barley was characterized, and the optimal technological parameters were determined. Identified microbiota and analyzed its succession in the three steps of fermentation.
- Microbiological (number of lactic acid bacteria, yeasts colony-forming units) physical (pH, complex viscosity, loss and storage moduli) and chemical (titratable acidity, proteolytic activity) indicators of hull-less barley sourdough summarized; structure formation and changes in sourdough and dough fermentation were analyzed.
- The content of gluten in hull-less barley flour and sourdough was determined, and its changes in bread prepared with hull-less barley sourdough were analyzed.
- The content of β -glucans, fructans, and mannans in bread prepared with hull-less barley sourdough was analyzed, and their influence on the physical properties of the bread was elucidated.

A PhD thesis is written in Latvian, it consists of 100 pages, 16 tables, 23 images and 173 bibliographic sources and 4 appendices.

The study was financed by the grants: “Strengthening Research Capacity at Latvia University of Life Sciences and Technologies” project “The biotechnological solutions for barley sourdough” (Contract No 3.2.-10 /125); Latvia University of Life Sciences and Technologies program project “Biologically active compound content in the developed barley bread” (Contract No 2020-LLU-141);

“Transition to the new doctoral funding model at the Latvia University of Life Sciences and Technologies” (Contract No 8.2.2.0/ 20/I/001).



ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA / APPROBATION OF THE RESEARCH WORK

Pētījuma rezultāti publicēti 5 zinātniskajos izdevumos, kas indeksēti SCOPUS un Web of Science datu bāzēs / Research results are published in 5 scientific journals indexed in SCOPUS and Web of Science databases.

1. Murniece R., Reidzane S., Radenkovs V., Galoburda R., Klava D. (2023) The impact of Fermented Scald on Rye and Hull-less Barley Dough and Bread Structure Formation. *Foods* 2023, 12(24), 4475, DOI:10.3390/foods12244475
2. Reidzane, S., Gramatina, I., Galoburda, R., Komasilovs, V., Zacepins, A., Klava D. (2023) Composition of Polysaccharides in Hull-Less Barley Sourdough Bread and Their Impact on Physical Properties of Bread. *Foods* 2023, 12(1), 155, DOI:10.3390/foods12010155
3. Reidzane, S., Kruma, Z., Kazantseva, J., Traksmā, A., Klava, D. (2021) Determination of Technological Parameters and Characterization of Microbiota of the Spontaneous Sourdough Fermentation of Hull-Less Barley. *Foods* 2021, 10(10), 2253, DOI:10.3390/foods10102253

4. Klava, D., Poisa, I., Reidzane, S., Kince, T., Kazantseva, J., Traksmā, A. (2021) The influence of germinated hull-less barley sourdough fermentation conditions on the microbiota development. *Rural Sustainability Research*, ISSN 2256 – 0939, Nr. 46(341) (2021), p. 105 – 115 , DOI:10.2478/plua-2021-0022
5. Majore, K., Šterna, V., Bleidere, M., Reidzāne, S., Ciproviča, I. (2021) In vitro study on fermentation characteristics of different hullless barley cultivar flakes. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*. Section B, Vol 75 (2021), No 6 (735), p. 438 – 443, DOI:10.2478/prolas-2021-0065

Par pētījuma rezultātiem ziņots 8 starptautiskajās konferencēs, Austrijā, Igaunijā, Itālijā, Latvijā un Nīderlandē / Results have been presented at the 8th international conferences in Latvia, Estonia, Austria, at simposium in Italy and the Netherlands.

1. Murniece, R., Reidzane, S., Galoburda, R., Radenkovs, V., Klava, D. (2023) The impact of fermented rye and barley scald on structure formation, microstructure changes and physical properties of wholegrain dough and bread ISFRS 2023, Wageningen, June 11 – 15 (stenda referāts / *poster presentation*)
2. Reidzane, S., Gramatina, I., Galoburda, R., Komasilovs, V., Zacepins, A., Klava D. (2023) Hull-Less Barley Sourdough Bread: Composition of Polysaccharides and Technological Characteristics. 16th Baltic Conference on Food Science and Technology “Traditional meets non-traditional in future food”, Jelgava, May 11 – 12 (mutiska prezentācija / *oral presentation*).
3. Reidzane, S., Klava, D. (2022) The proteolytic activity of hull-less barley dough in the two stage of fermentation and their impact on the texture properties of barley bread. 8th International Symposium on Sourdough Bolzano, Italy, June 14 – 17 (stenda referāts / *poster presentation*).
4. Reidzane, S., Klava, D. (2022) Protease activity in the spontaneous hull-less barley sourdough and in the sourdough with starter culture. 20th ICC Conference 2022, BOKU University Vienna, Austria, July 5 – 7 (stenda referāts / *poster presentation*).
5. Reidzane, S., Galoburda, R., Lacis, G., Klava, D. (2021) Rheological properties of hull-less barley spontaneous sourdough during the fermentation. Conference Biosystems Engineering 2021, Tartu, Estonia, May 9 – 10, online platform (stenda referāts / *poster presentation*).
6. Reidzane, S., Kazantseva, J., Traksmā, A., Klava, D. (2021) Characterization of Microbiota of the Spontaneous Sourdough three step Fermentation of Hull-less barley. 7th Whole Grain Summit 2021, Austria, Vienna, October 25 – 27, online platform (stenda referāts / *poster presentation*)
7. Reidzane, S., Kruma, Z., Klava, D. (2021) Determination of technological parameters of the spontaneous sourdough fermentation of hull-less barley. 16th ICC Cereal and Bread Congress, March 29 – 3, online platform (stenda referāts / *poster presentation*).
8. Majore, K., Šterna, V., Bleidere, M., Reidzāne, S., Ciproviča, I. (2020) In vitro study on fermentation characteristics of different hullless barley cultivar flakes. 3rd International Conference “Nutrition and Health” Riga, Jelgava, Latvia, December 9 – 11, online platform (mutiska prezentācija / *oral presentation*).

Promocijas darba rezultāti prezentēti LBTU PTF seminārā “Maizes diena” 17.08.2023. un Latvijas Maiznieku biedrības organizētā seminārā 18.10.2023. / *The results of the thesis presented at the industry seminars organized by the Faculty of Food Technology “Bread day” and Latvia Baker’s Association.*

PATEICĪBA

Autors izsaka pateicību promocijas darba vadītājam asoc. prof. Dr.sc.ing. Dacei Kļavai par atbalstu un konsultācijām idejas realizācijā, pētījuma veikšanā un publikāciju tapšanā, doktora studiju programmas “Pārtikas zinātne” vadītājam prof. Dr.sc.ing. Ingai Ciprovičai par iespēju studēt un profesionāli pilnveidoties, Pārtikas institūta darbiniekiem, AREI un vadošai pētniecei Dr.sc.ing. Vitai Šternai un vadošai pētniecei Dr.agr. Mārai Bleiderei par iespēju izmantot kailgraudu miežu ‘Kornelija’ graudus pētījumā, patenta autoram un īpašniekam Dr.biol. Pāvelam Semjonovam par atļauju izmantot *Pediococcus pentosaceus* LMKK 733, par konsultēšanu mikroorganismu izmantošanā LU Bioloģijas fakultātes vadošai pētniecei Dr.biol. Vizmai Nikolajevai, asoc. prof. Dr.sc.ing. Zandai Krūmai par atbalstu Box-Behnken metodes izmantošanā un sadarbību publikācijas rakstīšanā, prof. Dr.sc.ing. Rutai Galoburdai par konsultācijām reoloģisko īpašību izpētē un publikāciju rakstīšanā, LBTU Biotehnoloģiju Zinātniskās laboratorijas VTN vadītājam Dr.sc.ing. Vitālijam Radenkovam par atbalstu mikrostruktūras izpētē un sadarbību publikācijas tapšanā, IITF Datoru sistēmu un datu zinātnes institūta vadošajiem pētniekiem asoc. prof. Dr.sc.ing. Aleksejam Zacepinam un asoc. prof. Dr.sc.ing. Vitālijam Komašilovam par atbalstu un konsultācijām datu statistiskās analīzes veikšanā un sadarbību publikācijas tapšanā, Pārtikas un fermentācijas tehnoloģiju centram Igaunijā (Center of Food and Fermentation Technologies, TFTA) par sadarbību paraugu analizēšanā (personīgi Annai Traksmā un Jekaterīnai Kazantsevai), Budapeštas Tehnoloģiju un Ekonomikas universitātes (Budapest University of Technology and Economics) Lietišķās Biotehnoloģijas un pārtikas zinātnes departamenta (Department of Applied Biotechnology and Food Science) asist. prof. Dr. Zsuzsannai Kormosne Bugyi un pētniecei Gabriellai Muskovic, doktora studiju kolēģei Rūtai Mūrnieci par sadarbību publikācijas tapšanā un iesaistīšanos diskusijā par rudzu un miežu ierauga spontāno fermentāciju un atbalstu praktiskajā pieredzē.

SATURS / CONTENT

DARBĀ IEKĻAUTO TABULU SARAKSTS / <i>LIST OF TABLES</i>	10
DARBĀ IEKĻAUTO ATTĒLU SARAKSTS / <i>LIST OF FIGURES</i>	11
DARBĀ IZMANTOTO APZĪMĒJUMU, SAĪSINĀJUMU UN TERMINU SKAIDROJUMS / <i>LIST OF EXPLANATION OF DESIGNATIONS, ABBREVIATIONS AND MAIN TERMS INCLUDED IN THE DOCTORAL THESIS</i>	14
IEVADS / INTRODUCTION	16
1. LITERATŪRAS APSKATS / REVIEW OF LITERATURE	18
1.1. IERAUGA RAKSTUROJUMS UN VEIDI / <i>SOURDOUGH CHARACTERISTICS AND TYPES</i>	18
1.2. IERAUGA FERMENTĀCIJU IETEKMĒJOŠIE FAKTORI / <i>FACTORS INFLUENCING THE SOURDOUGH FERMENTATION</i>	21
1.3. KAILGRAUDU MIEŽI – ALTERNATĪVA IZEJVIELA IERAUGA FERMENTĀCIJĀ / <i>HULL-LESS BARLEY FLOUR – ALTERNATIVE MATERIAL FOR SOURDOUGH FERMENTATION</i>	23
1.4. IERAUGA MIKROBIOTAS SUKCESIJA UN DAUDZVEIDĪBA SPONTĀNĀ FERMENTĀCIJĀ / <i>SUCCESSION AND DIVERSITY OF SOURDOUGH MICROBIOTA IN SPONTANEOUS FERMENTATION</i>	30
1.5. OLBALTUMVIELU PROTEOLĪZE IERAUGA FERMENTĀCIJĀ / <i>PROTEOLYSIS OF PROTEINS IN SOURDOUGH FERMENTATION</i>	33
1.6. NĒ-CIETES POLISAHARĪDU HIDROLĪZE IERAUGA FERMENTĀCIJĀ / <i>HYDROLYSIS OF NON-STARCH POLYSACCHARIDES IN SOURDOUGH FERMENTATION</i>	34
1.7. IERAUGA FERMENTĀCIJAS IETEKME MĪKLAS STRUKTŪRAS VEIDOŠANĀ / <i>THE INFLUENCE OF SOURDOUGH FERMENTATION ON DOUGH STRUCTURE FORMATION</i>	36
LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF LITERATURE REVIEW</i>	39
2. MATERIĀLI UN METODES / MATERIALS AND METHODS	41
2.1. PĒTĪJUMA NORISES LAIKS UN VIETA / <i>TIME AND LOCATION OF THE RESEARCH</i>	41
2.2. PĒTĪJUMĀ IZMANTOTO MATERIĀLU RAKSTUROJUMS / <i>CHARACTERIZATION OF MATERIALS</i>	41
2.3. PĒTĪJUMA STRUKTŪRA / <i>STRUCTURE OF THE RESEARCH</i>	42
2.4. KAILGRAUDU MIEŽU MILTU ĶĪMISKĀ SASTĀVA ANALĪZE / <i>ANALYSIS OF HULL-LESS BARLEY FLOUR CHEMICAL COMPOSITION</i>	43
2.5. KAILGRAUDU MIEŽU IERAUGA FERMENTĀCIJA / <i>HULL-LESS BARLEY SOURDOUGH FERMENTATION</i>	44
2.5.1. Spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšana trīs posmu fermentācijā / <i>Determination of the optimal technological parameters of spontaneous sourdough three step fermentation</i>	44
2.5.2. Kailgraudu miežu ierauga ar tīrkultūrām fermentācija / <i>Fermentation of hull-less barley sourdough with starter cultures</i>	47
2.5.3. Mikrobioloģisko rādītāju noteikšanas metodes / <i>Methods of microbiological analysis</i>	48
2.5.4. Paraugu sagatavošana / <i>Sample preparation</i>	49
2.5.5. Mikroorganismu identifikācija / <i>Identification of microorganisms</i>	49
2.6. KAILGRAUDU MIEŽU IERAUGA UN MĪKLAS ANALIZĒŠANA / <i>ANALYSIS OF HULL-LESS BARLEY SOURDOUGH AND DOUGH</i>	49
2.6.1. Proteāžu aktivitātes noteikšana ieraugā / <i>Determination of protease activity of sourdough</i>	49
2.6.2. Kailgraudu miežu ierauga reoloģisko īpašību noteikšana / <i>Determination of rheological properties of sourdough and dough</i>	50
2.6.3. Kailgraudu miežu ierauga un mīklas mikrostruktūras analīzes metodes / <i>Microstructure evaluation of hull-less barley sourdough and dough</i>	50

2.7. MAIZES GATAVOŠANA UN FIZIKĀLO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA / <i>BREAD PREPARATION AND DETERMINATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES</i>	50
2.7.1. <i>Maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri un receptūra / Technological parameters and recipe of the bread preparation</i>	50
2.7.2. <i>Maizes fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes / Methods for the determination of physico-chemical parameters of bread</i>	51
2.8. GLUTĒNA SATURA NOTEIKŠANA PĒTĪJUMA V ETAPĀ / <i>DETERMINATION OF GLUTEN CONTENT IN THE STAGE V OF THE RESEARCH</i>	52
2.9. CIETES UN NE-CIETES POLISAHARĪDU NOTEIKŠANA / <i>DETERMINATION OF STARCH AND NON-STARCH POLYSACCHARIDES</i>	52
2.10. STATISTISKĀS DATU APSTRĀDES METODES / <i>STATISTICAL METHODS</i>	52
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA / <i>RESULTS AND DISCUSSION</i>	54
3.1. KAILGRAUDU MIEŽU MILTU ĶĪMISKAIS SASTĀVS / <i>CHEMICAL COMPOSITION OF HULL-LESS BARLEY FLOUR</i>	54
3.1. NODAĻAS KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF CHAPTER 3.1</i>	54
3.2. KAILGRAUDU MIEŽU IERAUGA FERMENTĀCIJAS RAKSTUROJUMS / <i>CHARACTERIZATION OF HULL-LESS BARLEY SOURDOUGH FERMENTATION</i>	55
3.2.1. <i>Mainīgo faktoru ietekme kailgraudu miežu ierauga fermentācijā / Effect of variable factors on the fermentation of hull-less barley sourdough</i>	55
3.2.2. <i>Mikrobiotas sukcesija kailgraudu miežu ierauga fermentācijas trijos posmos / Succession of microbiota in hull-less barley sourdough three step fermentation</i>	66
3.2. NODAĻAS KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF CHAPTER 3.2</i>	70
3.3. KAILGRAUDU MIEŽU SPONTĀNĀ UN AR TĪRKULTŪRĀM FERMENTĒTA IERAUGA IZVĒRTĒJUMS / <i>EVALUATION OF HULL-LESS BARLEY SPONTANEOUS AND FERMENTED WITH STARTER CULTURES SOURDOUGH</i>	72
3.3.1. <i>Kailgraudu miežu ierauga kvalitātes rādītāju raksturojums / Characterization of quality parameters of hull-less barley sourdough</i>	72
3.3.2. <i>Kailgraudu miežu ierauga reoloģiskās īpašības un fermentācijas ietekme uz mīklas struktūras veidošanos / The rheological properties of hull-less barley sourdough and effect of fermentation on dough structure formation</i>	74
3.3. NODAĻAS KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF CHAPTER 3.3</i>	78
3.4. GLUTĒNA SATURA IZMAIŅAS KAILGRAUDU MIEŽU IERAUGA FERMENTĀCIJĀ / <i>CHANGES IN GLUTEN CONTENT IN FERMENTATION OF HULL-LESS BARLEY SOURDOUGH</i>	78
3.4. NODAĻAS KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF CHAPTER 3.4</i>	80
3.5. CIETES UN NE-CIETES POLISAHARĪDU IETEKME UZ MAIZES FIZIKĀLAJĀM ĪPAŠĪBĀM / <i>IMPACT OF STARCH AND NON-STARCH POLYSACCHARIDES ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF BREAD</i>	80
3.5. NODAĻAS KOPSAVILKUMS / <i>SUMMARY OF CHAPTER 3.5</i>	85
SECINĀJUMI / <i>CONCLUSIONS</i>	87
REKOMENDĀCIJAS / <i>RECOMMENDATIONS</i>	88
LITERATŪRAS SARAKSTS / <i>BIBLIOGRAPHY</i>	89
PIELIKUMI / <i>APPENDICES</i>	101

Darbā iekļauto tabulu saraksts / *List of tables*

Tabulas Nr. / Table No	Tabulas nosaukums / Title of table	Lpp. / Page
1.1.	Kailgraudu miežu miltu ķīmiskais sastāvs / <i>Chemical composition of hull-less barley flour</i>	24
1.2.	Olbaltumvielu frakcijas (%) miežos, kviešos un rudzos / <i>Fraction (%) of barley, wheat and rye proteins</i>	26
1.3.	Kailgraudu miežu miltu šķiedrvielu sastāvs / <i>Dietary fibre composition of hull-less barley flour</i>	27
1.4.	Kailgraudu miežu miltu cukuru sastāvs / <i>The composition of sugars of hull-less barley flour</i>	29
1.5.	Kailgraudu miežu miltu, minerālvielu un fenolu savienojumu sastāvs / <i>Content of mineral of hull-less barley flour</i>	29
2.1.	Pētījuma etapu raksturojums / <i>Description of the research stages</i>	42
2.2.	Paraugu saīsinājumu skaidrojums / <i>Explanation of the sample abbreviations</i>	42
2.3.	Kailgraudu miežu miltu ķīmiskā sastāva analizēšanas metodes / <i>Analysis methods of chemical composition of the hull-less barley flour</i>	44
2.4.	Box-Behnken metodes struktūra / <i>Structure of Box-Behnken method</i>	45
2.5.	Box-Behnken eksperimenta plāns / <i>Box-Behnken experimental design</i>	46
2.6.	Izvirzītie kritēriji spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanai / <i>Criteria for determination of optimal technological parameters for spontaneous sourdough</i>	46
2.7.	Pētījuma II etapā izmantotās analītiskās metodes / <i>Analytical methods of the research Stage II</i>	48
2.8.	Pētījuma III etapā izmantotās analītiskās metodes / <i>Analytical methods of research Stage III</i>	49
2.9.	Maizes receptūra, % no miltu masas / <i>Recipe of bread, % of flour weight</i>	51
2.10.	Maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri / <i>Technological parameters of bread preparation</i>	51
2.11.	Maizes fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes IV etapā / <i>Methods for the determination of physico-chemical parameters of bread in the Stage IV</i>	52
3.1.	Kailgraudu miežu 'Kornelija' miltu ķīmiskais sastāvs / <i>Chemical composition of hull-less barley 'Kornelija' flour</i>	54
3.2.	Eksperimenta plāns un atbildes 1. posmā / <i>Experimental design and responses of the 1st step</i>	56
3.3.	1. posma modeļu dispersijas analīze / <i>Analysis of variance of the 1st step models</i>	57
3.4.	Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 1. posmā / <i>p-values of the variable factors effect on pH, LAB and yeasts of 1st step</i>	57
3.5.	Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 1. posmā / <i>Optimal technological parameters and results of the 1st step</i>	60
3.6.	Eksperimenta plāns un atbildes 2. posmā / <i>Experimental design and responses of the 2nd step</i>	61
3.7.	2. posma modeļu dispersijas analīze / <i>Analysis of variance of the 2nd step models</i>	61

Tabulas Nr. / Table No	Tabulas nosaukums / Title of table	Lpp. / Page
3.8.	Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 2. posmā / <i>p-values of the variable factors on pH, LAB and yeasts of the 2nd step</i>	62
3.9.	Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 2. posmā / <i>Optimal technological parameters and results of the 2nd step</i>	63
3.10.	Eksperimenta plāns un atbildes 3. posmā / <i>Experimental design and responses of the 3rd step</i>	64
3.11.	3. posma modeļu dispersijas analīze / <i>Analysis of variance of the 3rd step models</i>	64
3.12.	Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 3. posmā / <i>p-values of the variable factors on pH, LAB and yeasts of the 3rd step</i>	65
3.13.	Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 3. posmā / <i>Optimal technological parameters and results of the 3rd step</i>	66
3.14.	Retāk pārstāvētās pienskābes baktērijas kailgraudu miežu miltos un spontānā ierauga trīs fermentācijas posmos / <i>Less represented bacteria in the hull-less barley flour and three step fermentation of sourdough</i>	69
3.15.	Kailgraudu miežu ierauga ķīmiskie un mikrobioloģiskie rādītāji / <i>Chemical and microbiological characteristics of hull-less barley sourdough</i>	72
3.16.	Kompleksās viskozitātes un zudumu koeficienta izmaiņas kailgraudu miežu ierauga fermentācijā / <i>Changes in complex viscosity and loss factor of hull-less barley sourdough fermentation</i>	75

Darbā iekļauto attēlu saraksts / List of figures

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of figure	Lpp. / Page
1.1.	Ieraugu raksturojošie rādītāji / <i>The parameters of sourdough</i>	18
1.2.	Ierauga veidi / <i>Types of sourdough</i> (De Vuyst et al., 2021; Gobetti & Gänzle, 2013)	19
1.3.	Ierauga mikrobiotu ietekmējošie faktori / <i>Factors influencing microbiota of sourdough</i>	22
1.4.	Miežu (A) un kailgraudu miežu (B) izplatība pasaulē pēc izcelsmes / <i>Total barley (A) and hull-less barley (B) production share by world region</i> (Meints et al., 2021)	23
1.5.	Graudu olbaltumvielu šķīdība (pēc Osborna) un funkcionalitāte / <i>Grain protein solubility (according to Osborn) and functionality</i>	25
1.6.	Kailgraudu miežu cietes graudu attēls, A – 0% amilozes ciete, B – zema (1 – 5%) amilozes satura ciete, C – vidēja (20 – 30%) amilozes satura ciete, D – augsta amilozes satura ciete (Palielinājums × 450) <i>Starch granules of hull-less barley, A – 0% amylose starch, B – low (1 – 5%) amylose starch, C – normal amylose (20 – 30%) starch, D – high amylose starch (Magnification × 450)</i> (Li et al., 2001)	26

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of figure	Lpp. / Page
1.7.	β -glikānu (zils krāsojums) un arabinoksilānu (zaļš krāsojums) izvietojums miežu un kviešu grauda ārējos apvalkos un endospermā / <i>Microscopy of outer kernel layers and endosperm in barley and wheat grain – β-glucans (in blue) and arabinoxylans (in green)</i> (Dornez et al., 2011; Maina et al., 2021)	28
1.8.	Baktēriju sukcesija spontāno ierauga fermentācijā / <i>Succession of bacteria in spontaneous sourdough fermentation</i> (Oshiro et al., 2021)	31
1.9.	Peptīdu hidrolīze un aminoskābju producēšana ierauga fermentācijā / <i>Hydrolysis of peptides and producing amino acid in sourdough fermentation</i> (Salminen, S., & Wright, 2004)	33
1.10.	β -glikānu glikozīdisko saišu šķelšana enzīmu ietekmē / <i>Enzymatic hydrolysis of glycoside bounds within β-glucans</i> (Goudar et al., 2020)	35
1.11.	Ierauga un mīklas struktūras shematisks attēlojums / <i>Schematic representation of sourdough and dough structure</i>	36
1.12.	Kviešu (A) un rudzu (B) mīklas struktūra / <i>Structure of wheat (A) and rye (B) dough</i> (Gil-Humanes et al., 2014; Murniece et al., 2023)	38
2.1.	Spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanas secība / <i>Schematic representation of the optimal technological parameters of spontaneous sourdough determination</i>	44
2.2.	Kailgraudu miežu ierauga ar tūrkultūrām fermentācijas shēma / <i>The scheme of hull-less barley sourdough fermented with starter cultures fermentation</i>	48
3.1.	1. posma eksperimenta paraugu attēli / <i>Visual images of samples in the 1st step of experiment</i>	55
3.2.	Mainīgo faktoru vienlaicīga ietekme uz ierauga pH 1. posmā / <i>The effect of variable factors on pH of sourdough in the 1st step of fermentation</i>	58
3.3.	Mainīgo faktoru ietekme uz PB \log_{10} KVV g^{-1} 1. posma fermentācijā / <i>The effect of variable factors on LAB \log_{10} CFU g^{-1} in the 1st step of fermentation</i>	58
3.4.	Temperatūras un ūdens daudzuma ietekme uz raugu \log_{10} KVV g^{-1} 1. posmā atkarībā no ierauga fermentācijas laika / <i>The effect of temperature and water amount on yeasts \log_{10} CFU g^{-1} in the 1st step fermentation of sourdough</i>	59
3.5.	Laika un ūdens ietekme uz ierauga pH 2. posmā / <i>The effect of time and water on pH of sourdough in the 2nd step</i>	62
3.6.	Laika un ūdens ietekme uz PB (A) un raugu (B) \log_{10} KVV g^{-1} 2. posma fermentācijā / <i>The effect of time and water on LAB (A) and yeasts (B) \log_{10} CFU g^{-1} in the 2nd step fermentation</i>	62
3.7.	Temperatūras un ūdens ietekme uz pH 3. posma fermentācijā / <i>The effect of temperature and water on pH in 3rd step of the fermentation</i>	65

Attēla Nr. / Figure No	Attēla nosaukums / Title of figure	Lpp. / Page
3.8.	Temperatūras un ūdens ietekme uz PB (A) un raugu (B) atbildēm 3.posma fermentācijā / <i>The effect of temperature and water on LAB (A) and yeasts (B) responses in 3rd step of fermentation</i>	65
3.9.	Baktēriju (A) un mikroskopisko sēņu (B) identificēto sugu skaits kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas trīs posmos / <i>Bacteria (A) and fungi (B) richness in hull-less barley flour and in hull-less barley spontaneous sourdough three steps fermentation</i>	67
3.10.	Biežāk pārstāvēto baktēriju ģintis un sugas kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānajā ierauga fermentācijas trīs posmos / <i>The most represented bacteria genus and species in hull-less barley flour and in spontaneous sourdough in three steps fermentation</i>	68
3.11.	Biežāk pārstāvēto mikroskopisko sēņu ģintis un sugas kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānajā ierauga fermentācijas trīs posmos / <i>The most represented genus and species of fungi in hull-less barley flour and spontaneous sourdough in three steps fermentation</i>	70
3.12.	Ierauga KMI-T (A) un KMI-S (B) attēls / <i>Image of sourdough HBS-T (A) and HBS-S (B)</i>	73
3.13.	Kailgraudu miežu spontānā ierauga virsmas slāņa krāsojums pēc 1. posma fermentācijas / <i>Surface coloration of hull-less barley spontaneous sourdough after 1st step fermentation</i>	73
3.14.	Mikrostruktūras attēli kailgraudu miežu ierauga fermentācijas trīs posmos / <i>Microstructure of spontaneous sourdough in three steps of fermentation</i>	74
3.15.	Uzkrājuma (G' , Pa) un zudumu (G'' , Pa) moduļu izmaiņas fermentācijas ietekmē / <i>Effect of fermentation on storage (G', Pa) and loss (G'', Pa) moduli</i>	76
3.16.	Kailgraudu miežu mīklas struktūra pēc samīcīšanas / <i>Structure of hull-less barley dough after kneading</i>	76
3.17.	Kailgraudu miežu mīklas struktūra pēc 4 h fermentācijas / <i>Structure of hull-less barley dough after 4 h fermentation</i>	77
3.18.	Cietes (A) un šķiedrvielu (B) saturs, % sausnā / <i>Starch (A) and dietary fibre (B) content, % dw</i>	81
3.19.	β -glikānu (A), mannānu (B), fruktānu (C) saturs, % sausas / <i>β-glucans (A), mannans (B), fructans (C) content, % dw</i>	82
3.20.	Kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizes fizikālie rādītāji / <i>Physical characteristics of hull-less barley and wholegrain wheat bread</i>	83
3.21.	Kailgraudu miežu maizes mīkstuma attēls / <i>Hull-less barley bread crumb image</i>	84
3.22.	Pilngraudu kviešu maizes mīkstuma attēls / <i>Wholegrain wheat bread crumb image</i>	84
3.23.	Kailgraudu miežu, pilngraudu kviešu maizes un to ķīmisko un fizikālo rādītāju savstarpējo sakarību attēlojums galveno komponentu analīzes plaknēs / <i>Relationship between physical and chemical parameters of hull-less barley and wholegrain wheat bread</i>	85

**Darbā izmantoto apzīmējumu, saīsinājumu un terminu skaidrojums /
List of explanation of designations, abbreviations and main terms included in the doctoral
thesis**

ANOVA	Dispersijas analīze / <i>Analysis of variance</i>
AOAC	Oficiālā analītiskās ķīmijas asociācija / <i>Association of Official Analytical Chemists</i>
AREI	Agroresursu un ekonomikas institūts / <i>The Institute of Agro-Resources and Economics</i>
DSMZ	Vācijas mikroorganismu un šūnu kultūru kolekcija / <i>German Collection of Microorganisms and Cell Cultures GmbH</i>
dw	Sausna / <i>Dry weight</i>
EFSA	Eiropas pārtikas nekaitīguma iestāde / <i>European Food Safety Authority</i>
ELISA	Cietfāzes enzīmu imūnsorbences tests / <i>Sandwich enzyme-linked immunosorbent assay</i>
EPS	Eksopolisaharīdi / <i>Exopolysaccharides</i>
FDA	ASV Pārtikas un zāļu pārvalde / <i>U.S. Food and Drug Administration</i>
g	Grams / <i>Gram</i>
g g ⁻¹	Grams gramā / <i>Grams per gram</i>
Hz	Hercs / <i>Hertz</i>
ITS	Ribosomu iekšējā transkribētā starplika / <i>Ribosomal internal transcriber spacer</i>
KVV / CFU g ⁻¹	Kolonijas veidojošās vienības gramā / <i>Colony forming units per gram</i>
LBTU	Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte / <i>Latvia University of Life Sciences and Technologies</i>
LPTF	Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte / <i>Faculty of Agriculture and Food Technology</i>
mmol	Milimols / <i>Millimole</i>
MRS	De Man-Rogosa-Sharpe agars / <i>De Man-Rogosa-Sharpe agar</i>
N	Nūtons / <i>Newton</i>
NaCl	Nātrija hlorīds / <i>Sodium chloride</i>
O ₂	Skābeklis / <i>Oxygen</i>
°C	Celsija grādi / <i>Celsius degree</i>
p	p-vērtība / <i>p-value</i>
WGPAT	Prolamīnu analīzes darba grupa / <i>Working group on Prolamin Analysis and Toxicity</i>
PCA	Galveno komponentu analīze / <i>Principal component analysis</i>
pH	Fizikālķīmisks lielums šķīduma skābuma un bāziskuma kvantitatīvai raksturošanai / <i>Quantitative measure of the acidity or basicity of aqueous or other liquid solutions that translates the values of the Hydrogen which ordinarily ranges between about 1 and 10 – 14 gram-equivalents per litre into numbers between 0 and 14</i>
ppm	Miljarddaļa / <i>Part per million</i>
Pa	Paskāls / <i>Pascal</i>
QPS	Kvalificēta drošības prezumpcija / <i>Qualified presumption of safety</i>
s	Sekunde / <i>Second</i>
TA	Tanīnskābes ekvivalents / <i>Tannic acid equivalent</i>
TE	Troloks ekvivalents / <i>Trolox equivalent</i>
GAE	Galluskābes ekvivalents / <i>Gallic acid equivalent</i>
KE /QE	Kvercetīna ekvivalents / <i>Quercetin equivalent</i>
Da	Daltons / <i>Dalton</i>
η	Kompleksā viskozitāte / <i>Complex viscosity, Pa s</i>

Darbā lietoto terminu skaidrojums / *Explanation of the terms included in the thesis*

Epitops / <i>Epitope</i>	Noteikts antigēna virsmas apgabals, ko ķīmiski atpazīst antivielas / <i>Part of an antigen which is recognised by the immune system</i>
Fermentācija / <i>Fermentation</i>	Mikroorganismu enerģijas ieguves process, kurā anaerobos vai skābekļa ierobežotas pieejamības apstākļos notiek organisko vielu pārveidošana par vienkāršākiem savienojumiem bez ārēja enerģijas avota iesaistīšanās / <i>Energy-yielding process in which organic compounds are metabolized, usually under anaerobic or microaerobic conditions, to simpler compounds without the involvement of an exogenous electron acceptor</i> (Denny, 2006) Organisku vielu pārveidošana vienkāršākās, ko veic mikroorganismi / <i>Conversion of organic materials into relative simple substances by microorganisms</i> ¹
Glutēns / <i>Gluten</i>	Kviešu, miežu, rudzu, auzu vai to krustoto šķirņu olbaltumviela, kuru atsevišķi indivīdi nepanes un kura nešķīst ūdenī un 0.5 M NaCl šķīdumā / <i>Protein fraction from wheat, rye, barley, oats or their crossbred varieties and derivatives thereof, to which some persons are intolerant and which is insoluble in water and 0.5 M sodium chloride solution</i> (Regula (ES) Nr / <i>Regulation (EU) No 828 / 2014</i>) ²
Lipeklis / <i>Gluten</i>	Lipeklis ir ūdenī nešķīstošo olbaltumvielu veidota elastīga, gumijai līdzīga mīkla, ko veido gliadīns un glutenīns / <i>Elastic, glue like dough of gliadins and glutenins</i> (Kunkulberga & Segliņš, 2010)
Mikrobiota / <i>Microbiota</i>	Mikroorganismu kopums noteiktā vidē / <i>The assemblage of microorganisms present in a defined environment</i> (Marchesi & Ravel, 2015)
Pienskābes baktēriju taksonomiskā klasifikācija / <i>Taxonomic classification of lactic acid bacteria</i>	Pienskābes baktēriju sugu nosaukumi doti atbilstoši taksonomiskai klasifikācijai saskaņā ar Zheng et al. (2020) / <i>Taxonomic classification according to Zheng et al. (2020)</i>
rRNS / <i>rRNA</i>	Ribosomālā RNS (ribonukleīnskābes molekula, kas kopā ar proteīniem veido ribosomu) baktēriju identifikācijas metode / <i>Ribosomal RNA (ribonucleic acid) identification method for bacteria</i>
Spontānā fermentācija / <i>Spontaneous fermentation</i>	Fermentācija sākas tikai miltos, ūdenī un apkārtējā vidē esošo mikroorganismu un miltu enzīmu aktivitātes rezultātā / <i>Fermentation is initiated by microorganisms of flour, water and environment and by flour enzymatic activity</i>
Sukcesija / <i>Succession</i>	Likumsakarīga, secīga ekosistēmas attīstība un pārveidošanās / <i>Sequential development and transformation of ecosystem</i>

¹*Fermentācija / Fermentation*: Interactive Terminology for Europe [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://iate.europa.eu/home>

²*Komisijas īstenošanas regula (ES) Nr. 828 /2014*: Eiropas Savienības Oficiālais Vēstnesis L 228 /5, 31.07.2014 [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>

IEVADS / INTRODUCTION

Ierauga fermentācija tiek izmantota maizes gatavošanā. Ierauga fermentāciju veic miltu spontānā mikrobiota un enzīmi, kā arī fermentācijas uzsākšanai var pievienot tīrkultūras. Spontānā ierauga fermentācijā vienlaicīga vairāku tehnoloģisko parametru mijiedarbība ietekmē mikrobiotas attīstību un ieraugu raksturojošos rādītājus. Fermentācijas stabilitātes un ierauga funkcionālo īpašību nodrošināšanai tiek izvēlētas pienskābes baktēriju un rauga tīrkultūras. Pētnieku pastiprinātu interesi izraisījusi ierauga ietekme uz miltos esošo uzturvielu kvantitatīvām un kvalitatīvām pārvērtībām un to pozitīvā ietekme uz maizes kvalitāti un cilvēka veselību (Arora et al., 2021; Gobbetti et al., 2019; Rizzello et al., 2019). Ierauga fermentācijā tradicionāli tiek izmantoti rudzu un kviešu milti, taču pētnieku interesi izraisījuši kailgraudu mieži kā alternatīva izejviela (Mariotti et al., 2014). Latvijā selekcionētiem kailgraudu miežiem raksturīgs augsts olbaltumvielu, šķiedrvielu, tostarp ne-cietes polisaharīdu, īpaši β -glikānu, kā arī vitamīnu, minerālvielu un fenolu saturs. Kailgraudu mieži (*Hordeum vulgare* L.) to augstvērtīgā sastāva dēļ ir atzīti kā bioloģiski pilnvērtīga izejviela funkcionālo produktu izstrādei (Šterna et al., 2015) un vērtējama kā piemērota izejviela ierauga fermentācijai un maizes ar augstu uzturvērtību gatavošanai. Kailgraudu miežu spontānais ieraugs vērtējams kā mikroorganismu avots mīklas fermentācijai un alternatīvs ieraugs maizes gatavošanai. Ierauga fermentācijā miltu enzīmi un mikroorganismu producēti enzīmi veicina ne-cietes polisaharīdu hidrolīzi, kas uzlabo maizes fizikālās īpašības. Ierauga fermentācija būtu risinājums maizes, kurā struktūru neveido lipekļi un kurā ir augsts šķiedrvielu saturs, fizikālo īpašību uzlabošanai. Pienskābes baktēriju proteolītiskie enzīmi veic olbaltumvielu sašķelšanu, paaugstinot maizes bioloģisko vērtību. Tādējādi ierauga fermentācija būtu piemērota kailgraudu miežu maizes gatavošanā.

Promocijas darba **hipotēze**: kailgraudu mieži ir alternatīva izejviela ierauga fermentācijā un maizes gatavošanā.

Pētījuma **objekti**: kailgraudu miežu spontānais ieraugs, ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs un kailgraudu miežu ierauga maize.

Promocijas darba hipotēzi pierāda ar šādām **tēzēm**.

1. Fermentācijā optimālo tehnoloģisko parametru ietekmē notiek ieraugam raksturīgā mikrobiotas sukcesija.
2. Kailgraudu miežu spontānā ierauga mikrobioloģiskie un fizikālie rādītāji atbilst aktīva ierauga raksturojošiem rādītājiem; ar tīrkultūrām fermentētam ieraugam var iegūt paaugstinātu proteolītisko aktivitāti.
3. Kailgraudu miežu ierauga fermentācijā samazinās glutēna saturs attiecībā pret tā saturu miltos.
4. Ne-cietes polisaharīdu saturs maizē ietekmē tās fizikālās īpašības.

Promocijas darba **mērķis**: pētīt kailgraudu miežu ierauga fermentāciju un vērtēt tās ietekmi uz glutēna un ne-cietes polisaharīdu saturu un miežu maizes fizikālajām īpašībām.

Mērķu sasniegšanai izvirzītie **uzdevumi**.

1. Noteikt optimālos tehnoloģiskos parametrus kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijai un pienskābes baktēriju un mikroskopisko sēņu taksonomisko sastāvu ieraugā.
2. Izzināt mikrobiotas sukcesiju kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijā.
3. Vērtēt kailgraudu miežu spontānā un ar tīrkultūrām fermentēta ierauga kvalitātes rādītājus un reoloģiskās īpašības.
4. Izpētīt ar kailgraudu miežu ieraugu gatavotas kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizes fizikālās īpašības.
5. Noteikt glutēna saturu kailgraudu miežu ieraugā un kailgraudu miežu maizē.

6. Analizēt ne-cietes polisaharīdu saturu kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizē un analizēt to ietekmi uz maizes fizikālajām īpašībām.

Pētījuma **novitāte**: pirmo reizi Latvijā veikta kailgraudu miežu ierauga fermentācijas izpēte.

1. Izzināta mikrobiota kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijā.
2. Izstrādāti kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas optimālie tehnoloģiskie parametri un aprakstīta pienskābes baktēriju tīrkultūru izmantošana ierauga fermentācijā.
3. Sniegta kailgraudu miežu mīklas struktūras veidošanās analīze.
4. Noteikta fermentācijas ietekme uz glutēna, β -glikānu, fruktānu un mannānu satura izmaiņām kailgraudu miežu ieraugā un maizē.

Pētījuma **tautsaimnieciskā nozīme**.

1. Pētījums piedāvā optimālos tehnoloģiskos parametrus kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijai.
2. Kailgraudu miežu ieraugu var izmantot maizes gatavošanai kā alternatīvu tradicionālajiem ieraugiem.
3. Pētījuma rezultāti sniedz informāciju par glutēna un ne-cietes polisaharīdu saturu ar kailgraudu miežu ieraugu gatavotā maizē un pamato maizes augsto uzturvērtību.

Pētījums veikts ar “Zinātniskās kapacitātes stiprināšana Latvijas Lauksaimniecības universitātē” projekta Nr. 3.2.-10/125 “Biotehnoloģiskie risinājumi miežu ierauga izstrādē ar samazinātu glutēna saturu” līdzfinansējumu. Pētījumā izmantots programmas “Fundamentālo pētījumu veikšana LLU” Nr. 2020-LLU-141 “Bioloģiski aktīvo savienojumu izpēte miežu pilngraudu maizē” atbalsts.

Promocijas darba izstrāde notika ar “LLU pāreja uz jauno doktorantūras finansēšanas modeli” projekta Nr. 8.2.2.0/20/1/001 līdzfinansējumu.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

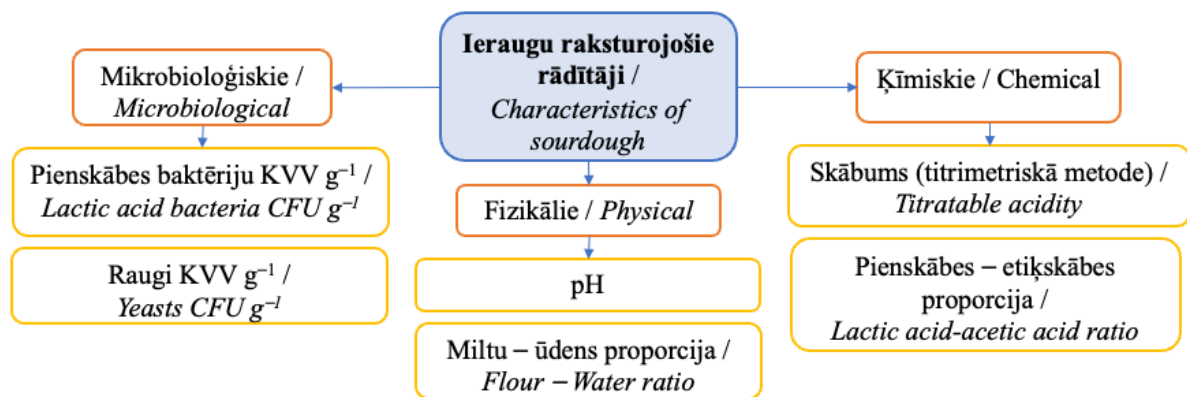
1. LITERATŪRAS APSKATS / *REVIEW OF LITERATURE*

Ierauga fermentācija tiek atzīta kā biotehnoloģiska metode, ko izmanto maizes gatavošanā. Zinātniskie pētījumi atklāj ierauga pozitīvo ietekmi uz maizes aromātu un garšu un uz maizes kvalitātes izmaiņām uzglabāšanas laikā. Jaunākie pētījumi par ieraugu akcentē tā fermentācijas ietekmi uz maizes uzturvērtību un funkcionālajām īpašībām, piemēram, glikēmiskā indeksa samazināšanu, minerālvielu biopieejamības palielināšanu un olbaltumvielu hidrolīzi alerģiskuma samazināšanai, kā arī bioloģiski aktīvu vielu sintēzi.

1.1. Ierauga raksturojums un veidi / *Sourdough characteristics and types*

Tradicionālā izpratnē ieraugs ir kviešu vai rudzu miltu un ūdens maisījums, kas fermentēts spontāni ar pienskābes baktērijām un raugiem (Arora et al., 2021; Gobbetti, 1998; Van Kerrebroeck et al., 2017), kuru metabolisma produkti nosaka ierauga pH samazināšanos un CO₂ veidošanos. Mīklas fermentācija ar ieraugu ietekmē maizes skābumu, aromātu, garšu, struktūru, uzglabāšanas laiku un uzturvielu kvantitatīvo un kvalitatīvo sastāvu.

Ieraugu raksturo mikrobioloģiskie, fizikālie un ķīmiskie rādītāji (1.1. att.). No mikrobioloģiskā viedokļa ieraugs ir aktīvu mikroorganismu sistēma, kurai ir mainīga pieejamo ogļhidrātu un citu uzturvielu koncentrācija, un kas raksturojas ar zemu pH, ierobežotu skābekļa pieejamību un paaugstinātu pienskābes baktēriju skaitu $>10^8$ KVV g⁻¹ un raugu $<10^7$ KVV g⁻¹ skaitu proporcijā 10:1 līdz 100:1 (De Vuyst et al., 2017, 2021; Gobbetti, 1998). Ierauga mikroorganismu metabolisma rezultātā notiek pH samazināšanās, garšas un aromāta veidošanās un CO₂ izdalīšana, kas izmaina ieraugu raksturojošos rādītājus (1.1. att.). Pienskābes baktērijas nodrošina garšas un aromāta veidošanos maizē. Rauga svarīgākā nozīme ir maizes apjoma palielināšana, ko nodrošina spirta rūgšanā izdalītais CO₂. Ieraugu raksturo pienskābes baktēriju un raugu sastāvs un īpašības.

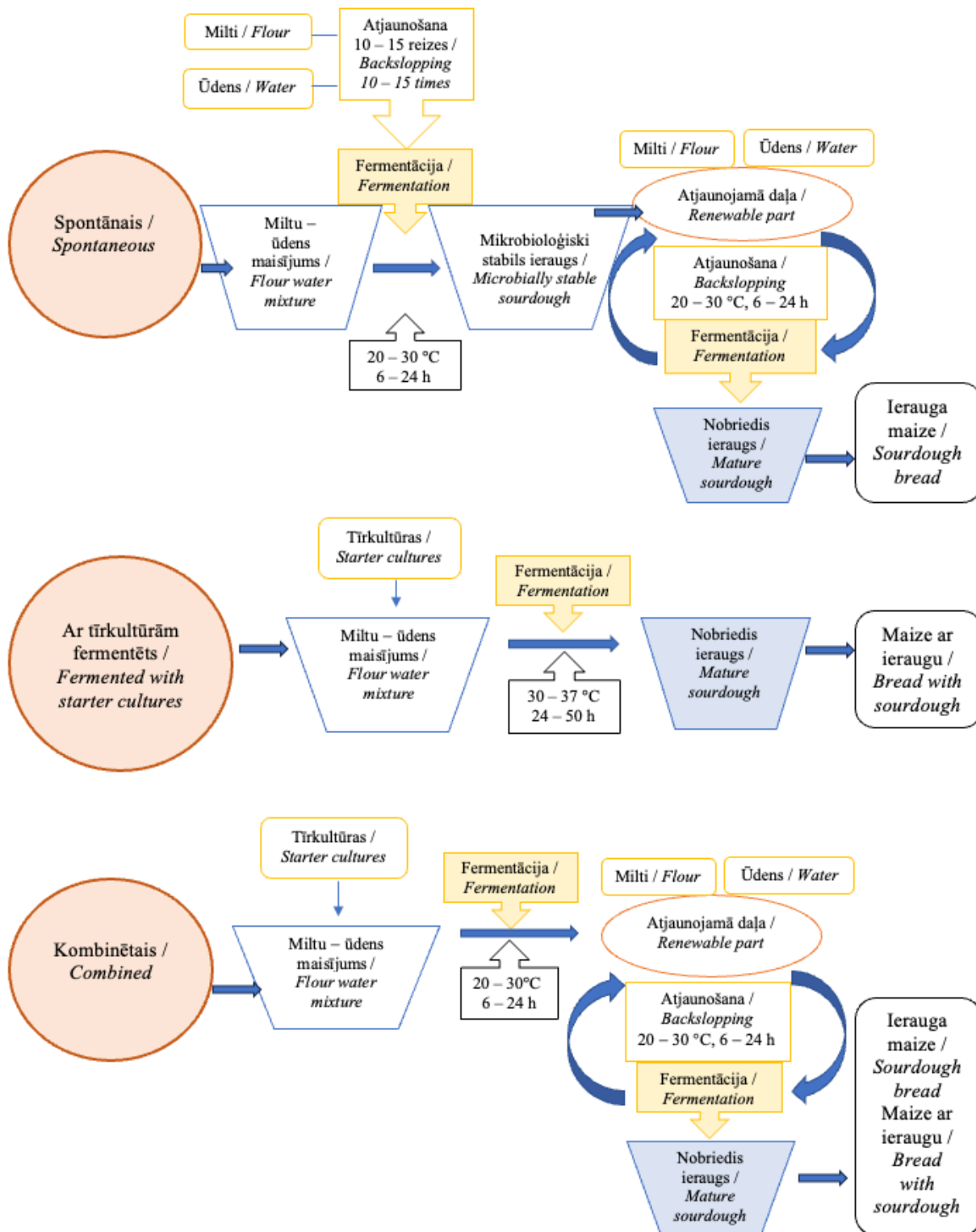


1.1. att. Ieraugu raksturojošie rādītāji / Fig. 1.1. *The parameters of sourdough*

Viens no galvenajiem pienskābes baktēriju metabolisma produktiem ir organiskās skābes. Ieraugu raksturo pH 3.5 – 4.5. Svarīgs fizikālais rādītājs ir miltu un ūdens proporcija, kas nosaka ierauga viskozitāti. Bieza (arī saukts kā ciets) ierauga mīklas iznākums (miltu un ūdens masa $\times 100$ / miltu masa) ir 150 – 160, bet šķidra – ar 200 un augstāks (Gobbetti & Gänzle, 2013). Vidējs iznākums norāda uz mīkstu ieraugu. Dažādiem miltiem var būt atšķirīga ūdens absorbcijas spēja, tāpēc ar vienādu miltu un ūdens proporciju var iegūt maisījumus ar dažādām reoloģiskām īpašībām. Fermentācijas procesā enzimatiskās ietekmes rezultātā tiek vājinātas starpmolekulārās saites, tādējādi samazinot ierauga komplekso viskozitāti un izmainot viskozās un elastīgās īpašības. Šādas pārvērtības ietekmē mīklas un maizes struktūras veidošanos. Skābums izsaka skābju daudzumu, kas veidojies fermentācijas procesā. Biezie ieraugi

raksturojas ar augstāku etiķskābes, bet šķidrie – ar augstāku pienskābes saturu (De Vuyst et al., 2017; Gobbetti & Gänzle, 2013).

Ieraugus var iedalīt pēc izejvielas veida – kviešu, rudzu un alternatīvie ieraugi (miežu, rīsu, sorgo u.c.). Bioķīmiskie procesi ierauga fermentācijā var sākties spontāni, pēc tīrkultūru pievienošanas vai pēc uzraudzēta ierauga daļas pievienošanas (Kunkulberga & Segliņš, 2010). Arī pētnieks De Vuyst et al. (2021) ieraugus klasificē atkarībā no mikroorganismu pievienošanas veida (1.2. att.).



1.2. att. **Ierauga veidi / Fig. 1.2. Types of sourdough**
(De Vuyst et al., 2021; Gobbetti & Gänzle, 2013)

Katram veidam ir atšķirīga mikrobiota un fizikāli – ķīmiskie rādītāji. Atkarībā no mikroorganismu pievienošanas izšķir trīs ierauga veidus – spontānais, ar tīrkultūrām (literatūrā minēti attiecīgi kā 1. un 2. veids), un kombinētais veids. Ierauga atjaunošanai un mīklas fermentācijas uzsākšanai izmanto aktīvu ieraugu³.

Spontānais ieraugs

Spontānā (*Type I*, angļu val.) ierauga fermentācijā izmanto miltu dabisko mikrobiotu. Spontānai fermentācijai ir nozīmīga apkārtējās vides un izejvielu mikrobiotas ietekme. Ar spontāno metodi gatavots ieraugs balstās uz periodisku atjaunošanas procesu, kurā atjaunojamā ierauga daļa (mātes ieraugs), tiek papildināta ar jaunu miltu un ūdens porciju (De Vuyst et al., 2017; Gobbetti & Gänzle, 2013). Lai iegūtu spontāno ieraugu, nepieciešami vismaz trīs fermentācijas posmi, taču stabilas un nobriedušas mikrobiotas (nobriedis ieraugs) iegūšanai literatūrā minētas 10 – 15 atjaunošanas reizes (Brandt & Gänzle, 2006; De Vuyst et al., 2017). Atjaunošanas procesā ar atjaunojamās daļas palīdzību mikroorganismi tiek pārnesti jaunā miltu un ūdens porcijā, tādējādi nodrošinot fermentācijas uzsākšanu. Atjaunošanas posmā dažādi mikroorganismi adaptējas vidē atkarībā no pieejamām barības vielām un to augšanu ietekmējošiem faktoriem. Spontānā ierauga mikrobiotas daudzveidību nodrošina šādi faktori:

- atjaunošanas posmos pievienotais barības vielu saturs, ko nosaka miltu maluma pakāpe un ķīmiskais sastāvs, un miltu dabiskā mikrobiota;
- tehnoloģiskie parametri;
- vairāku posmu fermentācija.

Spontāno ieraugu, galvenokārt, lieto ceptuvēs, kurās izmanto tradicionālo maizes gatavošanas tehnoloģiju. Spontānā ierauga gatavošanā piemēro īsu līdz vidēju fermentācijas laiku (6 – 24 h) 20 – 30 °C temperatūrā, ar zemu iznākumu. Spontānais ieraugs ir piemērots, lai panāktu mīklas apjoma palielināšanu bez papildus irdinātāju pievienošanas (Gobbetti & Gänzle, 2013). Irdināšanas kapacitāte (apjoma palielināšana) ir svarīga spontānā ierauga īpašība. Tā balstās uz rauga izdalīto CO₂, un nozīmīga loma ir arī heterofermentatīvām pienskābes baktērijām. Latvijā tradicionālās rudzu maizes gatavošanā izmanto spontāno ieraugu (Klava et al., 2023). Zinātniskajā literatūrā ir aprakstīti vairāki spontānā kviešu ierauga gatavošanas paņēmieni, no kuriem pazīstamākie ir franču metode un amerikāņu sistēma. Spontānā rudzu ierauga gatavošana ir tradicionāla Ziemeļu un Austrumu Eiropas daļā (Klava et al., 2023). Literatūrā sniegti vairāki rudzu un kviešu ierauga spontānās fermentācijas piemēri (Brandt & Gänzle, 2006; Spicher & Stephan, 1993), kuros izmantotas dažādas tehnoloģisko parametru kombinācijas vairākos posmos: 68 – 96 h fermentācija 3 – 4 posmos, 23 – 35 °C temperatūrā ar dažādu mīklas iznākumu (160 – 400). Pētnieks E. Kozlinskis izmantojis rudzu ieraugu fermentācijas trīs fāžu sistēmu (Kozlinskis et al., 2010). Ar trīs fāžu sistēmas palīdzību tiek iegūta skābju daudzveidība (*Anfrischsauer*, *Grundsauer*, *Vollsauer*, vācu val.) (De Vuyst et al., 2017). Vairāku posmu fermentācijas sistēmā ierauga pH pazemināšanās nenotiek strauji. Ar katrā fāzē atšķirīgu tehnoloģisko parametru palīdzību tiek nodrošināta labvēlīga vide arī raugu un heterofermentatīvo pienskābes baktēriju augšanai. Līdzās pienskābes baktērijām, saglabājot raugu pietiekamu pārstāvniecību, tiek nodrošināta mīklas apjoma palielināšanās. Spontānais ieraugs ir uzskatāms par dažādu mikroorganismu maisījumu (Gobbetti & Gänzle, 2013).

Ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs

Ierauga fermentāciju var sākt, miltu un ūdens maisījumam pievienojot speciāli selekcionētu pienskābes baktēriju tīrkultūru vai to maisījumu (*Lactobacillus amylovorus*, *Levilactobacillus brevis*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Lactiplantibacillus plantarum*,

³*Understanding Sourdough: building a common ground*: Federation of European Manufacturers and Suppliers of Ingredients to the Bakery, Confectionery and Patisseries Industries Position Paper, 02 /22 [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://www.fedima.org/resources/informed-customers-consumers/138-understanding-sourdough-building-a-common-ground>

Limosilactobacillus reuteri, *Furfurilactobacillus rosiae*), kuru metabolisma rezultātā strauji pazeminās miltu un ūdens maisījuma pH un veidojas aromāts (De Vuyst et al., 2021). Ar tīrkultūrām fermentētam ieraugam raksturīga kontrolēta 24 – 50 h fermentācija temperatūrā >30 °C. Šāda ierauga skābums var būt 30 – 150 ml NaOH. Ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs, galvenokārt, tiek izmantots komerciāla ierauga iegūšanai, un to lieto kā izejvielu aromāta veidošanai vai tehnoloģisko funkciju nodrošināšanai (pH pazemināšana mīklā, uzglabāšanas laika pagarināšana). Atkarībā no pievienoto pienskābes baktēriju īpašībām ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs var būt ar funkcionālām īpašībām, piemēram, kā maizes struktūras uzlabotājs ar paaugstinātu antifungālo un proteolītisko aktivitāti. Ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs var saturēt raugu *Saccharomyces cerevisiae*, kas tiek pievienots ražošanas procesa beigās (De Vuyst et al., 2017). Atkarībā no ierauga ražošanas procesa un galaprodukta tas var būt šķidrā vai biezā, sausā (liofilizētie, kaltētie), vai saldētā veidā. Sausā veida ierauga ražošanā tiek izmantotas pienskābes baktēriju tīrkultūras, kas ir izturīgas šādos apstākļos (*Levilactobacillus brevis*, *Lactiplantibacillus plantarum* un *Pediococcus pentosaceus*) (De Vuyst & Neysens, 2005). Ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs ražošanas procesa beigās var saturēt vai arī nesaturēt aktīvus mikroorganismus.

Kombinētā ierauga veids

Kombinētā ierauga fermentācija tiek sākota ar pienskābes baktēriju un rauga tīrkultūru pievienošanu, veicot turpmāku atjaunošanu ar jaunu miltu un ūdens porciju, kā spontānā ierauga gadījumā. Šādā fermentācijā raksturīga mikrobiotas sukcesija trīs posmos līdz dominē pievienotās pienskābes baktērijas. Tomēr var rasties konkurence starp dabiskās mikrobiotas mikroorganismiem un pievienotajām tīrkultūrām. Šādu situāciju var veicināt konkrētajiem mikroorganismiem nepiemēroti apstākļi vai nav notikusi pielāgošanās dotajai barības videi un mikrobiotai (Siragusa et al., 2009). Tāpēc iesakāma kombinētā ierauga fermentācijas sākšana laboratorijā, lai pārbaudītu tīrkultūras augšanu ieraugā. Tīrkultūras var būt saņemtas no mikroorganismu kolekcijām vai izmantots komerciālais ieraugs. Neseni pētījumi liecina par no ieraugiem izdalītu mikroorganismu izmantošanu kombinētā ierauga fermentācijā (Gänzle et al., 2023).

1.2. Ierauga fermentāciju ietekmējošie faktori / *Factors influencing the sourdough fermentation*

Fermentācijas procesā ierauga mikroorganismu vairošanos ietekmē tehnoloģiskā procesa parametri (1.3. att.). Nozīmīgākie ietekmējošie tehnoloģiskie parametri ieraugā ir temperatūra, laiks un miltu un ūdens proporcija. Mikroorganismu vairošanos nosaka tehnoloģiskie parametri. Noteiktu parametru izmantošana noved pie konkrētu mikroorganismu atlases ieraugā, kas vislabāk piemēroti šiem apstākļiem. Ierauga fermentācijas procesā temperatūrai ir galvenā nozīme mikrobiotas attīstībā un metabolītu producēšanas dinamikā. Temperatūrai ir savstarpēja saistība ar fermentācijas laiku. Augstākā temperatūrā (>30 °C) polisaharīdu sadalīšanās par maltozi un glikozi notiek intensīvāk kā arī pastiprinās pienskābes veidošanās, veicinot pH pazemināšanos (De Vuyst et al., 2017). Šāds temperatūras režīms piemērots homofermentatīvās pienskābes baktērijas *Lactiplantibacillus plantarum* augšanai un *Lactobacillus delbrueckii*, kas piemērota fermentācijai paaugstinātās temperatūrās (45 – 55 °C), veidojot pienskābi un strauji pazeminot pH. Tomēr ilgstoša paaugstināta fermentācijas temperatūra var kavēt rauga darbību. Zemāka temperatūra (<30 °C) veicina rauga augšanu, etanola veidošanos, CO₂ izdalīšanu. Zemās temperatūrās gatavotos ieraugos dominē heterofermentatīvās pienskābes baktērijas, piemēram *Fructilactobacillus sanfranciscensis*, *Levilactobacillus brevis* (Van Kerrebroeck et al., 2017), kas producē pienskābi, etiķskābi un etanolu. Zemas temperatūras (<30 °C) ir piemērotas asociāciju veidošanai starp raugiem un pienskābes baktērijām. Bessmeltseva et al. (2014) norāda uz temperatūras ietekmi uz rauga sugu daudzveidību spontānos ieraugos, kuros

30 °C fermentācijas temperatūrā identificēti *Saccharomyces cerevisiae* un *Candida krusei* (tagad *Issatchenkia orientalis*), bet 20 °C *Kazachstania unispora*.



1.3. att. Ierauga mikrobiotu ietekmējošie faktori /
Fig. 1.3. Factors influencing microbiota of sourdough

Fermentācijas laiks ietekmē mikroorganismu daudzveidību, metabolītu veidošanās intensitāti un pH, kā arī barības pieejamību mikroorganismiem. Pagarinoties fermentācijas laikam, barības pieejamība mikroorganismiem kļūst ierobežota, vienlaicīgi pazeminoties pH. Šādi apstākļi piemēroti pienskābes baktērijām, kuras izturīgas pret zemu pH un ierobežotu barības pieejamību, kā piemēram, *Limosilactobacillus fermentum* un *Lactiplantibacillus plantarum* (De Vuyst et al., 2017). Vrancken et al. (2011) pētījums parāda fermentācijas laika un temperatūras būtisku ietekmi mikrobiotas attīstībā. *Limosilactobacillus fermentum* augšana konstatēta 24 h fermentācijā 30 °C un 37 °C, taču 48 h 30 °C – konstatēta *Limosilactobacillus fermentum* un *Lactiplantibacillus plantarum* kombinācija, savukārt, 24 h fermentācijā 23 °C atrasta *Leuconostoc citreum* un *Pediococcus pentosaceus*. Pēc 48 h fermentācijas uzrādīta būtiski zemāka maltozes koncentrācija un saharozes glikozes trūkums ieraugā nekā pēc 24 h. Fermentācijas laiks, kas ilgāks par 24 h, palielina pienskābes baktēriju un samazina raugu KVV skaitu ieraugā. Ar tīrkultūrām fermentētos ieraugos ilgā fermentācijas laikā pienskābes baktēriju metabolisma radītais zemais pH kavē raugu vairošanos un tāpēc maizes gatavošanai to pievieno papildus.

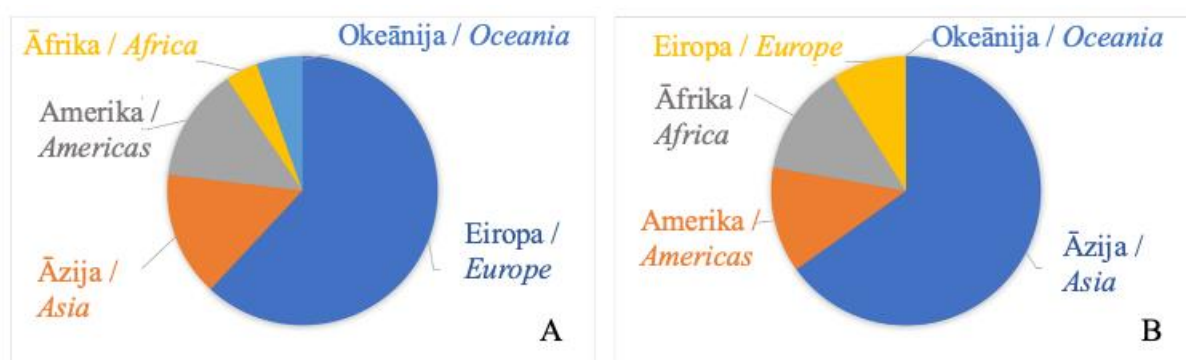
Miltu un ūdens proporcija ir nozīmīgs ierauga fermentāciju ietekmējošs faktors un nosaka ierauga reoloģiskās īpašības. Mazāks pievienotā ūdens daudzums biežajos ieraugos nodrošina mikrobiotu ar pietiekamu ogļhidrātu saturu fermentācijai. Biežajos ieraugos pH pazemināšanās ir lēnāka nekā šķidrājos, kurus raksturo lielāks ūdens daudzums. Arī skābju sastāvs ir atšķirīgs. Biežajos ieraugos biežāk dominē heterofermentatīvās pienskābes baktērijas, kuru metabolisma galaprodukts līdzās pienskābei ir etiķskābe. Augsts pievienotā ūdens daudzums veicina pienskābes baktēriju vairošanos (Minervini et al., 2014). Miltu un ūdens proporcija ietekmē arī pienskābes baktēriju daudzveidību ieraugā (Di Cagno et al., 2014). Zems pH veicina skābai videi piemērotu baktēriju augšanu, bet augstam pH ir piemērojušās *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc* un *Pediococcus*, *Weissella* ģints pienskābes baktērijas.

Ierauga fermentāciju ietekmē arī citi faktori kā miltu ķīmiskais sastāvs, miltu daļiņu izmērs un miltu dabiskā mikrobiota (1.3. att.). Pilngraudu miltu ierauga fermentācijas pirmajos posmos novērojama lielāka mikroorganismu daudzveidība (Rizzello et al., 2019). Skābekļa klātbūtne ierauga fermentācijas laikā ietekmē mikroorganismu metabolisma norisi. Skābeklis nokļūst ieraugā ar miltiem atjaunošanas un mīcīšanas procesā. Atjaunotajā ieraugā un mīklā pieejamais skābeklis tiek patērēts enzimatiskās un mikrobiālās aktivitātēs. Liela virsmas laukuma gadījumā fermentācijā var veidoties ierauga virsmas mikrobiota, kurai pieejami aerobi apstākļi. Dažas raugu sugas, piemēram, *Pichia kudravzevii* (tagad *Issatchenkia orientalis*), ir piemērotas augšanai tikai aerobos apstākļos. Skābekļa izmantošana var izraisīt pāreju no etanola uz etiķskābes izdalīšanu. Mīcīšanas laikā sākotnēji raugs izmanto pieejamo skābekli, pēc tam producē metabolītus anaerobos apstākļos. Pieejamo skābekli var izmantot arī miltos esošie enzīmi, piemēram, lipoksidāze (Minervini et al., 2014). Neliela aerācija var sekmēt dažu pienskābes baktēriju celmu, piemēram *Lactobacillus amylovorus* DCE 471 attīstību (Leroy et al., 2007). Skābeklis ietekmē mikroorganismu vairošanos un metabolismu atkarībā no konkrētā celma īpašībām.

Fermentāciju ietekmējošo parametru vienlaicīga mijiedarbība būtiski ietekmē ierauga raksturojošos rādītājus un mikrobiotas attīstību. Palielinoties atjaunošanas posmu skaitam, apstākļi, kurus veido ietekmējošie faktori, kļūst arvien piemērotāki, kā rezultātā mikroorganismu daudzveidība samazinās. Mainoties ietekmējošiem faktoriem, var notikt mikrobiotas izmaiņas. Tāpēc nozīmīgi zināt izejvielas ķīmisko sastāvu. Kviešu un rudzu milti ierauga fermentācijā tiek izmantoti tradicionāli, tomēr tiek pētīta alternatīvu izejvielu, kā piemēram, miežu un kailgraudu miežu miltu izmantošana (Çakır et al., 2020; Rizzello et al., 2014).

1.3. Kailgraudu mieži – alternatīva izejviela ierauga fermentācijā / *Hull-less barley flour – alternative material for sourdough fermentation*

Mieži (*Hordeum vulgare* L.) ir plaši izplatīti pasaulē (1.4. att.), pateicoties to daudzveidībai, spējai pielāgoties klimatiskajiem apstākļiem (Newman & Newman, 2006).



1.4. att. Miežu (A) un kailgraudu miežu (B) izplatība pasaulē pēc izcelsmes /
Fig. 1.4. Total barley (A) and hull-less barley (B) production share by world region
(Meints et al., 2021)

Mieži ir ceturrtā visplašāk audzētā graudaugu kultūra pasaulē, un kā lielākie miežu audzētāja pasaulē (1.4.A att.) tiek minēta Eiropa – 61.9%, tad Āzija – 15% un Amerika – 13.7% (Meints et al., 2021). Kailgraudu miežu izplatība Eiropā ir salīdzinoši neliela. Kailgraudu miežu izplatība pasaules reģionos (1.4.B att.) atšķiras no miežu kopējās izplatības (2021), veidojot 64.9% Āzijas, 13.2% Āfrikas, 12.7% Amerikas un 8.9% Eiropas reģionā (Meints et al., 2021). Āzijas reģionā kā lielākie kailgraudu miežu audzētāji tiek minēti Ķīna, Japāna, Nepāla un Indija. Atšķirības starp reģioniem saistāmas ar to pielietojumu. Kailgraudu mieži Āzijas un

Āfrikas reģionā pārtikai tiek izmantoti biežāk nekā Eiropas reģionā, kur mieži, galvenokārt, tiek izmantoti dzīvnieku barībai un alus ražošanā (Badea & Wijekoon, 2021).

Mieži tiek izcelti kā augstvērtīga pārtikas izejviela ar unikālu un sabalansētu uzturvielu sastāvu (Baik & Ullrich, 2008; Šterna et al., 2015). Miežu ķīmiskais sastāvs literatūras avotos minēts plašā diapazonā: olbaltumvielu saturs variē 8 – 15%, taču pētījumi liecina arī par augstu olbaltumvielu saturu līdz pat 25%. Miežu galvenā sastāvdaļa ir ciete 47 – 68% ar atšķirīgu amilozes un amilopektīna sastāvu, mono un disaharīdi <1% (glikoze, fruktoze, maltoze, saharoze), tauki 2 – 3%, minerālvielas (1.5 – 2.5%). Miežus raksturo augsts šķiedrvielu saturs (11 – 34%). Īpaši jāmin β-glikāni (4 – 9%) un arabinoksilāni, kas netiek sagremoti un absorbēti cilvēku tievajās zarnās. Arabinoksilānu saturs tiek minēts 3.1 – 11.4% līdzīgi kā kviešos, bet zemāks nekā rudzos un augstāks nekā auzās (Torbica et al., 2022). Miežu ķīmiskais sastāvs nosaka to pielietojumu (iesala un alus ražošana, dzīvnieku barība, pārtika) (Badea & Wijekoon, 2021). Mieži ir ģenētiski daudzveidīgs graudaugs (Bleidere et al., 2020). Izšķir plēkšņainos un kailgraudu miežus. Kailgraudu miežu šķirnes ir piemērotas kā izejviela pārtikas produktu ražošanā, piemēram, veseli graudi (grūbas), putraimi, pārslas un milti. Kailgraudu miežus izmanto maizes, cepumu, makaronu, tortilju, putru, brokastu pārslu, kā arī specifisku fermentētu (*tempeh*, *miso*, *shoyu*, angļu val.) produktu ražošanā.

1.1. tabula / Table 1.1

**Kailgraudu miežu miltu ķīmiskais sastāvs /
Chemical composition of hull-less barley flour**

Rādītājs / Parameter	Saturs / Content	Avots / Source
Olbaltumvielas / Protein	14.42 – 18.19 g 100 g ⁻¹ 12.5 – 14.6% 15% 11 – 14% sausnā / dw	(Majore et al., 2021) (Dabina, 2013) (Lukinac & Jukić, 2022) (Li et al., 2001)
Ciete / Starch	49.15 – 64.06 g 100 g ⁻¹ 62.60 – 63.90% 56.58 – 64.73% sausnā / dw	(Majore et al., 2021) (Dabina, 2013) (Li et al., 2001)
Šķiedrvielas / Dietary fibre	19.2 – 20.8 g 100 g ⁻¹	(Šterna et al., 2015)
Tauki / Fat	2.01 – 2.35 g 100 g ⁻¹ 4.69 – 6.81% sausnā / dw	(Šterna et al., 2015) (Li et al., 2001)

Latvijā kailgraudu mieži (*Hordeum vulgare* ssp. *nudum* L.) ir netradicionāls graudaugs, kam raksturīgs augstāks vērtīgo uzturvielu sastāvs, salīdzinot ar plēkšņainajiem miežiem (Beinaroviča et al., 2012). Kailgraudu miežu pārstrādi atvieglo šo miežu uzbūve – ziedplēksne nav saaugusi ar grauda apvalkiem un tiek atdalīta kulšanas laikā līdzīgi kā rudzu un kviešu graudiem. Kailgraudu miežu selekcija tiek veikta daudzviet pasaulē. Latvijā AREI ir selekcionētas augstvērtīgas kailgraudu miežu šķirnes 'Irbe' un 'Kornelija'^{4,5}. Pētījumi par dažādu valstu (Latvija, Norvēģija, Polija, Kanāda) kailgraudu miežu šķirņu ķīmisko sastāvu veikti arī Latvijā, AREI. Kailgraudu miežu ķīmiskais sastāvs var atšķirties plašā diapazonā (1.1. tabula).

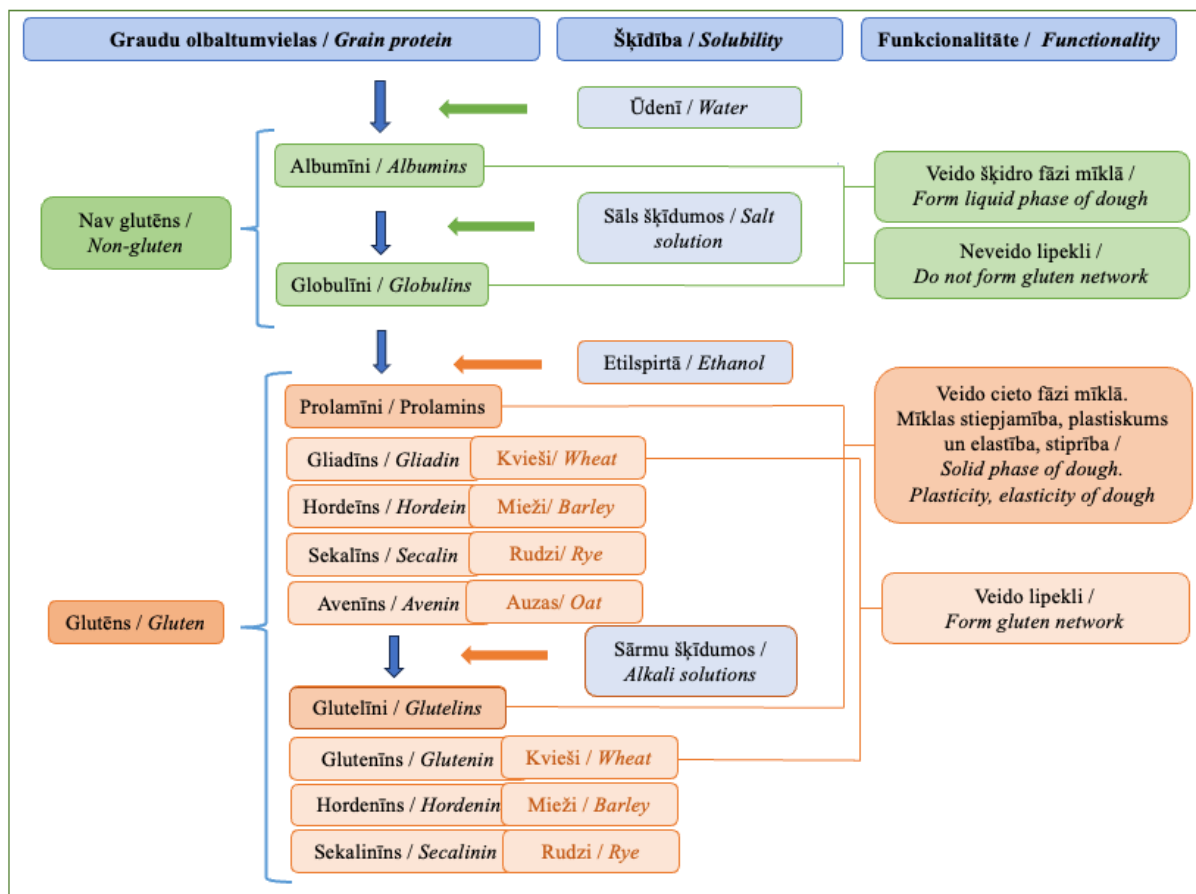
Kailgraudu miežu olbaltumvielu raksturojums

Kailgraudu miežu šķirnēm raksturīgs augsts olbaltumvielu saturs (1.2. tabula) (Auziņš et al., 2021; Bleidere et al., 2020; Šterna et al., 2015; Sturite et al., 2019). Pētniece I. Dabiņa Latvijā audzētām (2009. – 2011. gadam) kailgraudu miežu šķirnēm noteikusi 12.5 – 14.6%

⁴Par šķirni 'Kornelija' [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://kornelija.lv/>

⁵Kailgraudu miežu šķirne 'Kornelija' - augstvērtīga pilngraudu izejvielas nišas un funkcionālo produktu izstrādei [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://www.arei.lv/lv/projekti/2018/kailgraudu-miezu-skirne-kornelija-augstvertiga-pilngraudu-izejviela-nisas-un>

olbaltumvielu (Dabina, 2013). Latvijā selekcionētu kailgraudu miežu olbaltumvielas satur neaizstājamās aminoskābes – augstu leicīna, izoleicīna, valīna un histidīna saturu, un neaizstājamo aminoskābju summa variē 33 – 39 g kg⁻¹. Kailgraudu miežu olbaltumvielām raksturīgs zems lizīna saturs. Lizīna saturs konstatēts zem rekomendējamās devas 3.13 – 4.06 g kg⁻¹. Novērota olbaltumvielu saturs un lizīna vāja pozitīva korelācija $r=0.34$ ($p<0.05$) (Šterna et al., 2015).



1.5. att. Graudu olbaltumvielu šķīdība (pēc Osborna) un funkcionalitāte / Fig. 1.5. Grain protein solubility (according to Osborn) and functionality

Graudu olbaltumvielām var būt atšķirīga bioloģiskā vērtība – sagremojamība un individuāla ietekme uz imūnsistēmu (Loveday, 2019; Poutanen et al., 2022). Viens no graudu olbaltumvielu raksturošanas veidiem ir pēc to šķīdības (pēc Osborna) – albumīni, globulīni, prolamīni un glutelīni (1.5. att.) (Loveday, 2019). Albumīni šķīst ūdenī un tiem ir neliela molekulmasa, viegli sagremojami. Globulīni šķīst sāls šķīdumos. Prolamīni šķīst etilspirtā, bet glutelīni sārnu šķīdumos (Schalk et al., 2017). Prolamīni un glutelīni tiek saukti arī par graudu rezerves olbaltumvielu (*storage protein*, angļu val.). Prolamīnu frakcija miežos tiek saukta par hordeīnu. Atkarībā no graudauga veida olbaltumvielu frakciju proporcijas atšķiras. Olbaltumvielu prolamīna un glutelīna frakcija (1.2. tabula) gan miežos, gan kviešos ir līdzīga un veido attiecīgi 35 – 45% un 40% (Day, 2013; Loveday, 2019). Xhaferaj et al. (2023) pētījumā 35 miežu šķirņu vidējā paraugā albumīna un globulīna frakcija kopā veidoja 25% no olbaltumvielām. Ūdenī un sāls šķīdumos nešķīstošās olbaltumvielas (prolamīna un glutelīna maisījums) sauc par glutēnu. Glutēns var izraisīt alerģisku reakciju ģenētiski predisponētiem cilvēkiem. Arī hordeīns un hordenīns pieder pie glutēna olbaltumvielām. Taču augstākā reakcija novērota pret gliadīna un glutelīna olbaltumvielām. Prolamīnu alerģiskums ir atkarīgs no aminoskābju sekvences un molekulārām īpašībām un tās veido augsts aminoskābju glutamīna

(26 – 53%) un prolīna (10 – 29%) saturs (Scherf et al., 2018). Augsta antivielu reakcija novērota pret α -gliadīna 33 vienību peptīdiem (Haraszi et al., 2011). Tos raksturo kā peptidāzes rezistentus (Zamakhchari et al., 2011). Šie peptīdi satur atkārtotas aminoskābju sekvences, kas veido glutēnu.

1.2. tabula / Table 1.2

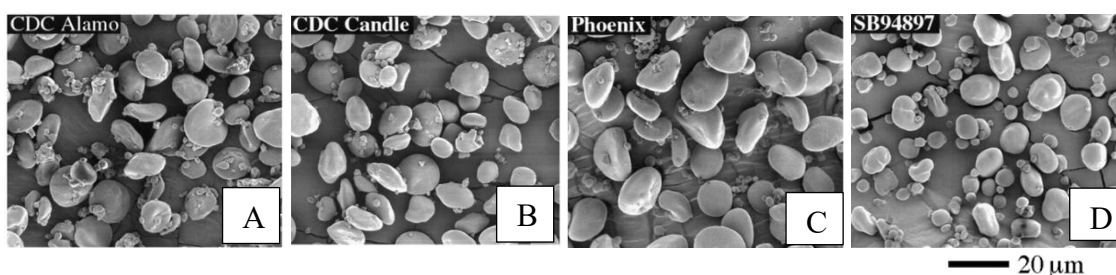
**Olbaltumvielu frakcijas (%) miežos, kviešos un rudzos /
Fractions (%) of barley, wheat and rye proteins**

Graudaugi / Cereal	Albumīni / Albumins, %	Globulīni / Globulins, %	Prolamīni / Prolamins, %	Glutelīni / Glutelins, %	Avots / Source
Mieži / Barley	3 – 5 10 – 15	10 – 20	35 – 45	35 – 45	(Loveday, 2019) (Torbica et al., 2021)
Kvieši / Wheat	6 – 10	5 – 8	35 – 40	40	(Loveday, 2019)
Rudzi / Rye	30 – 35	10 – 15	30 – 35	20 – 25	(Torbica et al., 2021)

Glutēna izraisīta autoimūnā saslimšana tiek saukta par celiakiju, kas sastopama aptuveni 1% pasaules iedzīvotāju (Serena et al., 2020). Sastopama arī ne-celiakijas glutēna sensitivitāte (nepanesība), ko raksturo dažādi gremošanas trakta traucējumi un kas rodas pēc glutēna saturošu produktu lietošanas, kā arī kviešu alerģija ar pārmērīgu jutību pret kviešu proteīniem. Ne-celiakijas un kviešu alerģijas gadījumā miežu un rudzu glutēns var tikt lietots, atkarībā no individuālas reakcijas un lietotā daudzuma. Produkti, kuru glutēna saturs ir mazāks par 20 mg kg⁻¹, tiek saukti par bezglutēna, 20 – 100 mg kg⁻¹ – ar samazinātu glutēna saturu (EU, 2009). Olbaltumvielu frakcijām ir arī tehnoloģiskā nozīme (1.5. att.). Kviešu gliadīns un glutenīns nosaka mīklas plastiskumu, stiepjamību un elastību un, piesaistot ūdeni, veido lipekli. Taču miežos esošais hordeīns neveido lipekli. Hordeīna augstais saturs negatīvi ietekmē iesala ražošanu, jo ierobežo ogļhidrātu pieejamību (Otero et al., 2021).

Cietes raksturojums

Kailgraudu miežu cietes saturs var būt diapazonā 55 – 65% sausnas (1.1. tabula). Cietes graudi novēroti mazi sfēriski ($\leq 6 \mu\text{m}$) un lieli lēcveida (12 – 19 μm). Mazie un lielie graudi cietē var būt dažādās proporcijās – no 1.08 līdz 0.08 (Li et al., 2001) (1.6. att.).



1.6. att. Kailgraudu miežu cietes graudu attēls, A – 0% amilozes ciete, B – zema (1 – 5%) amilozes satura ciete, C – vidēja (20 – 30%) amilozes satura ciete, D – augsta amilozes satura ciete (Palielinājums $\times 450$) / Fig. 1.6. Starch granules of hull-less barley, A – 0% amylose starch, B – low (1 – 5%) amylose starch, C – normal amylose (20 – 30%) starch, D – high amylose starch (Magnification $\times 450$) (Li et al., 2001)

Miežu ciete tiek raksturota kā lēni sagramojama (Punia, 2020). Ciete sastāv no polimēriem – amilozes un amilopektīna, kas lielākai daļai miežu šķirņu ir proporcijā 1:3 un to nosaka šķirnes ģenētiskie faktori (Mežaka, 2018). Pētniece M. Bleidere atzinusi, ka kailgraudu miežu genotipi raksturojas ar lielāku cietes satura un tajā esošās amilozes satura mainību graudos (Bleidere, 2010). Cieti atkarībā no amilozes satura iedala: 0% amilozes un 1 – 5%

amilozes, kura veido vaskveida endospermu (*waxy*, angļu val.), 20 – 30% amilozes (saukta par normālu cieti) un augsta amilozes satura (izturīgā) ciete 30 – 45% (*high amylose*, angļu val.) (Li et al., 2001). Li et al.(2001) pētījumā konstatēta mazo cietes graudu pozitīva korelācija ar amilozes saturu, bet graudu diametra negatīva korelācija ar amilozes saturu. Augstākam amilozes saturam ir lielāks potenciāls veidot rezistentu cieti, kas padara to nepieejamāku mikroorganismiem (Torbica et al., 2022). Hidrolīze veicina cietes pieejamību mikroorganismiem. Cietes graudi atrodas olbaltumvielu struktūrā, kas apgrūtina cietes sašķelšanu. Fermentācijas procesā olbaltumvielu un cietes ciešā struktūra samazina cietes pieejamību mikroorganismiem un apgrūtina hidrolīzi.

Šķiedrvielu raksturojums, ne cietes polisaharīdu sastāvs

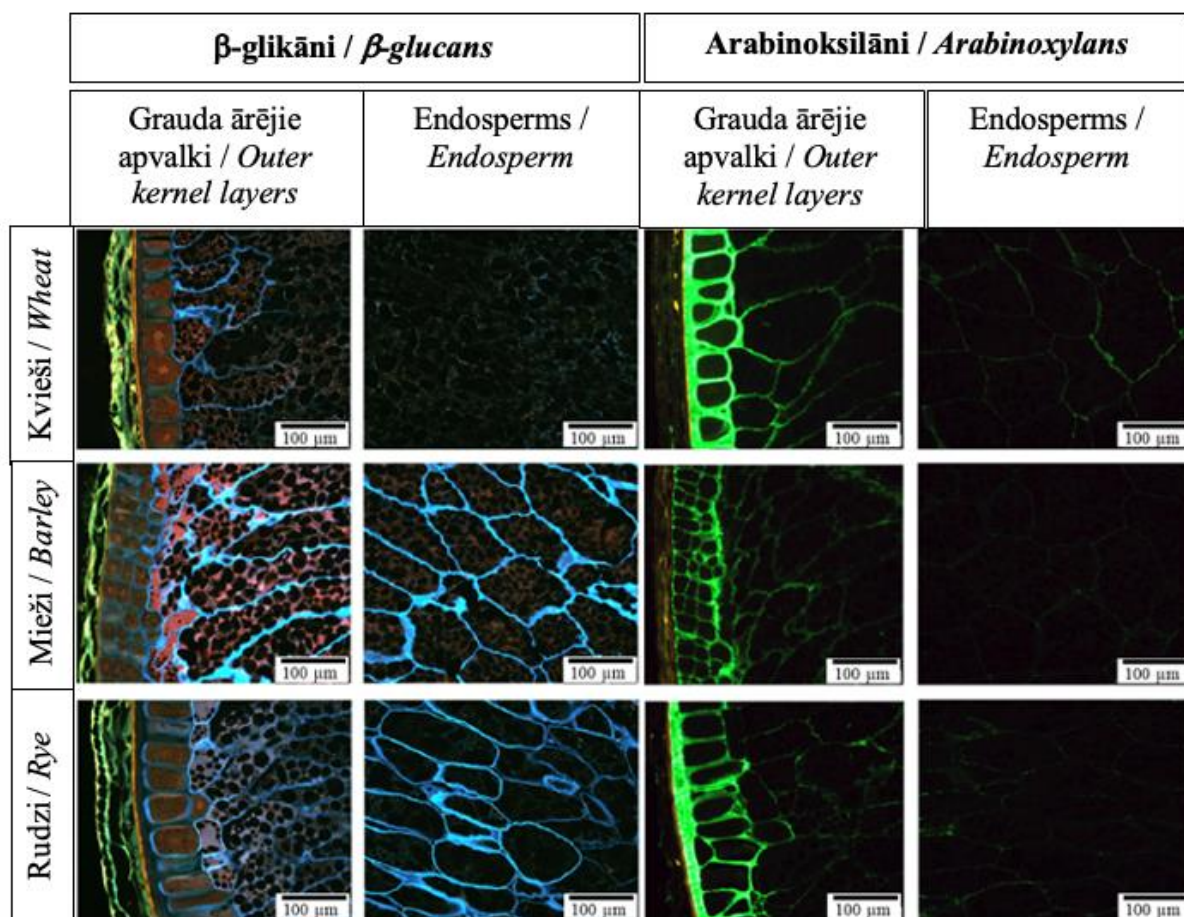
Kailgraudu miežu uzturvērtība tiek saistīta ar augstu šķiedrvielu saturu (1.3. tabula). Kailgraudu mieži vērtējami kā ne-cietes polisaharīdu avots. Ne-cietes polisaharīdi klasificējami kā šķīstošās šķiedrvielas, taču to sastāvā var būt arī nešķīstošās komponentes. Ne-cietes polisaharīdi sastopami kliju un endosperma, kā arī aleirona slāņa šūnu sienīnās (Ispiry et al., 2021; Verhertbruggen et al., 2019a; Wang et al., 2021a).

1.3. tabula / Table 1.3

Kailgraudu miežu miltu šķiedrvielu sastāvs / *Dietary fibre composition of hull-less barley flour*

Rādītājs / <i>Parameter</i>	Saturs / <i>Content</i>	Avots / <i>Source</i>
Rezistentā ciete / <i>Resistant starch, g 100 g⁻¹</i>	0.39 – 10.65	(Majore et al., 2021)
Šķiedrvielas / <i>Dietary fibre, g 100 g⁻¹</i>	17.4 – 26.3	(Auziņš et al., 2021)
Šķīstošās šķiedrvielas / <i>Soluble dietary fibre, g 100 g⁻¹</i>	18.1 – 32.0	(Majore et al., 2021)
Nešķīstošās šķiedrvielas / <i>Insoluble dietary fibre, g 100 g⁻¹</i>	0.7 – 4.2	(Majore et al., 2021)
β-glikāni / <i>β-glucans, g 100 g⁻¹</i>	3.65 – 7.67	(Auziņš et al., 2021; H. Li et al., 2001; Majore et al., 2021)
Arabinoksilāni,% sausas / <i>Arabinoxylans, % dw</i>	4.0 – 4.4 3.5 – 4.0	(Djurle et al., 2016; Mir et al., 2019)
Fruktāni, % sausas / <i>Fructans, % dw</i>	1.7 – 2.4 0.9 – 4.2	(Djurle et al., 2016) (Ispiry et al., 2020; Nemeth et al., 2014)

Kailgraudu miežu šķirnes izceļas ar augstu β-glikānu saturu 5 – 7%. β-glikāni veidojas no D-glikozes monomēra, kas saistīti ar β-1,3 un β-1,4 glikozīdu saitēm. Arabinoksilānu saturs kailgraudu miežu šķirnēs konstatēts 3.5 – 4.0% (Mir et al., 2019). β-glikāni un arabinoksilāni atrodami grauda aleirona slāņa un endosperma šūnu sienīnās, proti visā graudā (1.7. att.). Tādēļ neliela grauda apstrāde ļauj saglabāt nozīmīgu šķiedrvielu saturu. Pretēji kviešu grauda šūnu sienīnās ir maz β-glikānu un tie sastopami, galvenokārt, klijās (Wang et al., 2021b). Kviešu grauda endosperma šūnu sienīņu galvenā komponente ir arabinoksilāni, taču to saturs nav augsts 0.5 – 1.0% (Comino et al., 2013). β-glikāni kailgraudu miežu endosperma šūnu sienīnās var būt saistīti ar olbaltumvielām, veidojot lielmolekulārus savienojumus 10⁷ Da (g mol⁻¹). β-glikāni un arabinoksilāni veido viskozu šķīdumu, kas var kalpot kā barjera enzīmiem cietes un olbaltumvielu sašķelšanai (Baik & Ullrich, 2008). Mīklās, kuru struktūru veido lipekļis, šķiedrvielas traucē mīklas struktūras veidošanos, kā rezultātā maizei ir samazināts tilpums, tā ir blīvāka, ķepīgāka (Zhou et al., 2021). Taču mīklās, kurās neveidojas lipekļis, piemēram, rudzu mīklās arabinoksilāniem ir būtiska loma struktūras veidošanā, pateicoties ūdens uzsūkšanas un viskozu šķīdumu veidošanas īpašībām.



1.7. att. β -glikānu (zils krāsojums) un arabinoksilānu (zaļš krāsojums) izvietojums miežu un kviešu grauda ārējos apvalkos un endospermā / Fig. 1.7. Microscopy of outer kernel layers and endosperm in barley and wheat grain – β -glucans (in blue) and arabinoxylans (in green) (Dornez et al., 2011; Maina et al., 2021)

Augu fruktāni (inulīns) ir lineāri vai sazaroti polimēri, kas sastāv no fruktozes monomēriem, kas savienoti ar β -2,1 un β -2,6 fruktozīdiskām saitēm. Šie polisaharīdi tiek klasificēti kā šķiedrvielas, kas atrodamas graudu šūnu sieniņās (Verspreet et al., 2015). Fruktāniem var būt arī mikrobiāla izcelsme. Augu fruktānu saturs dažādos graudos svārstās no 3.6 – 6.6%, kviešos 0.7 – 2.9% un miežos 0.9 – 4.2% (Ispiryan et al., 2020; Nemeth et al., 2014). Fruktānu saturs miežos ir otrs zemākais pēc auzām. Pēdējo gadu desmitos zinātnieki ir pievērsuši uzmanību fruktānu pētīšanai graudos to dažādo īpašību dēļ. Augu fruktāniem ir divējāda ietekme uz cilvēka veselību (Ispiryan et al., 2022; Muir et al., 2019; Varney et al., 2017). Cilvēkiem ar funkcionāliem zarnu trakta traucējumiem, piemēram, kairinātas zarnas sindromu fermentējamie oligo-, disaharīdi un polioli (*FODMAPs*, saīsinājums angļu val.) var izraisīt vēdera sāpes vai diskomforta sajūtu. Savukārt, veselībai labvēlīgā ietekme ir saistīta ar prebiotisko efektu un fruktānu bakteriālo pārveidi līdz īsas ķēdes taukskābēm (Loponen & Gänzle, 2018). Mikrobiālajiem fruktāniem, pienskābes baktēriju izdalītajiem eksopolisaharīdiem, piemīt viskozu vielu veidojošas īpašības, kas varētu ietekmēt maizes fizikālās īpašības. Mannāni ir klasificējami kā šķiedrviela. Par to saturu kailgraudu miežos ir ierobežota informācija. Mannāni ir nozīmīga daļa (4 – 7%) no šūnu sieniņu polisaharīdiem (Verhertbruggen et al., 2019b). Tie ir ūdenī šķīstošās šķiedrvielas ar augstu viskozitāti un neizteiktām garšas īpašībām un tiek izmantoti pārtikas rūpniecībā kā stabilizētājs, struktūras uzlabotājs, ūdens absorbētājs (Singh et al., 2018).

Ne-cietes polisaharīdi, tiek saukti par bioaktīviem savienojumiem, jo tiem piemīt prebiotiskas īpašības, kas uzlabo cilvēka veselību (Belitz et al., 2009; Torbica et al., 2022;

Verma et al., 2021). Ne-cietes polisaharīdu viskozitātes īpašības ietekmē ierauga un mīklas reoloģiskās īpašības.

Cukuru sastāvs

Kopējais cukuru saturs kailgraudu miežos tiek minēts <1%. Tā sastāvu veido glikoze, fruktoze, maltoze un saharoze (1.4. tabula). Cukuri fermentācijas sākumā nodrošina pienskābes baktērijas un raugus ar barības vielām līdz notiek cietes sašķelšana miltu enzīmu amilolīzes rezultātā.

1.4. tabula / Table 1.4

Kailgraudu miežu miltu cukuru sastāvs / The composition of sugars of hull-less barley flour

Rādītājs / Parameter	Saturs / Content	Avots / Source
Kopējie cukuri / Total sugars, g 100 g ⁻¹	0.95 – 1.00	(Auziņš et al., 2021)
Glikoze / Glucose, g 100 g ⁻¹	0.30	(Dancīte et al., 2021)
Fruktoze / Fructose, g 100 g ⁻¹	<0.20	
Saharoze / Sucrose, g 100 g ⁻¹	0.74 – 0.95	
Maltoze / Maltose, g 100 g ⁻¹	<0.20	

Minerālvielas, vitamīni un fenolu savienojumi

Minerālvielas visvairāk atrodamas miežu grauda aleirona slānī, grauda apvalkos un dīglī. Kailgraudu miežos atrodamai K, Mg, Ca, Na (1.5. tabula).

1.5. tabula / Table 1.5

Kailgraudu miežu miltu, minerālvielu un fenolu savienojumu sastāvs/ Content of mineral and phenolic compounds in hull-less barley flour

Rādītājs / Parameter	Saturs / Content	Avots / Source
Antioksidantu aktivitāte / Antioxidant activity, mmol TE ¹ 100 g ⁻¹	493.15 ± 5.21	(Šterna et al., 2022)
Kopējie fenoli, Total phenols, GAE ² mg 100 g ⁻¹	273.14 ± 7.93	(Šterna et al., 2015)
Kopējie flavonoīdi / Total flavonoids, QE ³ mg 100 g ⁻¹	290.25 ± 7.17	
Kopējie tanīni / Total tannins, mg TA ⁴ 100 g ⁻¹	1.25 ± 0.03	
K, mg kg ⁻¹	3723 – 4128	
Mg, mg kg ⁻¹	1123 – 1210	(Auziņš et al., 2021)
Ca, mg kg ⁻¹	309 – 353	
Na, mg kg ⁻¹	18.1 – 20.9	
Vitamīns E / Vitamin E, mg 100 g ⁻¹	0.6 – 0.8	
Vitamīns B ₁ / Vitamin B ₁ , mg 100 g ⁻¹	0.34	(Petrovska-Avramenko et al., 2017)
Vitamīns B ₂ / Vitamin B ₂ , mg 100 g ⁻¹	0.23	
Vitamīns B ₃ (niacīns) / Vitamin B ₃ (niacin), mg 100 g ⁻¹	3.95	

¹trolaksa ekvivalents / trolox equivalent; ²galluskābes ekvivalents / gallic acid equivalent; ³kvercetinā ekvivalents / quercetin equivalent; ⁴tanīnskābes ekvivalents / tannin acid equivalent.

Viena no svarīgākajām minerālvielām lopbarībā un pārtikā ir fosfors. Taču tas, galvenokārt, ir fitīnskābes formā un tādēļ nav izmantojams. Ierauga fermentācija veicina fitāzes aktivitāti, kas uzlabo minerālvielu biopieejamību (Kumar et al., 2010).

Mieži ir B₁, B₂, B₃ un E vitamīnu avots, no kuriem augstākais saturs ir B₃ vitamīnam un to saturs variē atkarībā no šķirnes (Badea & Wijekoon, 2021). Kailgraudu miežu graudu sastāvā ir fenoli, fitosteroli, flavonoli (proantocianidīni), kā arī antocianīni, kas koncentrējas, galvenokārt, grauda ārējos apvalkos un ietekmē grauda krāsu. Miežiem raksturīgs augstāks fenolu savienojumu saturs (0.2 – 0.4%) nekā citiem graudaugiem (Baik & Ullrich, 2008).

Kailgraudu mieži ķīmiskā sastāva un grauda apstrādes dēļ vairāk piemēroti pārtikas ražošanā. Miežu bioloģiskā un ķīmiskā sastāva daudzveidība neļauj vispārināt miežus. Analizējot uzturvielu sastāvu ar galveno komponentu statistisko analīzi (PCA, angļu val.), Torbica et al. (2021a) konstatējuši, ka miežu uzturvielu sastāvam raksturīga līdzība ar rudzu uzturvielu sastāvu. Miežu milti vērtējami kā piemērota izejviela maizes gatavošanā, kā arī ierauga gatavošanā.

Miežu miltus maizes gatavošanā izmanto, galvenokārt, kviešu maizes bagātināšanai ar šķiedrvielām, taču miežu, arī kailgraudu miežu milti tiek pētīti kā alternatīva izejviela ierauga fermentācijai (Çakır et al., 2020; Harth et al., 2016; Mariotti et al., 2014; Perri et al., 2021). Kailgraudu miežu piemērotību funkcionālu produktu izstrādei atzīmējuši pētnieki Latvijā un citās valstīs (Auziņš et al., 2021; Dancite et al., 2021; Martínez-Subirā et al., 2020; Meints et al., 2021; Nakov et al., 2022; Šterna et al., 2015, 2022). Ogļhidrāti kalpo kā barības vide mikroorganismiem. Ogļhidrātu, vitamīnu, minerālvielu, šķiedrvielu pieejamība pozitīvi ietekmē ierauga mikrobiotu (De Angelis et al., 2019). Savukārt, graudu mikrobiota ir nozīmīgs mikroorganismu avots ierauga fermentācijā. Kailgraudu miežu mikrobiotas pētījumi un tās sukcesija ierauga fermentācijā dotu plašāku informāciju par specifiku fermentācijā un izejvielas ietekmi uz mikroorganismu vairošanos.

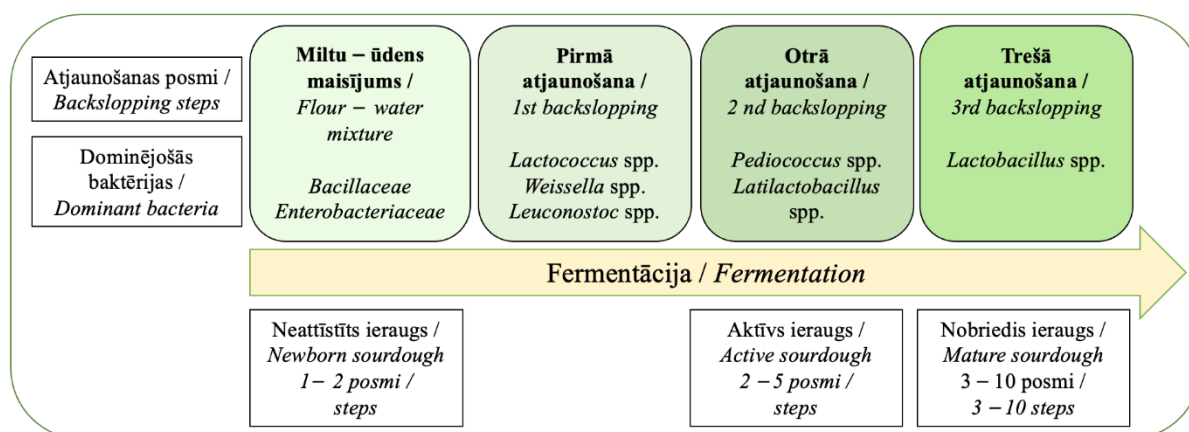
1.4. Ierauga mikrobiotas sukcesija un daudzveidība spontānā fermentācijā / *Succession and diversity of sourdough microbiota in spontaneous fermentation*

Ierauga fermentācija var tikt sākota spontāni, izmantojot graudu raksturīgo mikrobiotu, no kuras regulāras atjaunošanas gaitā vairojas pienskābes baktērijas un raugi, kuriem ir nozīme maizes sensoro un funkcionālo īpašību nodrošināšanā. Graudu raksturīgo mikrobiotu veido mikroskopiskās sēnes (micēlijsēnes un raugveida sēnes), kā arī *Bacillaceae* un *Enterococcaceae*, *Lactobacillus* baktērijas, kas, galvenokārt, koncentrējas grauda apvalkos (Corsetti et al., 2007; Minervini et al., 2015). Graudu raksturīgā mikrobiota atkarīga no klimatiskiem un agroķīmiskajiem apstākļiem, kā arī no insektu un mikroskopisko sēņu invāzijas (De Angelis et al., 2019).

Ierauga mikrobiotas sukcesija spontānā fermentācijā

Spontānā ierauga fermentācijas procesā notiek dinamiska baktēriju kopienas attīstība (Oshiro et al., 2020, 2021). Spontānā ierauga fermentācijas sākumā dominē graudu raksturīgā mikrobiota. Graudu mikrobiotas baktērijas ietver Gram-negatīvās aerobās (*Pseudomonas*) un fakultatīvi anaerobās (*Enterobacteriaceae*), kā arī Gram-pozitīvās pienskābes baktērijas (De Vuyst & Neysens, 2005). Pienskābes baktērijas (PB) neveido sporas. PB forma var būt gan lodveida (koki), gan nūjiņveida. Miltu un ūdens maisījums pēc 24 h fermentācijas ir uzskatāms par neatīstītu ieraugu, un tajā dominē nevēlamās *Bacillaceae* un *Enterobacteriaceae* dzimtas baktērijas (1.8. att.). Pirmajā un otrajā fermentācijas posmā nevēlamās baktērijas tiek nomāktas un vairojas *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Weissella* ģints pienskābes baktērijas. Nevēlamo mikroorganismu nomākšanu ietekmē šādi faktori: miltu enzīmu aktivitāte, raugu producētais etilspirts, pienskābes baktēriju aktivitāte. 3. – 5. posmā tiek novērota *Pediococcus* un *Lactobacillus* ģinšu attīstība. 5. – 7. posmā novērojama *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Levilactobacillus brevis* vairošanās. Lai gan ieraugā dominē *Lactobacillus* ģintis un no šīs ģintis 2020. gadā atdalīto radniecīgo baktēriju ģintis (Zheng et al., 2020), atrodamas arī blakus pastāvošās *Weissella*, *Pediococcus*, *Leuconostoc*, *Lactococcus*, *Enterococcus* un *Streptococcus* ģintis (Gobbetti & Gänzle, 2013). *Weissella*, *Pediococcus* un *Leuconostoc* spp. piemērojušās attīstībai augu izcelsmes izejvielās. Saglabājoties augstam pH, 1. – 2. posmam raksturīgās pienskābes baktērijas saglabājas 2. – 5. posmā (Bessmeltseva et al., 2014; Oshiro et al., 2021). Atklāta pienskābes baktēriju un raugu asociāciju veidošanās, kas raksturīga konkrēta reģiona ieraugā. Taču pētījumi liecina, ka pienskābes baktēriju sukcesija

ieraugā ir atkarīga no to īpašībām un pielāgošanās spējas noteiktiem ieraugu ietekmējošiem faktoriem (1.3. att.) un pieejamās barības vides, kā arī no citu mikroorganismu metabolisma.



1.8. att. **Baktēriju sukcesija spontānā ierauga fermentācijā** / Fig. 1.8. **Succession of bacteria in spontaneous sourdough fermentation** (Oshiro et al., 2021)

Sākotnējā miltu mikrobiota satur daudzveidīgu mikroskopisko sēņu sastāvu, kas mainās atkarībā no pieejamās barības vides un apstākļiem fermentācijas laikā. Raugi pieder pie mikroskopiskajām sēnēm un ir viensūnas organismi, kuru morfoloģiskā pazīme ir pumpurošanās. Raksturīgākais raugu pārstāvis ir *Saccharomyces cerevisiae*. Kopā ar pienskābes baktērijām raugiem ir noteicošā loma spontānā ierauga fermentācijā. Graudu mikrobiotā sastopamas arī raugveida mikroskopiskās sēnes, kuras atkarībā no apstākļiem gan pumpurojas, gan veido micēliju, kā piemēram *Wickerhamomyces*, *Debaryomyces*, *Candida*, kā arī micēlijsēnes, piemēram, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* (De Vuyst & Neysens, 2005). Micēlijsēnēm var būt augu izcelsme (augu sēklas, savvaļas augi, augu atliekas) vai arī tās attīstījušās uzglabāšanas laikā. *Aspergillus* un *Fusarium* raksturīga mikotoksīnu izdalīšana, kam ir negatīva (toksiska) ietekme cilvēka veselībai (EL Houssni et al., 2023). Attīstoties ierauga mikrobiotai spontānā fermentācijā, micēlijsēņu proporcija samazinās un palielinās raugu un raugveida sēņu klātbūtne. Fermentāciju ar pienskābes baktērijām var uzskatīt par efektīvu veidu, lai ierobežotu patogēnus, kas atrodami miltos. Bartkiene et al. (2020) pētījumi liecina, ka pienskābes baktērijām ir antifungālās īpašības, kas kavē micēlijsēņu vairošanos. ASV Pārtikas un zāļu pārvalde (FDA) pienskābes baktērijas atzinusi par drošām pārtikas produktu ražošanā (FDA, 2018). Vairāki pienskābes baktēriju celmi atbilst Eiropas Pārtikas nekaitīguma iestādes (EFSA) Kvalificētai drošības prezumpcijai (QPS).

Spontānā ierauga mikrobiotas daudzveidība

Jaunākie dati liecina, ka vērojams ierauga pētījumu skaita pieaugums no 33 (1990 – 1995) līdz 582 (2014 – 2019) (Arora et al., 2021). Arora et al. apskats atklāj augstu pienskābes baktēriju sugu (82 sugas) daudzveidību pētītajos (1990 – 2019) spontānos ieraugos. Visbiežāk sastopamās pienskābes baktēriju sugas spontānos ieraugos konstatētas *Fructilactobacillus sanfranciscensis* (47%), *Lactiplantibacillus plantarum* (43%) un *Levilactobacillus brevis*, *Pediococcus pentosaceus*, *Limosilactobacillus fermentum* (<20%) (Arora et al., 2021; De Vuyst et al., 2021). Kviešu ieraugos dominēja *Fructilactobacillus sanfranciscensis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, bet rudzu ieraugos *Lactiplantibacillus plantarum*, *Levilactobacillus brevis*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* un *Weissella* ģinšu baktērijas sastopamas 15 – 18% no pētītajiem ieraugiem. *Lactiplantibacillus plantarum* biežā sastopamība tiek saistīta ar šīs sugas pielāgošanos dažādu ogļhidrātu (glikoze, fruktoze, maltoze, saharoze) fermentācijai un apstākļiem, spēju strauji samazināt vides pH, kā arī spēju sintezēt bakteriocīnu (Minervini et al., 2010, 2014; Thuany et al., 2023). Pienskābes baktēriju sugu daudzveidība vienā spontānā

ieraugā konstatēta augstāka kā raugu daudzveidība, biežāk atrasta viena vai divas raugu sugas (Van Kerrebroeck et al., 2017). *Saccharomyces cerevisiae* sastopama 68% no 394 pētītajiem (1999–2017) ieraugiem, retāk (<20%) sastopami *Kazachstania humilis*, *Wickerhamomyces anomalus*, *Tolurasporea delbrueckii* (tagad *Debaryomyces delbrueckii*) un *Pichia* spp., *Candida* spp.

Baltijas reģionā veikti pētījumi par rudzu ierauga spontānās mikrobiotas attīstību. Rudzu ieraugos pētnieki kā dominējošās konstatējuši *Lactiplantibacillus plantarum*, *Levilactobacillus brevis*, *Latilactobacillus curvatus* (Bessmeltseva et al., 2014) un *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactiacaseibacillus casei*, *Latilactobacillus curvatus*, *Pediococcus pentosaceus*, *Pediococcus acidilactici* (Bartkiene et al., 2020). Bessmeltseva et al. (2014) spontānā rudzu ieraugā identificējuši sekojošus raugus: *Kazachstania humilis*, *Candida glabrata*, *Candida krusei* (tagad *Issatchenkia orientalis*), *Saccharomyces cerevisiae*. Ilgstošu atjaunošanu rezultātā mikroorganismu daudzveidība samazinās līdz dažām konkrētajos apstākļos dzīvotspējīgākām sugām, kuras veido nobriedušu ieraugu. Tāpēc informācija par mikroorganismu daudzveidību sākuma posmos būtu noderīga. Pētnieks E. Kozlinskis et al. (2010) identificējis *Lactiplantibacillus plantarum*, *Latilactobacillus curvatus* rudzu spontānā ierauga trīs-fāžu fermentācijā, kā arī *Lactobacillus delbrueckii* fermentācijas pēdējā fāzē.

Maizes gatavošanā, galvenokārt, tiek izmantoti kviešu un rudzu ieraugi, tomēr tiek pētīta miežu un kailgraudu miežu izmantošana (Cakir et al., 2021; Rizzello et al., 2014). Aktīvos miežu ieraugos sastopama raksturīgā ierauga mikrobiota. Kā rāda zinātnieku pētījumi spontānā miežu ierauga sastāvā konstatētas *Lactiplantibacillus plantarum*, *Weissella confusa* (Harth et al., 2016) un *Saccharomices cerevisiae*, *Candida humilis*, *Pichia anomala* (tagad *Wickerhamomyces anomalus*) raugi. Turcijas zinātnieku pētījumos par kailgraudu miežu spontānā ierauga mikrobiotas attīstību pēc fermentācijas 4 posmiem ik pēc 24 h 28 °C temperatūrā bija identificētas dažādas pienskābes baktēriju sugas: *Pediococcus* spp., *Latilactobacillus curvatus*, *Levilactobacillus brevis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Companilactobacillus musae*, *Companilactobacillus paralimentarius*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Limosilactobacillus equigenosi* (Çakir et al., 2020). Vrijē universitātes (Beļģija) pētnieki spontānā miežu ieraugā pēc 10 posmu fermentācijas 17 – 22 °C temperatūrā identificējuši *Leuconostoc mesenteroides*, *Weissella confusa*, *Weissella cibaria*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Pediococcus pentosaceus* (Harth et al., 2016).

Analītisko metožu attīstība un zinātniskā pieredze ieraugu pētīšanā veidojusi jaunu skatījumu ierauga raksturojumam, izceļot mikrobiotas analizēšanas nozīmību (Thuany et al., 2023). Tiek pētīts no spontāniem ieraugiem izdalītu pienskābes baktēriju celmu metabolisms un īpašības, kas būtu noderīga stabilu mikroorganismu konsorciju veidošanā. Šo informāciju varētu izmantot ierauga fermentācijas izpratnes paplašināšanai un vadīšanai. Spontānā ierauga mikrobioloģiskā stabilitāte nozīmīgi ietekmē maizes gatavošanas tehnoloģisko procesu un gatavā izstrādājuma kvalitāti. Ierauga stabilitāte atkarīga no mikroorganisma celma īpašībām, mikroorganismu mijiedarbošanās un tehnoloģiskiem parametriem. Lai nodrošinātu ierauga mikrobioloģisko stabilitāti ierauga fermentācijā, izmanto tīrkultūras. Pētnieks E. Kozlinskis et al. (2010) norādījis uz definētu pienskābes baktēriju un raugu asociāciju izmantošanas aktualitāti ierauga fermentācijā. Nesenie pētījumi liecina par jaunu mikroorganismu konsorciju veidošanu, kas balstīta uz vairāku pienskābes baktēriju un raugu sugu saskaņīgu ekosistēmu un veidota no dominējošām un blakus pastāvošām pienskābes baktērijām un raugiem (Calabrese et al., 2022). Vairāku dažādu sugu pienskābes baktēriju un vairāku rauga sugu kombinēšana jaunu ieraugu veidošanā, kuriem piemērojama arī atkārtota atjaunošana, ir aktuāls virziens ieraugu izpētē.

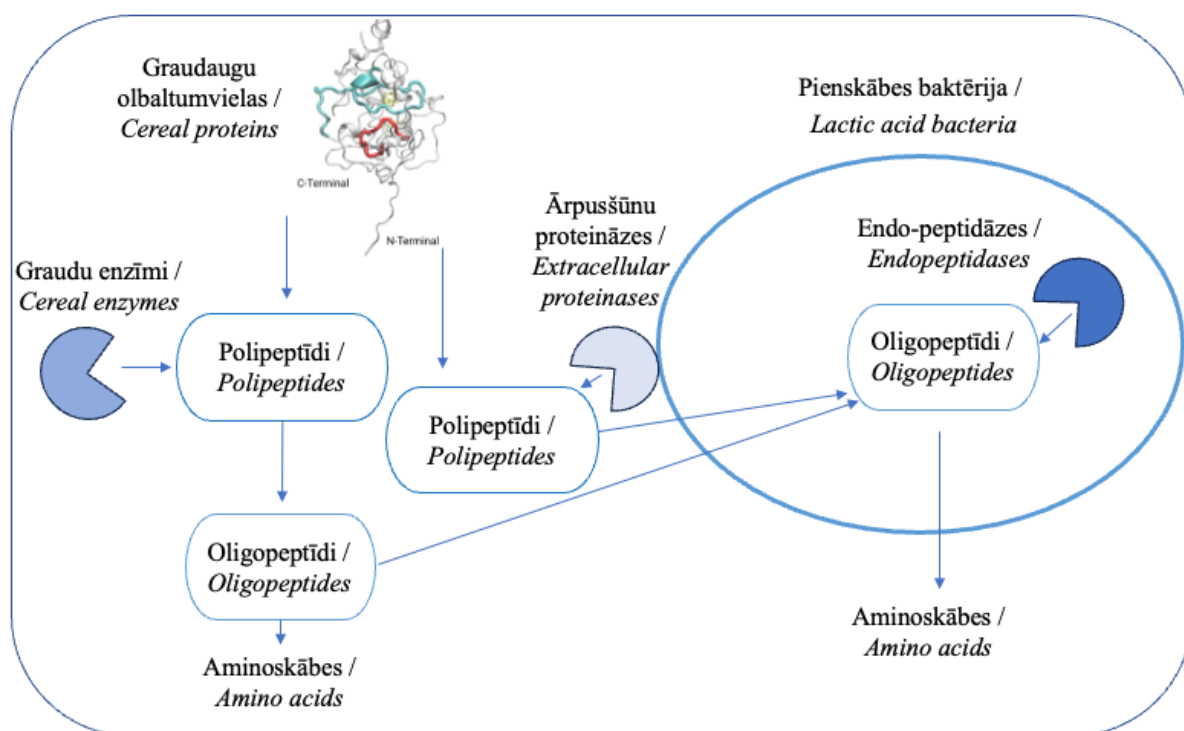
Pētījumi par spontānā ierauga mikrobiotu būtu nepieciešami, lai izzinātu, kādas pienskābes baktērijas un raugi piemērojas kailgraudu miežu barības videi spontānā fermentācijā un kā notiek to sukcesija. Šo informāciju varētu izmantot tīrkultūru izvēlē kailgraudu miežu fermentācijā. Kailgraudu miežu specifiskais sastāvs – augstais olbaltumvielu un ne-cietes

polisaharīdu saturs un to īpašības varētu ietekmēt hidrolīzes procesus fermentācijā, barības vielu pieejamību mikroorganismiem un to vairošanos. Tas varētu ieviest korekcijas ierauga fermentācijas tehnoloģisko parametru izvēlē.

Pienskābes baktēriju funkcionālo īpašību izmantošana ierauga fermentācijā, ir viens no ceļiem, lai iegūtu noteiktas gatavā produkta īpašības. Hidrolīze ietekmē arī barības vielu pieejamību mikroorganismiem. Vielu hidrolīzē tiek izmantotas mikroorganismu īpašības (eksopolisaharīdu sintēze, antimikrobiālās īpašības, enzīmu producēšana), kas var ietekmēt maizes uzturvērtību un fizikālās īpašības.

1.5. Olbaltumvielu proteolīze ierauga fermentācijā / *Proteolysis of proteins in sourdough fermentation*

Ierauga fermentācijā uzbriedušo olbaltumvielu proteolīze notiek pienskābes baktēriju producētu un miltos sastopamo enzīmu aktivitātes rezultātā (1.9. att.) (Gänzle, 2014; Scherf et al., 2018). Proteolītiskos enzīmus (proteāzes) iedala proteināzēs un peptidāzēs (Gänzle et al., 2008; Graça et al., 2021). Proteāzes klasificē eksoproteāzēs un endoproteāzēs. Sākotnēji eksoproteāzes hidrolizē peptīdsaites polipeptīdu ķēžu galos, veidojot oligopeptīdus, bet endoproteāzes šķeļ peptīdsaites olbaltumvielu ķēžu centrālajā daļā. Peptidāzes hidrolizē specifiskas peptīdsaites vai sašķeļ peptīdus līdz aminoskābēm (Fu et al., 2021; Kerpes et al., 2016; Scherf et al., 2018).



1.9. att. **Peptīdu hidrolīze un aminoskābju producēšana ierauga fermentācijā /**
Fig. 1.9. Hydrolysis of peptides and producing of amino acids in sourdough fermentation
(Salminen, S., & Wright, 2004)

Enzīmi, kas sašķeļ olbaltumvielas, atrodami pašos glutēnu saturošos graudaugos (*Triticum* spp., *Secale cereale*, *Hordeum vulgare* L.). Ierauga fermentācijā primāri proteolīze notiek graudaugu proteāžu ietekmē. Primāri miltu un ūdens maisījuma pH samazināšanās rezultātā aktivizējas miltu endogēnās proteāzes un sašķeļ olbaltumvielas vidēja un maza izmēra peptīdus, sekundārā hidrolīze ietver peptīdu sašķelšanu ar pienskābes baktēriju izdalītām proteīnāzēm un sekojoši aminoskābes uztur baktēriju augšanu (1.9. att.) (Gänzle et al., 2008; Reale et al., 2021).

Zinātnieki novērojuši prolaminu noārdīšanos diedzētos graudos (Kerpes et al., 2016; Scherf et al., 2018). Miežu hordeīna proteolīzei dīgšanas procesā ir bioloģiska nozīme, jo tā nodrošina graudu ar nepieciešamo slāpekli dīgsta attīstībai. Diedzēšanas procesā endopeptidāžu ietekmē hordeīns sašķeļas līdz peptīdiem, bet eksoproteināzes tos sašķeļ līdz aminoskābēm (Fox et al., 2002). Proteolītiskā aktivitāte atkarīga no diedzēšanas apstākļiem, un glutēns samazinās, palielinoties mitrumam un diedzēšanas laikam un temperatūrai (Kerpes et al., 2016).

Olbumvielu proteolīze notiek ar pienskābes baktēriju producētu proteolītisko enzīmu palīdzību. Pienskābes baktērijas darbojas kā enzīmu avots. Pienskābes baktēriju enzīmu aktivitāte ir atkarīga no baktērijas celma ģenētiskām īpatnībām un fizioloģijas. Ierauga fermentācijā novērota pienskābes baktēriju *Lactiplantibacillus plantarum*, *Pediococcus pentosaceus*, *Lactobacillus helveticus*, *Lactobacillus sanfranciscensis*, *Enterococcus* spp. proteolītiskā aktivitāte (Gerez et al., 2012; Scherf et al., 2018). Pienskābes baktērijām raksturīga specifiska proteolītiskā sistēma, kas atkarīga no pienskābes baktēriju genoma (Liu et al., 2010). Proteolītiskā sistēma ietver proteināzes, peptidāzes un specifisku transporta proteīnu (Salminen, S., & Wright, 2004) (1.9. att.). Proteināzes tiek sintezētas pienskābes baktērijas šūnā un izvietojas uz šūnas virsmas. Proteināzes hidrolizē polipeptīdus līdz oligopeptīdiem, kuri ar transporta proteīna palīdzību tiek transportēti šūnas iekšpusē. Pienskābes baktēriju šūnās esošās peptidāzes šķeļ oligopeptīdus līdz aminoskābēm. Lim et al. (2019) novēroja dažādu proteolītisko aktivitāti atkarībā no pienskābes baktēriju celma un pH, konstatējot augstāko proteolītisko aktivitāti 15.76 U mg⁻¹ *Lactiplantibacillus plantarum* RG14 pie pH 5, un vienlaicīgi aminoskābju glicīna, valīna un glutamīna producēšanu. Līdzīgu pH ietekmi novēroja Loponen et al. (2004), konstatējot specifisko proteināžu aktivitāti pie pH 4.3. Pētījumi liecina, ka fermentācijas laiks ietekmē proteolītisko aktivitāti, novērota tās paaugstināšanās laika intervālā no 6 h līdz 24 h pienskābes baktēriju vairošanās eksponenciālajā fāzē (Reale et al., 2021). *Lactiplantibacillus plantarum* CRL775 un *Pediococcus pentosaceus* CRL792 celmi paaugstina peptidāžu aktivitāti kviešu mīklas 0 – 24 h fermentācijā (30 °C). Šādā fermentācijā gliadīna saturs pēc 4 h samazinājās par 30%, pazeminoties pH līdz 4.3, bet pēc 24 h samazinājās par 70%, sasniedzot pH 3.8 (Gerez et al., 2012). Proteolītiskās aktivitātes paaugstināšanai pētījumos piemērota konkrētu celmu pienskābes baktēriju un mikroskopisko sēņu *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger* izdalīto peptidāžu kombinēšana (Bradauskiene et al., 2021; Di Cagno et al., 2010).

Ierauga fermentācijā proteolīzes rezultātā radušos peptīdu un aminoskābju sastāvs atkarīgs no izmantotās izejvielas un mikroorganismiem, kā arī fermentācijas temperatūras, laika un pH. Fermentētos produktos mainīgās proteolīzes rezultātā var rasties peptīdu virknes ar atšķirīgu bioloģisko aktivitāti. Viens no pētījumiem peptīdiem lunasīns tiek asociēts ar pretvēža aktivitāti (Rizzello et al., 2012). Tomēr pētnieki atzīst, ka ir nepieciešami papildus pētījumi, lai apstiprinātu šādu ietekmi uz cilvēka veselību. Līdz ar dažādu peptīdu veidošanos ir apgrūtināta to identificēšana un glutēna satura noteikšana. Graudi tiek vērtēti kā ilgtermiņā augu olbumvielu avots, tomēr jāņem vērā graudu olbumvielu alergiskais risks (Poutanen et al., 2022). Lai samazinātu graudu olbumvielu alergiskumu, tiek izmantotas biotehnoloģiskas metodes (diedzēšana, fermentācija, enzimatiskā hidrolīze) (Bradauskiene et al., 2021; Gänzle et al., 2008; Graça et al., 2021; Scherf et al., 2018). Dziļāki pētījumi par glutēna samazināšanas iespējām miežu graudos veikti iesala un alus ražošanas nozarē (Kerpes et al., 2016). Ierauga fermentācija apskatīta kā viena no metodēm glutēna samazināšanai. Tomēr zinātnieku vidū novērota neviennozīmīga attieksme pret pilnīgu glutēna satura samazināšanu maizē (<20 mg kg⁻¹), jo fermentācijas parametrus ierobežo maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri.

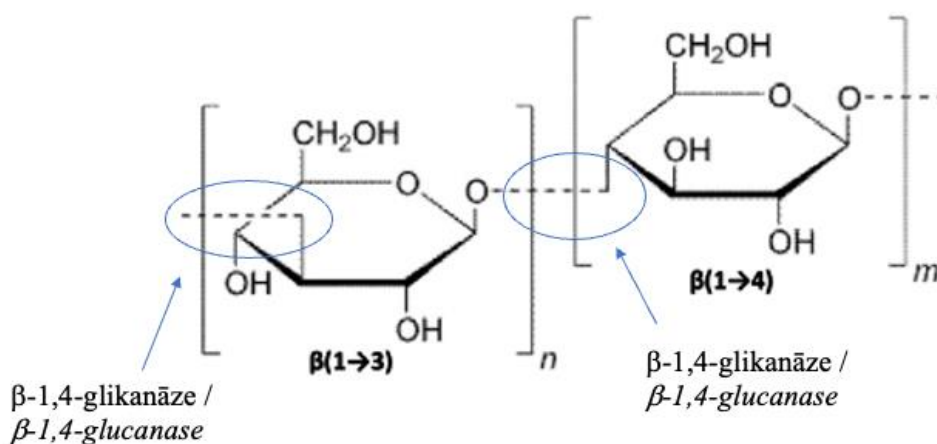
1.6. Ne-cietes polisaharīdu hidrolīze ierauga fermentācijā / *Hydrolysis of non-starch polysaccharides in sourdough fermentation*

Ierauga fermentācijā notiek cietes un ne-cietes polisaharīdu hidrolīze. Ne-cietes polisaharīdiem ir nozīme izstrādājuma struktūras veidošanā, jo tie veido viskozas vielas ūdens

šķīdumos atkarībā no to struktūras un fizikālajām īpašībām. Ierauga fermentācijā ne-cietes polisaharīdu šķelšanā ir nozīme gan miltu enzīmiem, gan pienskābes baktēriju un raugu producētajiem enzīmiem.

β-glikānu hidrolīze

β-glikāniem piemīt holesterīnu regulējoša un prebiotiska funkcija. Kviešu mīklas bagātināšana ar miežu miltiem negatīvi ietekmē maizes struktūru un samazina maizes tilpumu, jo β-glikāni traucē lipekļa struktūras veidošanos (Zhou et al., 2021). Dati literatūrā norāda, ka β-glikānu sašķelšana novērota dažādos pārstrādes procesos (Maina et al., 2021) – diedzēšana, fermentācija, mīcīšana, cepšana (Djurle et al., 2018). Ierauga fermentācijā β-glikānu glikozīdisko saišu šķelšanā ir nozīme miežu endogēnai β-glikanāzei; β-1,3; 1,4-glikanāzei (1.10. att.), taču to var veikt arī bakteriālas (*Bacillus*) un mikroskopisko sēņu, piemēram, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Saccharomyces* izcelsmes enzīmi. Endoglikanāze šķeļot glikozīdisko saiti, veido oligosaharīdus un glikozi (Chen et al., 1993). Endoglikanāzes aktivitāte novērota pH 4.5 – 5.5. Glikanāzēm ir galvenā loma šūnu sienīņu noārdīšanā dīgušos graudos un tās ir sastopamas visās grauda daļās. Dīgšanas laikā tās aktivitāte novērota augstāka kā nedīgušos graudos (Ballance et al., 1976). β-glikānu enzimatisku sašķelšanu var kavēt, izmantojot miltus ar lielāku daļiņu izmēru, jo tiek kavēta ūdens uzsūkšanās un šķīdība. Pētījumu dati norāda, ka vērā ņemama β-glikānu samazināšanās vērojama vienīgi ilgstošā ierauga fermentācijā (20 h), kas veido 10 – 30% samazinājumu (Maina et al., 2021). Šķiedrvielas, tostarp β-glikāni, var kalpot kā alternatīvs enerģijas avots pienskābes baktērijām. Kailgraudu miežu pievienošana piena fermentācijā ar *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* un *Streptococcus thermophilus* paaugstina pienskābes baktēriju KVV skaitu (Dancite et al., 2021). Citu zinātnieku pētījums atklāj β-glikānu saturošu miežu miltu pozitīvu ietekmi uz *Limosilactobacillus fermentum* un *Lactiplantibacillus plantarum* vairošanos (Arena et al., 2014)



1.10. att. β-glikānu glikozīdisko saišu šķelšana enzīmu ietekmē /

Fig. 1.10. Enzymatic hydrolysis of glycoside bounds within β-glucans (Goudar et al., 2020)

Fruktānu hidrolīze

Pētījumi atklāj, ka ierauga fermentācijā fruktāni (augu inulīns) var tikt sašķelti mikroorganismu producētu enzīmu ietekmē (Maina et al., 2021). Augsta fruktānu degradācija novērota *Saccharomyces cerevisiae* invertāzes aktivitātes ietekmē. Verspreeet et al. (2015) atzīmē 80% fruktānu satura samazināšanos mīcīšanas un fermentācijas ietekmē. Fruktānu degradācija var notikt arī pienskābes baktēriju producētu enzīmu fruktozidāzes ietekmē.

Viena no pienskābes baktēriju īpašībām ir eksopolisaharīdu producēšana, kas var ietekmēt ierauga un mīklas tehnoloģiskās īpašības un kuriem ir prebiotiskas īpašības. Ieraugu

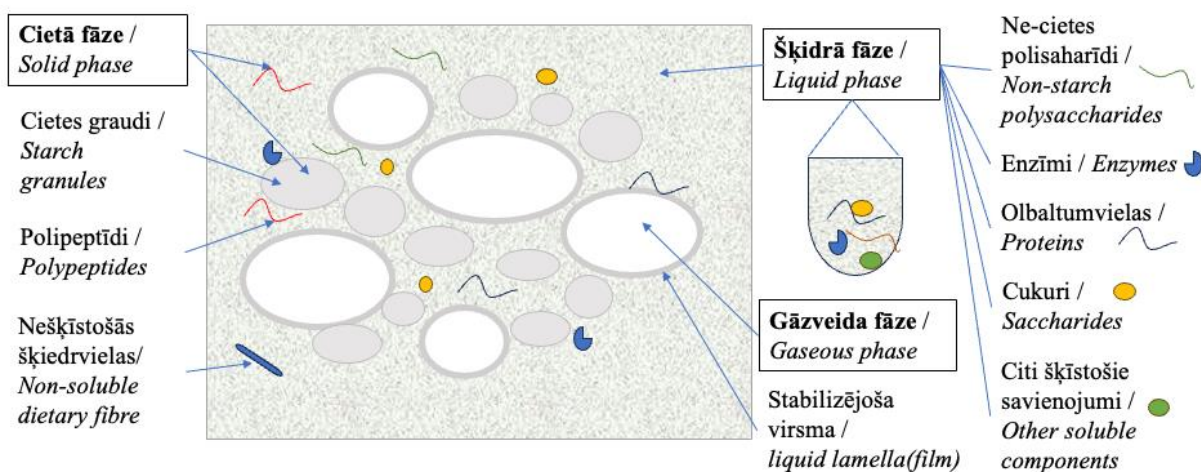
fermentācijā pienskābes baktērijas spēj sintezēt glikāna un fruktāna veida eksopolisaharīdus, izmantojot saharozi. Šie polimēri darbojas kā hidrocoloīdi, un to ietekme mīklā un maizē pamatojas uz ūdens saistīšanas spēju un savstarpēju iedarbību ar citiem mīklas komponentiem, kā ciete un olbaltumvielas, un tas ietekmē maizes struktūru (Torbica et al., 2022). Eksopolisaharīdi pētījumos minēti kā mīklas reoloģiju un maizes mīkstuma struktūru uzlabojoši, tie samazina maizes cietību un pagarina uzglabāšanas laiku, kavējot sacietēšanu (Galle et al., 2011). Inulīns kalpo kā prebiotiskis pienskābes baktērijām. To pieejamība pienskābes baktērijām var paaugstināt fruktānu izdalīšanu (Semjonovs & Zikmanis, 2008).

Pienskābes baktēriju un raugu producēti enzīmi ierauga fermentācijā var šķelt olbaltumvielas, un ne-cietes polisaharīdus, kā arī var veicināt mikroorganismu vairošanos. Tomēr kailgraudu miežu ķīmiskā sastāva specifika (augsts olbaltumvielu saturs, ne-cietes polisaharīdu augstais saturs un viskozās īpašības) var ieviest korekcijas mikroorganismu barības vielu pieejamībā un enzīmu producēšanā, kā arī fermentācijas procesā.

1.7. Ierauga fermentācijas ietekme mīklas struktūras veidošanā / *The influence of sourdough fermentation on dough structure formation*

Ieraugs ir mainīga polidispersa sistēma, kuru raksturo nepārtraukti mainīgas reoloģiskās īpašības. Miltu un ūdens sajaukšanas rezultātā notiek nozīmīgi fizikāli – ķīmiskie un bioķīmiskie procesi. Mikrobioloģiskie procesi uzreiz pēc miltu un ūdens sajaukšanas nav intensīvi, jo notiek mikroorganismu adaptēšanās (lag fāze). Pievienotā ūdens ietekmē notiek hidrolīzes procesi, cietes graudu un olbaltumvielu uzbrišana, šķīšana un vielu savstarpējās sasaistes veidošanās, kuru vājina nešķīstošās šķiedrvielas (Zhou et al., 2021). Mehāniskā iedarbība, samaisot miltus un ūdeni, veicina daļiņu salīšanu un mīklai līdzīga maisījuma izveidošanos.

Miltu un ūdens maisījums ieraugā līdzīgi kā mīklā sastāv no trīs fāzēm (1.11. att.): cietās, šķidrās un gāzveida fāzes vienlaikus (Ауэрман, 2005). Cieto maisījuma fāzi veido cietes graudi, apvalka daļiņas, nešķīstošās šķiedrvielas un uzbriedušas ūdenī nešķīstošās olbaltumvielas. Miltu ciete veido lielāko daļu maisījuma. Cietes graudi un apvalka daļiņas atšķirībā no olbaltumvielām piedod maisījumam tikai plastiskas īpašības. Cietes graudu izmēri un cietes sastāvs ietekmē ierauga reoloģiskās īpašības. Maziem cietes graudiem (<10 μm) ir augstāks blīvums, augstāka ūdens saistīšanas spēja un uz tiem ir lielāka amilolītisko enzīmu ietekme, bet tiem ir mazāka šķīdība un uzbrišanas spēja.



1.11. att. Ierauga un mīklas struktūras shematiskais attēlojums /
Fig. 1.11. Schematic representation of sourdough and dough structure

Mīklas šķidro fāzi (saukta arī *dough liquor*, angļu val.) veido ūdenī šķīstošās miltu daļiņas, tādas kā ūdenī šķīstošās olbaltumvielas (albumīni), ūdenī šķīstošie polisaharīdi (dekstrīni, fruktāni, cukuri), sāļi u.c. Šajā fāzē atrodami arī šķīstošie ne-cietes polisaharīdi, ļoti spēcīgi uzbriestošie un viskozie arabinoksilāni, β -glikāni, fruktāni, mannāni. Šķidrajai fāzei ir nozīme gāzes poru stabilizēšanā mīklā, veidojot stabilizējošas virsmas (Janssen et al., 2021). Mīklās, kuru struktūrā neveidojas lipekļi, piemēram, rudzu, gāzes poru stiprināšanai veidojas olbaltumvielas saturoša saskarsmes plēve, kuru stiprina arabinoksilānu klātbūtne, bet β -glikāni auzu lipīdus saturošajā šķidrajā fāzē neietekmēja stabilizējošo virsmu (Janssen et al., 2020). Lipīdu klātbūtne samazina šķidrās fāzes elastību. Šūnu sienīņu noārdīšanās ātrums un uzbriešana ietekmē mīklas reoloģiskās īpašības. Šķidrā fāze atrodas brīva viskoza šķidrums veidā, kurā peptizējušās olbaltumvielas (Salt et al., 2006). Cietās daļiņas ir izkliedētas šķidrajā fāzē un tās palielina mīklas stingrību. Kopā ar cieto un šķidro fāzi mīklā ir gāzveida fāze. Gāzveida fāze veidojas ūdens un miltu maisīšanas laikā. Daļa atrodas gāzes emulsijas veidā šķidrajā fāzē, bet daļa – ieslēgumu veidā uzbriedušajās olbaltumvielās cietajā fāzē.

Fāžu proporcija nosaka ierauga konsistenci un reoloģiskās īpašības un fermentācijas procesā mainās. Palielinās gāzveida un šķidrā fāze (Pauly et al., 2014). Tas ietekmē ierauga un mīklas reoloģiskās īpašības, kas nosaka maizes fizikālās īpašības. Palielinoties šķidrās un gāzveida fāzes daļai, mīkla kļūst plūstoša. Augstāka šķidrajā fāzē izšķīdušo vielu viskozitāte paaugstina ierauga un mīklas viskozitāti.

Ierauga un mīklas reoloģiskās īpašības

Viena no mīklas reoloģisko īpašību izpētes metodēm ir balstīta uz empīrisko pieeju (ar Mixolab un Farinogrāfu), taču tam nepieciešama īpaši miežu miltiem izstrādāta metode. Torbica et al. (2021) pētījumā analizētas miežu un rudzu reoloģiskās īpašības ar Mixolab ierīci. Miežu ūdens absorbcija (70%) tiek atzīmēta kā augstākā starp rudzu (55%), tritikāles, auzu un sorgo. Tas skaidrots ar augsto β -glikānu un šķiedrvielu saturu. Miežu miltiem ir nepieciešams īsāks mīklas apstrādes laiks (4 s), jo mērījumi ar Mixolab uzrāda zemu miežu mīklas stabilitāti. Kaut arī pēc uzturvielu kvantitatīvā sastāva mieži tiek raksturoti kā līdzvērtīgi rudziem, taču reoloģiskās īpašības atšķiras (Torbica et al., 2021).

Reoloģiskās īpašības var raksturot ar fundamentālās dinamiskās reoloģijas metodēm, kas izskaidro mīklas fizikālās īpašības dažādos tehnoloģiskos posmos (Weipert, 1990). Ierauga un mīklas reoloģiskās īpašības raksturo kompleksās viskozitātes (η), uzkrājuma (G') un zudumu (G'') moduļu rādītāji. G' raksturo elastīgās, bet G'' viskozās īpašības. Mīkla tiek raksturota kā viskoelastīgs materiāls. Viskoelastīgi materiāli apvieno cietas un šķidrās vielas īpašības. Pie mazām deformācijām mīklas viskozitāte var būt augsta, turpretī liela deformācija var izraisīt mīklas struktūras izjukšanu un līdz ar to viskozitātes samazināšanos. Tehnoloģiskajā procesā mīklas struktūru ietekmē dažāda iedarbība, kā arī var notikt mijiedarbība starp mīklas struktūras komponentiem, kas izmaina struktūru. Maisīšanas un apstrādes laikā deformācija ir lielāka, nekā fermentācijas vai cepšanas procesā. Dinamiskā reoloģija apraksta materiāla fizikālās īpašības plašā bīdes sprieguma un bīdes ātruma diapazonā. Tā raksturo pārbaudāmā materiāla plūsmas īpašības. Ierauga fermentācijā kompleksā viskozitāte un elastība samazinās, jo starpmolekulārās saites vājinās un palielinās plūstamība. Tas skaidrojams ar hidrolītiskiem procesiem ieraugā, cietes un olbaltumvielu depolimerizāciju. Pienskābes baktēriju izdalīti eksopolisaharīdi var paaugstināt miežu ierauga viskozitāti, kas skaidrojams ar lielmolekulāro savienojumu ūdens saistīšanas īpašībām (Galle et al., 2011; Perri et al., 2021).

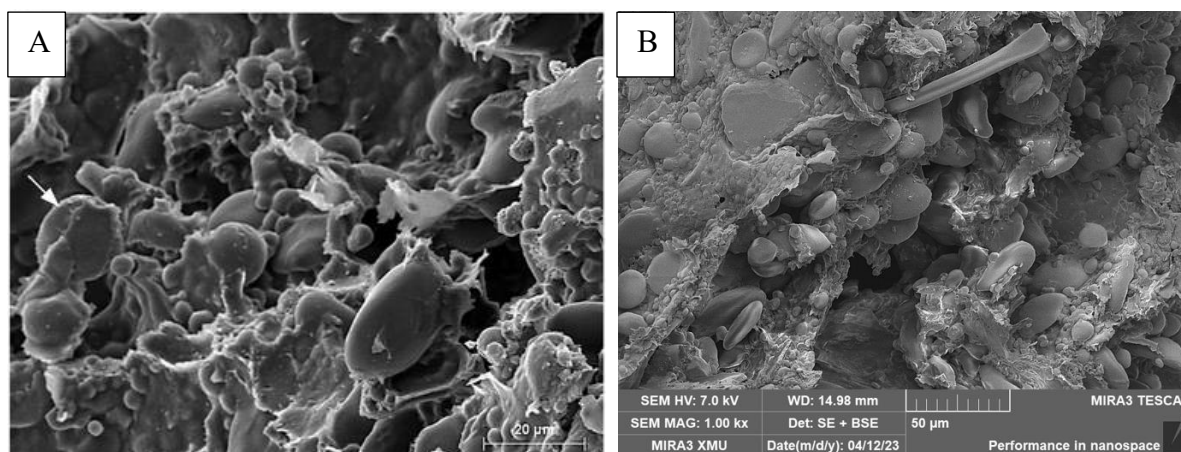
Mīklas elastīgās un viskozās īpašības atkarīgas no vielu īpašībām, to savstarpējās ietekmes un izmaiņām tehnoloģisko procesu ietekmē. Beck et al. (2011) pētījuši enzīma transglutamināzes ietekmi uz mīklas reoloģiskām īpašībām, konstatējot, ka transglutamināzes pievienošana uzlabo nefermentētas rudzu mīklas elastīgās īpašības. Punia et al. (2019) pētījums atklāj vielu savstarpējo ietekmi uz maisījuma reoloģiskām īpašībām, norādot ka miežu rezistentā ciete ietekmē kviešu cietes klīsterizēšanās īpašības. Dinamiskās reoloģijas metode tiek izmantota arī ierauga pētījumos. Ar tīrkultūrām fermentēts kviešu ieraugs vājina mīklas

struktūru (Yildirim-Mavis et al., 2019). Yildirim-Mavis et al. (2019) atklāja, ka ierauga fermentācijā iespējama transformācija no viskoelastīga cieta uz viskoelastīgu šķidru ieraugu. Dinamiskās reoloģijas metode sniedz nozīmīgu informāciju par ierauga un mīklas īpašībām un izmaiņām tehnoloģisko procesu ietekmē. Plašāku skaidrojumu sniedz reoloģijas izpētes papildināšana ar mikroskopisko (SEM), spektroskopiskām (Raman, FTIR, fluorescences), elektroforēzes metodēm (Zhou et al., 2021).

Olbaltumvielu un ne-cietes polisaharīdu nozīme miežu mīklas struktūras veidošanā

Mīklā, kurā struktūru neveido lipekli, noteicošā loma ir olbaltumvielu, cietes un šķiedrvielu īpašībām. Ierauga fermentācijā, mainoties struktūru veidojošo vielu sastāvam un savstarpējai saistībai mainās mīklas struktūru raksturojošie rādītāji, kas nosaka maizes fizikālās īpašības.

Miežu un rudzu mīklā struktūra veidojas atšķirīgi no kviešu miltu mīklas. Ūdenī un sāls šķīdumā nešķīstošās olbaltumvielas gliadīns un glutenīns veido elastīgu mīklu, ko sauc par lipekli. Kviešu gliadīns un glutenīns ir unikāli, jo veido viskoelastīgu polimēru struktūru un ir noteicošie kviešu maizes struktūras veidošanā, pateicoties to elastīguma īpašībām. Rudzu un miežu olbaltumvielu sastāvs un īpašības atšķiras no kviešos pārstāvētajām. Miežu olbaltumvielām raksturīga augsta prolaminu (hordeīns) frakcija. Torbica et al. (2021) saskata miežu hordeīna un hordenīna frakciju satura līdzību ar kviešu gliadīna un glutenīna saturu, kas mīklā potenciāli varētu veidot lipekli. Tomēr lipekli veido tikai kviešu olbaltumvielas un citu graudaugu miltos tas neveidojas (1.12. att.). Olbaltumvielu īpašībām un saturam ir nozīme fermentācijā. Balcerk et al. (2016) atzīst, ka augsts olbaltumvielu saturs miežos samazina ogļhidrātu pieejamību, kas ietekmē fermentāciju. Tomēr aminoskābes un peptīdi ir nepieciešami pienskābes baktēriju un raugu metabolismam. Olbaltumvielas sastāvā esošais hordeīns ir izvietojies un saistīts apkārt cietes graudiem (Borén et al., 2004; Bose et al., 2021; Brennan et al., 1996; Fox et al., 2002) endospermā un var būt saistīts ar citām olbaltumvielām, kā piemēram β -amilāze, dekstrināze, endoproteināze.



1.12. att. **Kviešu (A) un rudzu (B) mīklas struktūra /**
Fig. 1.12. Structure of wheat (A) and rye (B) dough
(Gil-Humanes et al., 2014; Murniece et al., 2023)

Olbaltumvielu īpašībām un to saistībai ar cieti un šķiedrvielām ir galvenā nozīme mīklas struktūras veidošanā. Nešķīstošās šķiedrvielas apgrūtina cietes un olbaltumvielu struktūras veidošanos. Kailgraudu miežu miltos augstais β -glikānu saturs un tā īpašības ietekmē mīklas viskoelastību. Miežu β -glikānu šķīdība ir augstāka (38 – 69%) nekā rudzu arabinoksilānu, veidojot augsti viskozus šķīdumus, potenciāli stabilizējot mīklas struktūru un palēninot oglekļa difūziju no mīklas, tādējādi palielinot mīklas elastību (Zhou et al., 2021). Tomēr β -glikāni un

arabinoksilāni to viskozitātes dēļ var veidot barjeru hidrolītiskiem enzīmiem un kavēt cietes un olbaltumvielu sašķelšanu (Baik & Ullrich, 2008). Savukārt, nešķīstošās šķiedrvielas apgrūtina mīklas struktūras veidošanos. Ierauga fermentācijas laikā miltu un mikroorganismu hidrolītisko enzīmu ietekmē tiek sašķeltas un vājinātas starpmolekulārās saites. Tādējādi enzimatiskai hidrolīzei ir pozitīva loma šķiedrvielu šķīdināšanā, uzlabojot mīklas fizikālās īpašības (Pejcz et al., 2015, 2017). Tādējādi var secināt, ka fermentācijai varētu būt struktūru uzlabojoša loma kailgraudu miežu maizes gatavošanā un ierauga fermentācija būtu piemērota kailgraudu miežu miltu ar augstu olbaltumvielu un šķiedrvielu saturu izmantošanā.

Literatūras apskata kopsavilkums / *Summary of literature review*

Maizes gatavošanā izmanto ieraugu (spontāno, fermentētu ar tūrkultūrām un kombinēto), kurā galvenā loma ir pienskābes baktēriju un raugu, kā arī miltu enzimatiskai aktivitātei. Ierauga fermentācijā, galvenokārt, izmanto kviešu un rudzu miltus, taču kā alternatīva izejviela tiek izskatīti arī kailgraudu mieži, kuri raksturojami kā bioloģiski vērtīga izejviela ar augstu olbaltumvielu un šķiedrvielu, īpaši β -glikānu, kā arī fenolu savienojumu, minerālvielu saturu. Zinātniskajā literatūrā doti kviešu un rudzu ierauga fermentācijas tehnoloģiskie parametri, taču par kailgraudu miežu fermentāciju nepieciešami papildus pētījumi. Kailgraudu miežu ķīmiskā sastāva specifika ņemama vērā fermentācijas tehnoloģisko parametru izvēlē. Kailgraudu miežu mikrobiota ir daudzveidīga. Piemērotu tehnoloģisko parametru izvēle spontānās fermentācijas pirmajos posmos novērstu nevēlamās mikrobiotas vairošanos un veicinātu pienskābes baktēriju vairošanos un sukcesiju. Spontāno fermentāciju ietekmē vairāku faktoru vienlaicīga mijiedarbība. Kailgraudu miežu mikrobiotas pētījumi un tās sukcesija ierauga fermentācijā dotu plašāku informāciju par izejvielas ietekmi uz mikroorganismu vairošanos. Fermentācijas uzsākšanai var izmantot pienskābes baktēriju tūrkultūras, piemēram, *Lactiplantibacillus plantarum* un *Pediococcus pentosaceus*. Ierauga fermentācijā pienskābes baktēriju un raugu producēti enzīmi veicina olbaltumvielu un ne-cietes polisaharīdu hidrolīzi, kas uzlabotu barības vielu pieejamību šiem mikroorganismiem. Kailgraudu miežu olbaltumvielām novērota augsta olbaltumvielas hordeīna frakcija, kas ietekmē tehnoloģisko procesu un maizes bioloģisko vērtību.

Maizes gatavošanā kailgraudu miežu miltus izmanto, galvenokārt, kviešu miltu bagātināšanai ar šķiedrvielām. Kviešu mīklā pievienojamais daudzums ir ierobežots, augstā miežu šķiedrvielu, īpaši β -glikānu satura dēļ, jo tie traucē lipekļa veidošanos mīklā. Ierauga un mīklas fermentācija būtu risinājums kailgraudu miežu maizes gatavošanā līdzīgi rudzu maizes, kurā struktūru neveido lipekļi, gatavošanai. Olbaltumvielu, cietes un ne-cietes polisaharīdu fizikāli-ķīmiskās un mikrobioloģiskās pārvērtības ierauga un mīklas fermentācijā varētu uzlabot maizes fizikālās īpašības un uzturvērtību. Tāpēc augstvērtīgas izejvielas izmantošana fermentācijā varētu būt risinājums bioloģiski vērtīgas maizes gatavošanā. Pētījuma mērķis ir izziņāt kailgraudu miežu ierauga fermentāciju un vērtēt tās ietekmi uz glutēna un ne-cietes polisaharīdu saturu un miežu maizes fizikālajām īpašībām.

In breadmaking, sourdough is used (spontaneously, fermented with starter cultures, and combined), the central role of which is occupied by the enzymatic activity of lactic acid bacteria and yeast, as well as the enzyme activity of flour. Wheat and rye flour are mainly used in sourdough fermentation. However, hull-less barley is also considered an alternative raw material due to its promising nutrient-rich composition and high protein and fiber content, specifically β -glucans, phenolic compounds and minerals. The technological parameters of wheat and rye sourdough fermentation are given in the scientific literature, but additional studies are needed specifying the fermentation of hull-less barley. The specificity of the chemical composition of hull-less barley is considered in the selection of technological parameters of fermentation. The microbiota of hull-less barley is diverse. Selecting suitable technological parameters in the first steps of spontaneous fermentation would prevent the

*proliferation of undesirable microbiota and promote the development and succession of lactic acid bacteria. The simultaneous interaction of several factors influences spontaneous fermentation. Studies of the microbiota of hull-less barley and its succession in fermentation would provide more insights regarding the influence of the raw material on the development of microorganisms. Starter cultures of lactic acid bacteria, such as *Lactiplantibacillus plantarum* and *Pediococcus pentosaceus*, can be employed to initiate fermentation. In sourdough fermentation, enzymes produced by lactic acid bacteria and yeast promote the hydrolysis of proteins and non-starch polysaccharides, improving nutrient availability. A high hordein fraction of the protein was observed for hull-less barley proteins, which affects the technological process and the biological value of the bread.*

In breadmaking, hull-less barley flour is mainly used to enrich wheat flour with dietary fiber. The amount that can be added to wheat dough is limited due to the high content of barley fibers, especially β -glucans, as they interfere with the formation of gluten in the dough. Sourdough and dough fermentation would be a solution for developing hull-less barley bread, similar to rye bread, in which gluten does not represent the structure. Physicochemical and microbiological modifications of proteins, starch and non-starch polysaccharides in sourdough and dough fermentation could improve bread's physical properties and nutritional value. Therefore, using high-quality raw materials in fermentation could be a solution for making biologically-rich bread. The research aims to ascertain the fermentation of hull-less barley sourdough and evaluate its effect on the content of gluten and non-starch polysaccharides and the physical properties of barley bread.

2. MATERIĀLI UN METODEDES / *MATERIALS AND METHODS*

2.1. Pētījuma norises laiks un vieta / *Time and location of the research*

Pētījums veikts laikā no 2020. gada februāra līdz 2023. gada decembrim.

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē (LBTU) noteikti ierauga tehnoloģiskie parametri, veikts maizes kontrolcepiens, paraugu sagatavošana, un sekojošu analīžu veikšana.

- Pārtikas institūta (iepriekš Pārtikas tehnoloģijas fakultāte) Mikrobioloģijas zinātniskajā laboratorijā noteikti mikrobioloģiskie rādītāji (pienskābes baktēriju un raugu KVV skaits), ierauga skābums un pH, kā arī veikta mikrostruktūras izpēte. Zinātniskajā laboratorijā noteikta proteāžu aktivitāte ieraugā, ierauga reoloģiskās īpašības un maizes mīkstuma fizikālās īpašības. Maizes ceptuvē veikts kailgraudu miežu maizes un pilngraudu kviešu maizes kontrolcepiens, noteikta maizes porainība un tilpums.
- Iegūto rezultātu statistiskā analīze veikta sadarbībā ar LBTU Datoru sistēmu un datu zinātnes institūtu.
- Biotehnoloģiju zinātniskās laboratorijas Viedo tehnoloģiju nodaļā (VTN) veikta mikrostruktūras izpēte.
- Agrolesursu un ekonomikas institūta (AREI) Stendes pētījumu centra Graudu tehnoloģijas un ķīmijas laboratorijā noteikts β -glikānu un cietes saturs.

Pārtikas un fermentācijas tehnoloģiju centrā (TFTAK, Igaunija) analizēts fruktānu un mannānu saturs, veikta pienskābes baktēriju un mikroskopisko sēņu identifikācija.

Budapeštas Tehnoloģiju un Ekonomikas universitātē Lietišķās biotehnoloģijas un pārtikas zinātnes departamentā (Ungārija) noteikts glutēna saturs kailgraudu miežu miltu, ierauga un maizes paraugos.

2.2. Pētījumā izmantoto materiālu raksturojums / *Characterization of materials*

• **Kailgraudu miežu graudi**

Pētījumā izmantoti no AREI Stendes pētījumu centra saņemtie kailgraudu miežu 'Kornelija' (*Hordeum vulgare* L. subsp. *Distichum* (L.) *Körn.*, var. *nudum*) (2020. gada raža) graudi. Kailgraudu miežu miltu iegūšanai graudi samalti laboratorijas dzirnavās (Hawos Kornmuhlen GmbH, Vācija) pirmajā malšanas līmenī. Lai noteiktu kailgraudu miežu miltu daļiņu izmēru, milti izsijāti laboratorijas sijātājā AS200 (Retsch GmbH, Vācija). Miltu daļiņu izmērs konstatēts 160 – 710 μm , no tiem 50% bija uz sieta 450 μm , 28% bija uz sieta 315 μm un 10% bija lielāki kā 710 μm .

• **Citas izejvielas**

Miežu iesals (mitrums 9%, diastātiskais spēks 250 WK) no SIA Latmalt (Staļģene, Latvija), sāls (Artemsil, Ukraina), cukurs (Nordzucker Polska S.A., Polija) un dzeramais ūdens.

Pilngraudu kviešu milti pilngraudu kviešus maizes gatavošanai ražoti AS "Rīgas dzirnavnieks". Ražotāja informācija par pilngraudu kviešu miltu sastāvu: olbaltumvielas 11.9 g 100 g⁻¹; ogļhidrāti 61.8 g 100 g⁻¹; cukuri 1 g 100 g⁻¹; tauki 1.4 g 100 g⁻¹.

• **Tīrkultūras**

Ierauga ar tīrkultūrām fermentācijai no Latvijas Mikroorganismu kultūru kolekcijas (LU Bioloģijas fakultāte) iegādātas pienskābes baktērijas *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 un *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773. Katra tīrkultūra saņemta uz MRS agara barotnes Petri platē iepakojumā ar skābekļa absorbentu, un līdz lietošanai glabātas 4 ± 1 °C temperatūrā. Fermentācijai izmantots komerciālais raugs *Saccharomyces cerevisiae* (Jastbolaget AB, Zviedrija). Uzglabāšana 4 ± 1 °C.

2.3. Pētījuma struktūra / *Structure of the research*

Pētījums veikts sešos etapos, kas attēloti 2.1. tabulā.

2.1. tabula / *Table 2.1*

Pētījuma etapu raksturojums / *Description of the research stages*

Pētījuma etaps / Stage of research	Raksturojums / Description
I etaps / <i>Stage I</i>	Kailgraudu miežu ķīmiskā sastāva analīze / <i>Analysis of chemical composition of hull-less barley</i>
II etaps / <i>Stage II</i>	Kailgraudu miežu ierauga gatavošana / <i>Preparation of the hull-less barley sourdough</i> <ul style="list-style-type: none"> Spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšana un mikroorganismu identifikācija / <i>Determination of the optimal technological parameters of spontaneous sourdough and identification of microorganisms</i> Ierauga ar tīrkultūrām fermentācija / <i>Fermentation of the sourdough with starter cultures</i>
III etaps / <i>Stage III</i>	Kailgraudu miežu ierauga raksturojums un fermentācijas ietekmes izvērtēšana uz mīklas struktūras veidošanos / <i>Characterisation of hull-less barley sourdough and evaluation of the effect of fermentation on the dough structure formation</i>
IV etaps / <i>Stage IV</i>	Kailgraudu miežu maizes un pilngraudu kviešu maizes kontrolcepiens un fizikālo īpašību noteikšana / <i>Preparation of hull-less barley bread and wholegrain wheat bread and determination of the physical parameters</i>
V etaps / <i>Stage V</i>	Glutēna satura izmaiņu novērtējums kailgraudu miežu ieraugā un kailgraudu miežu maizē / <i>Evaluation of the changes in gluten concentration in hull-less barley sourdough and bread</i>
VI etaps / <i>Stage VI</i>	Cietes un ne-cietes polisaharīdu satura ietekmes uz maizes fizikālajām īpašībām izvērtēšana / <i>Evaluation of the influence of starch and non-starch polysaccharide content on the physical properties of bread</i>

Pētījumā izmantotie paraugu saīsinājumi norādīti 2.2. tabulā.

2.2. tabula / *Table 2.2*

Paraugu saīsinājumu skaidrojums / *Explanation of the sample abbreviations*

Parauga apzīmējums / Abbreviation	Parauga nosaukuma atšifrējums / Explanation of the sample
Milti / Flour	
KM / <i>HBF</i>	Kailgraudu miežu milti / <i>Hull-less barley flour</i>
KM.1 / <i>HBF.1</i>	KM pirmais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KM sample 1 in the identification of fungi</i>
KM.2 / <i>HBF.2</i>	KM otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KM sample 2 in the identification of fungi</i>
PK / <i>WWF</i>	Pilngraudu kviešu milti / <i>Wholegrain wheat flour</i>
Ieraugs / Sourdough	
KMI-S / <i>HBS-S</i>	Kailgraudu miežu spontānais ieraugs fermentēts, ievērojot optimālos tehnoloģiskos parametrus / <i>Hull-less barley spontaneous sourdough fermented at optimal technological parameters</i>
KMI1 / <i>HBS1</i>	Fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 1. posma / <i>Fermented flour and water mixture after 1st step</i>
KMI1.1 / <i>HBS1.1</i>	KMI1 pirmais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI1 sample 1 in the identification of fungi</i>

Parauga apzīmējums / Abbreviation	Parauga nosaukuma atšifrējums / Explanation of the sample
KMI1.2 / HBS1.2	KMI1 otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI1 sample 2 in the identification of fungi</i>
KMI2 / HBS2	Fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 2. posma / <i>Fermented HBF and water mixture after 2nd step</i>
KMI2.1 / HBS2.1	KMI2 pirmais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI2 sample 1 in the identification of fungi</i>
KMI2.2 / HBS2.2	KMI2 otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI2 sample 2 in the identification of fungi</i>
KMI3 / HBS3	Kailgraudu miežu spontānais ieraugs pēc 3. posma / <i>Hull-less barley spontaneous sourdough after 3rd step</i>
KMI3.1 / HBS3.1	KMI3 pirmais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI3 sample 1 in the identification of fungi</i>
KMI3.2 / HBS3.2	KMI3 otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / <i>KMI3 sample 2 in the identification of fungi</i>
KMI-T / HBS-T	Ar tīrkultūrām fermentēts kailgraudu miežu ieraugs / <i>Hull-less barley sourdough fermented with starter cultures</i>
KMI-T0 / HBS-T0	KM un ūdens maisījums atjaunots ar KMI-T daļu / <i>The mixture of hull-less barley flour and water backslopping with renewable part of HBS-T</i>
KMI-S0 / HBS-S0	KM un ūdens maisījums atjaunots ar KMI-S daļu / <i>The mixture of hull-less barley flour and water backslopping with renewable part of HBS-S</i>
Mīkla / Dough	
NFKM / NFBD	Kailgraudu miežu mīkla uzreiz pēc mīcīšanas / <i>Hull-less barley dough after kneading</i>
FKM / FBD	Kailgraudu miežu mīkla pēc 4 h fermentācijas / <i>Fermented hull-less barley dough fermented for 4 h</i>
Maize / Bread	
KMM-S / HBB-S	Kailgraudu miežu maize ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu / <i>Hull-less barley bread prepared with hull-less barley spontaneous sourdough</i>
KMM-T / HBB-T	Kailgraudu miežu maize ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu / <i>Hull-less barley bread prepared with hull-less barley sourdough with starter cultures</i>
KMM-R / HBB-Y	Kailgraudu miežu maize ar raugu / <i>Hull-less barley bread with yeast</i>
PKM-S / WWB-S	Pilngraudu kviešu maize ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu / <i>Wholegrain wheat bread prepared with hull-less barley spontaneous sourdough</i>
PKM-T / WWB-T	Pilngraudu kviešu maize ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu / <i>Wholegrain wheat bread with hull-less barley sourdough with starter cultures</i>
PKM-R / WWB-Y	Pilngraudu kviešu maize ar raugu / <i>Wholegrain wheat bread with yeast</i>

2.4. Kailgraudu miežu miltu ķīmiskā sastāva analīze / Analysis of hull-less barley flour chemical composition

Kailgraudu miežu miltiem veikta ķīmiskā sastāva analīze saskaņā ar 2.3. tabulā dotajām metodēm. Šķiedrvielas noteiktas enzimatiski-gravimetriski atbilstoši standartam AOAC 985.29 ar Foss Analytical Fibertec E 1023 System analītisko sistēmu (Foss, Dānija). Paraugu inkubēšanai izmantots Megazyme šķiedrvielu noteikšanas komplekts (Megazyme total dietary fiber assay kit, Megazyme Ltd, Īrija). Parauga iesvars ņemts 1.000 ± 0.005 g. Divi paraugi tika analizēti divos atkārtojumos (n=4). Fruktānu un mannānu saturs tika analizēts sadarbībā ar

TFTAK Igaunijā. Fruktānu noteikšanai izmantots Megazyme komplekts K-FRUC (Megazyme Ltd, Īrija), nolasot mērījumus 410 nm (UV-VIS spectrophotometer, Thermo electron corp, Lielbritānija). β -glikāni noteikti atbilstoši ICC 168 AREI Stendes pētījumu centrā. Lai cietes, šķiedrvielu, β -glikānu, fruktānu un mannānu rezultāti būtu salīdzināmi, tie izteikti % sausnas.

2.3. tabula / Table 2.3

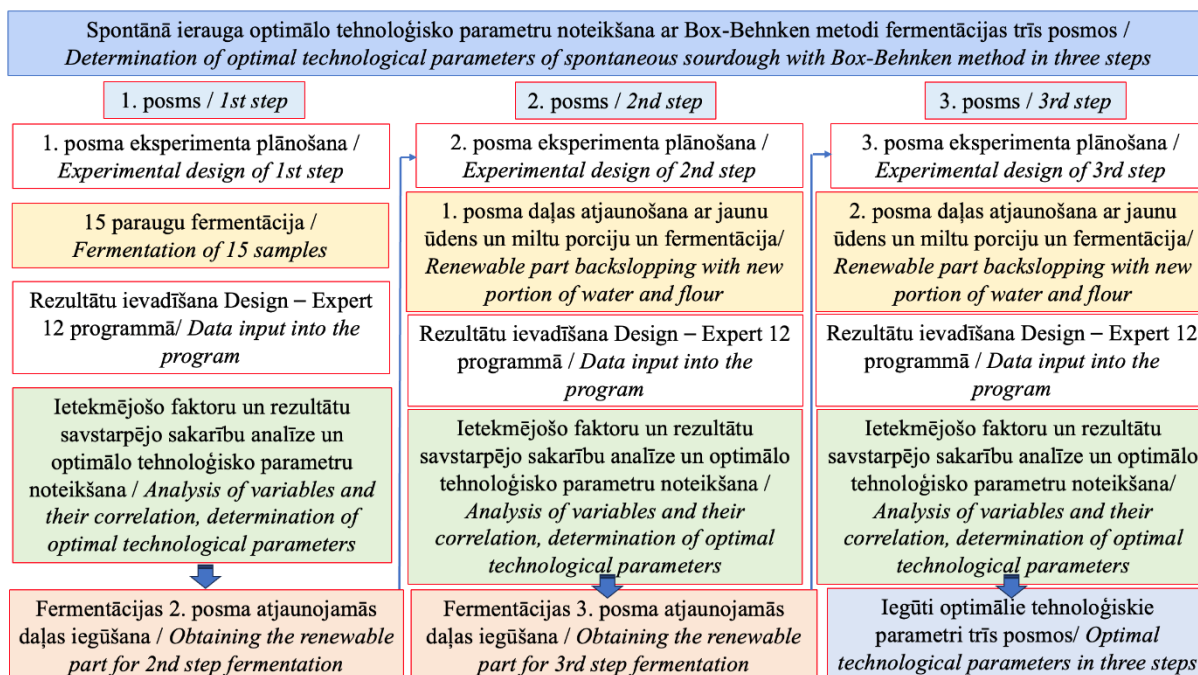
**Kailgraudu miežu miltu ķīmiskā sastāva analizēšanas metodes /
Analysis methods of chemical composition of the hull-less barley flour**

Rādītājs / Parameter	Metode vai avots / Standard or source
Mitrums / Moisture, %	AACC 44-15A
Olbaltumvielas / Protein, g 100 g ⁻¹	(Majore et al., 2021)
Ciete / Starch, g 100 g ⁻¹	LVS EN ISO 10520:2001
Šķiedrvielas / Total dietary fibre, g 100 g ⁻¹	AOAC 985.29; (Reidzane et al., 2023)
Rezistentā ciete / Resistant starch, g 100 g ⁻¹	(Majore et al., 2021)
β -glikāni, % sausnas / β -glucans, % dw	ICC 168
Fruktāni, % sausnas / Fructans, % dw	AOAC 999.03; AACC 32-32.01 (Reidzane et al., 2023)
Mannāni, % sausnas / Mannans, % dw	AŠH / HPLC method (François, 2007; Reidzane et al., 2023)

**2.5. Kailgraudu miežu ierauga fermentācija /
Hull-less barley sourdough fermentation**

2.5.1. Spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšana trīs posmu fermentācijā / Determination of the optimal technological parameters of spontaneous sourdough three step fermentation

Optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanas secība parādīta 2.2. attēlā.



2.1. att. Spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanas secība /
Fig. 2.1. Schematic representation of the optimal technological parameters of spontaneous sourdough determination

Ierauga fermentācijai raksturīga vairāku faktoru vienlaicīga mijiedarbība. Ierauga fermentācijas optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanai tika izmantota Box-Behnken metode ar trīs mainīgajiem faktoriem (Abedfar & Sadeghi, 2019; Katina et al., 2006). Pētījuma II etapā tika veikta kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācija laboratorijas apstākļos (Reidzane et al., 2021). Kailgraudu miežu ierauga fermentācijai izmantota trīs posmu metode, kuras pirmajā posmā fermentēts miltu un ūdens maisījums, bet otrajā un trešajā posmā atjaunojamajai daļai pievienota jauna ūdens un miltu porcija. Lai noteiktu optimālos tehnoloģiskos parametrus spontānā ierauga fermentācijā veikta mainīgo faktoru – pievienotā ūdens daudzuma (ūdens, X_1); fermentācijas temperatūras (temperatūra, X_2); fermentācijas laika (laiks, X_3) vienlaicīgas ietekmes uz ierauga raksturojošiem rādītājiem modelēšana. Modelēšanā iegūtas atbildes – pH; pienskābes baktēriju (PB) un raugu KVV g^{-1} . Modelēšana paredz 15 paraugu analizēšanu saskaņā ar Box-Behnken metodes struktūru (2.4. tabula) un eksperimenta plānu (2.5. tabula). Katram kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas posmam tika izveidots unikāls eksperimenta plāns. Eksperimentu plāna izveidei ietekmējošo (mainīgo) faktoru minimālās un maksimālās vērtības noteiktas saskaņā ar zinātniskajā literatūrā dotajiem dažādu spontāno ieraugu fermentācijā izmantotiem tehnoloģiskiem parametriem (Spicher & Stephan, 1993), ievērojot metodes prasību par vienādu intervālu starp parametru līmeņiem.

2.4. tabula / Table 2.4

Box-Behnken metodes struktūra / Structure of Box-Behnken method

Parauga Nr. / Sample No	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Kailgraudu miežu miltiem raksturīga augsta (70%) ūdens absorbcija (Torbica et al., 2022) augstā β -glikānu satura dēļ, tāpēc piemērots pievienotā ūdens daudzums no 100 līdz 200 ml. Pamatojoties uz zinātniskās literatūras avotiem, fermentācijas laiks 1. posmā tiek piemērots 24 h (Çakır et al., 2020; Harth et al., 2016). Savukārt, 2. posmā piemērojams īsāks fermentācijas laiks (Spicher & Stephan, 1993). 3. posmā izvēlēts īsāks fermentācijas laiks, lai saglabātu raugu aktivitāti. Eksperimentu uzsākšanai sajaukti 100 g kailgraudu miežu milti un dzeramais ūdens atbilstoši attiecīgā posma eksperimentu plānam (2.5. tabula). Nākamajam posmam nepieciešamās atjaunojamās daļas iegūšanai ieraugs gatavots saskaņā ar iepriekšējā posmā iegūtajiem optimālajiem parametriem. 2. un 3. fermentācijas posmā ierauga gatavošanai 100 g

atjaunojamās daļas pievienoti 100 g miltu un ūdens, kā norādīts attiecīgā posma eksperimentu plānā (2.5. tabula) atbilstoši modeļa struktūrai (2.4. tabula). Atjaunojamās daļas daudzums un jaunā miltu porcija tika pievienota attiecībā 1:1 atbilstoši zinātniskajā literatūrā dotajiem spontāno ieraugu fermentācijas pirmo posmu piemēriem (Çakır et al., 2020; Spicher & Stephan, 1993). Uzreiz pēc fermentācijas katram paraugam veikti pH (n=3), pienskābes baktēriju KVV g⁻¹ (n=4) un raugu KVV g⁻¹ (n=4) mērījumi (2.7. tabula) atbilstoši 2.5.3. nodaļā dotajam aprakstam un aprēķināts vidējais aritmētiskais rādītājs. PB un raugu vidējie mērījumi izteikti kā decimāllogarīti.

2.5. tabula / Table 2.5

Box-Behnken eksperimenta plāns / Box-Behnken experimental design

Mainīgie faktori / <i>Variable factors</i>	Mērv. / <i>Units</i>	Simbols / <i>Symbol</i>	Mainīgo faktoru līmeņi / <i>Levels of parameters</i>								
			1. posms / <i>Step 1</i>			2. posms / <i>Step 2</i>			3. posms / <i>Step 3</i>		
			-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
Ūdens / <i>Water</i>	ml	X ₁	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Temperatūra / <i>Temperature</i>	°C	X ₂	26	28	30	29	32	35	26	29	32
Laiks / <i>Time</i>	h	X ₃	20	24	28	8	16	24	8	14	20

Vidējie mērījumi ievadīti Design-Expert 12 (DE) programmā (Statease Inc., Minneapolis, ASV). Ar programmas Design-Expert 12 palīdzību tika noteikti fermentācijas posmu optimālie parametri saskaņā ar katrā posmā definētajiem kritērijiem (2.6. tabula).

2.6. tabula / Table 2.6

**Izvirzītie kritēriji spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanai /
*Criteria for the determination of optimal technological parameters for spontaneous
sourdough***

Posms / <i>Step</i>	Kritēriji / <i>Criteria</i>	Pamatojums / <i>Explanation</i>
1.posms / <i>1st step</i>	Maksimālais raugu skaits (log ₁₀ KVVg ⁻¹) / <i>Yeast maximum (log₁₀ CFU g⁻¹)</i>	Raugu vairošanās, pienskābes baktēriju adaptācija / <i>Yeasts growth, adaptation of lactic acid bacteria</i>
2.posms / <i>2nd step</i>	Maksimālais pienskābes baktēriju un raugu skaits (log ₁₀ KVVg ⁻¹) / <i>Lactic acid bacteria and yeast maximum (log₁₀ CFU g⁻¹)</i>	Pienskābes baktēriju vairošanās, pH pazemināšana, raugu saglabāšana / <i>Lactic acid bacteria growth, decrease of pH, preservation of yeasts</i>
3.posms / <i>3rd step</i>	Maksimālais pienskābes baktēriju un raugu skaits (log ₁₀ KVVg ⁻¹) / <i>Lactic acid bacteria maximum and yeast (log₁₀ CFU g⁻¹)</i>	Pienskābes baktēriju vairošanās, pH pazemināšana, raugu saglabāšana / <i>Lactic acid bacteria growth, decrease of pH, preservation of yeasts</i>

Datu analizēšanai un modelēšanai veikta dispersijas analīze (ANOVA), izvērtējot modeli (lineārais, divfaktoru vai kvadrātiskais), kas vizualizēts faktoru vienlaicīgas ietekmes un atbilžu 3D attēlos (*response surface*, angļu val.). Trīs faktoru regresijas kvadrātiskā modeļa nelineāras sakarības izsaka šāds vienādojums (2.1.),

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_2 X_3 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_1^2 + \beta_8 X_2^2 + \beta_9 X_3^2, \quad (2.1.)$$

kur

Y – atbilde (pH, PB, raugi);

β_n – regresijas koeficients;
 $X_1; X_2; X_3$ – mainīgie faktori.

Lineārā modeļa sakarības izsaka lineāra funkcija (2.2.),

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3, \quad (2.2.)$$

kur

Y – atbilde (pH, PB, raugi);

β_n – regresijas koeficients;

$X_1; X_2; X_3$ – mainīgie faktori.

Divfaktoru modeļa sakarības izsaka funkcija (2.3.),

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_2 X_3 + \beta_6 X_1 X_3, \quad (2.3.)$$

kur

Y – atbilde (pH, PB, raugi);

β_n – regresijas koeficients;

$X_1; X_2; X_3$ – mainīgie faktori.

2.5.2. Kailgraudu miežu ierauga ar tīrkultūrām fermentācija / *Fermentation of hull-less barley sourdough with starter cultures*

Pediococcus pentosaceus P773 celms ir piemērots graudu, tostarp miežu fermentācijai (Semjonovs & Zikmanis, 2008). Ieteikta anaeroba fermentācija. *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 kultivējama uz MRS agara. Lai aktivizētu pienskābes baktērijas, tās inokulētas ar sterilu cilpiņu uz atsevišķas Petri plates ar MRS agara barotni un inkubētas 37 ± 1 °C anaerobos apstākļos, izmantojot skābekļa absorbentu (Gas Pak EZ, Vācija) termostatā 24 h. Šī procedūra veikta divas reizes. Uzaugušo koloniju noņemšana un skaitīšana veikta katrai tīrkultūrai atsevišķi. Pēc inkubācijas uzaugušās kolonijas tika noņemtas ar špāteli vai lāpstiņu no Petri plates un ievietotas 20 ml fizioloģiskā šķīdumā. Pienskābes baktēriju skaits suspensijā tika noteikts ar Gorjajeva kameru. Ar sterilu cilpiņu tīrkultūru suspensija tika uznesta uz Gorjajeva kameras sektoriem un fiksēta ar segstikliņa palīdzību. Pienskābes baktēriju šūnas ar mikroskopa palīdzību skaitītas 5 lielos kvadrātos. Šūnu skaits 1 ml aprēķināts pēc formulas (2.4.),

$$x = \frac{a1000}{Shn}, \quad (2.4.)$$

kur

x – šūnu skaits 1 ml suspensijas;

a – vidējais aritmētiskais šūnu skaits 5 lielos kvadrātos;

1000 – pārrēķina koeficients;

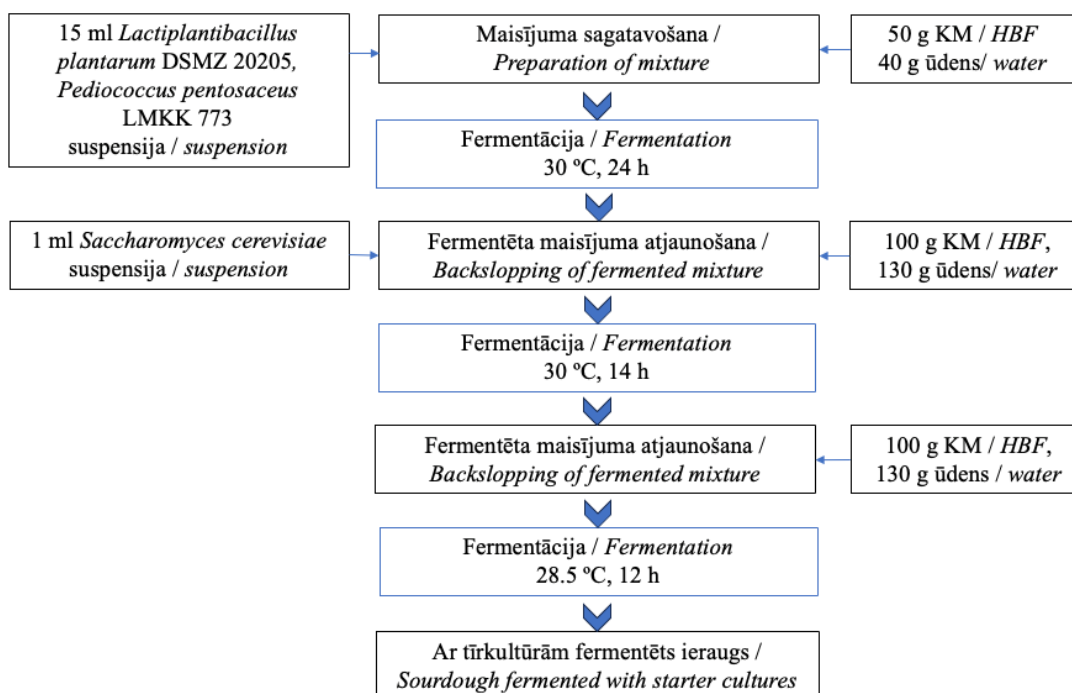
S – kameras laukums mm²;

h – kameras dziļums, mm (0.1 mm);

n – kvadrātu skaits.

Pienskābes baktēriju suspensija gatavota tā, lai KVV skaits 1 ml sasniegtu $10^8 - 10^9$. Maisījuma gatavošanai ņemti 10 ml suspensijas ar *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 un 5 ml ar *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773. Papildus sagatavota komerciālā rauga *Saccharomyces cerevisiae* suspensija, 1 g rauga izšķīdinot 10 ml fizioloģiskā šķīdumā. Ierauga ar tīrkultūrām (KMI-T) gatavošanai piemērota trīs posmu fermentācija (De Vuyst et al., 2017; Siragusa et al., 2009). 15 ml (10 ml suspensijas ar *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 un 5 ml ar *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773) kultivēto pienskābes baktēriju suspensijas pievieno 50 g miltu un 40 ml ūdens maisījumam, un maisījumu fermentē 30 ± 1 °C temperatūrā 24 h (2.2. att.). Pēc 24 h fermentētajam 100 g maisījumam pievieno 1 ml rauga šūnu suspensijas un 100 g kailgraudu miežu miltu un 130 g ūdens un fermentē 14 h. Pēc fermentācijas 100 g

fermentēta maisījuma pievieno 100 g miltu un 130 g ūdens. Pēdējā fermentācija veikta atbilstoši optimālajiem parametriem (2.5.1.nodaļa) 12 h 28.5 ± 1 °C temperatūrā. Fermentācija veikta, apsedzot trauku ar vāku.



2.2. att. Kailgraudu miežu ierauga ar tīrkultūrām fermentācijas shēma /
Fig. 2.2. The scheme of hull-less barley sourdough with starter cultures fermentation

2.7. tabula / Table 2.7

Pētījuma II etapā izmantotās analītiskās metodes /
Analytical methods of the research Stage II

Parauga ($P_{n=15}$) nosakāmais rādītājs fermentācijas 1. – 3. posmā / Parameter of the sample ($P_{n=15}$) in the three step of fermentation	Standarts vai avots / Standard or source
pH	AACC 02-52.01:1992
Pienskābes baktērijas, KVV g^{-1} / <i>Lactic acid bacteria</i> , CFU g^{-1}	ISO 15214:1998
Raugi, KVV g^{-1} / <i>Yeasts</i> , CFU g^{-1}	ISO 21527-1:2008

2.5.3. Mikrobioloģisko rādītāju noteikšanas metodes /
Methods of microbiological analysis

Mikroorganismu KVV g^{-1} noteiktas atbilstoši standartiem ISO 15214:1998 un ISO 21527-1:2008. Barotnes mikroorganismu inkubēšanai sagatavotas atbilstoši ISO 11133-1:2009. Analizējamo paraugu, sākotnējās suspensijas un decimālšķīdumu sagatavošana notiek saskaņā ar ISO 6887-1:2017. Sterilā fizioloģiskā šķīdumā izšķīdina 10 g ierauga un suspendē BagMixer 400W iekārtā (Interscience, Francija). Pienskābes baktēriju inkubēšana veikta, lietojot MRS agara (Biolife, Itālija) barotni, inkubējot Petri plates 48 h 37 ± 1 °C. Raugu inkubēšanai izmantots iesala ekstrakta agars (Biolife, Itālija). Petri plates inkubētas 48 h 25 ± 1 °C temperatūrā. Mikroorganismi inkubēti termostatā Memmert IPP200 (Mettler GmbH, Vācija). Mikroorganismu koloniju skaita noteikšanai izmantots automatiskais koloniju skaitītājs aColyte (Topac Inc., USA). Rezultātu aprēķins veikts atbilstoši ISO 7218. Mikroorganismu

kopējais skaits izteikts kā kolonijas veidojošo vienību skaita decimāllogaritms vienā gramā parauga (\log_{10} KVV g^{-1}).

2.5.4. Paraugu sagatavošana / *Sample preparation*

Paraugi kaltēti liofilizācijas iekārtas FT33 (Armfield Ltd, UK) vakuuma kamerā $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ un 6.4 Pa spiedienā 72 h. Liofilizētie paraugi samalti Foss Knifetec 1095 Mill laboratorijas dzirnavās (FOSS Analytical AB, Zviedrija).

2.5.5. Mikroorganismu identifikācija / *Identification of microorganisms*

Kailgraudu miežu spontānā ierauga (KMI-S) trīs posmu fermentācijā, piemērojot optimālos tehnoloģiskos parametrus (2.5.1. nodaļa), pēc katra (1. – 3.) posma paņemts paraugs (KMI1, KMI2, KMI3) identifikācijai (2.7.tabula). Mikroorganismu identificēti, izmantojot rRNS gēnu un ITS sekvenčēšanu kā aprakstīts Reidzane et al. (2021). Paraugi sagatavoti kā dots 2.5.4. nodaļā.

2.6. Kailgraudu miežu ierauga un mīklas analizēšana / *Analysis of hull-less barley sourdough and dough*

Pētījuma III etapā tika gatavots kailgraudu miežu spontānais ieraugs (KMI-S) atbilstoši II etapā iegūtajiem optimālajiem tehnoloģiskajiem parametriem (2.5.1. nodaļa) un ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs (KMI-T) kā aprakstīts 2.5.2. nodaļā. Uzreiz pēc ierauga fermentācijas veikta ierauga kvalitātes rādītāju noteikšana saskaņā ar 2.8. tabulā aprakstītajām metodēm. Pienskābes baktēriju, raugu \log_{10} KVV g^{-1} noteikts saskaņā ar 2.5.3. nodaļas aprakstu, un pH – kā dots 2.7. tabulā.

2.8. tabula / *Table 2.8*

Pētījuma III etapā izmantotās analītiskās metodes / *Analytical methods of research Stage III*

Ierauga kvalitātes rādītājs / <i>Sourdough quality parameter</i>	Standarts / <i>Standard</i>
Skābums / <i>Titrate acidity</i> , ml NaOH	AACC 02-31.01
Proteāžu aktivitāte / <i>Protease activity</i> , U ml^{-1}	S-AZCAS (Megazyme, Ltd, Īrija)
Kompleksā viskozitāte / <i>Complex viscosity</i> , η , Pa s	(Murniece et al., 2023)
Uzkrājuma modulis / <i>Storage modulus</i> , G' , Pa	
Zudumu modulis / <i>Loss modulus</i> , G'' , Pa	

2.6.1. Proteāžu aktivitātes noteikšana ieraugā / *Determination of protease activity of sourdough*

Proteāžu aktivitātes noteikšana veikta balstoties uz proteāžu noteikšanas metodi (S-AZCAS, Megazyme, Ltd, Īrija) ar azokazeīnu (Azo-casein, Sigma Aldrich) (Loponen et al., 2004), kad 1 ml ierauga bija pievienoti 49 ml Tris-HCl (100 mM) buferšķīduma un samaisīts ar magnētisko maisītāju 15 min. Šķīdums centrifugēts $3000\text{ apgr. min}^{-1}$ 10 min. Rezultāts izteikts spektrofotometrā (Jenwei 6300 Baroworld Scientific Ltd, Lielbritānija) nolāsītās vienībās U ml^{-1} pie 440 nm.

2.6.2. Kailgraudu miežu ierauga reoloģisko īpašību noteikšana / *Determination of rheological properties of sourdough and dough*

Ierauga reoloģisko īpašību noteikšana veikta, izmantojot MCR 302 dinamisko bīdes reometru (Anton Paar, Austrija), kas aprīkots ar 25 mm paralēlām plāksnēm PP25, iestatot attālumu starp tām (1 mm). Ierauga paraugu novieto uz reometra pamata plāksnes un mērījumu veic 30.0 ± 0.1 °C temperatūrā, ko nodrošina Peltjē elements. Mērījumu frekvence no 100 līdz 0.1 rad s^{-1} . Tika fiksēts 21 mērījuma punkts. Uzkrājuma un zudumu moduļi un kompleksā viskozitāte tika aprēķināta, izmantojot RheoCompass 1.25 (Anton Paar, Austrija) programmu. Ieraugu paraugi analizēti divos atkārtojumos.

2.6.3. Kailgraudu miežu ierauga un mīklas mikrostruktūras analīzes metodes / *Microstructure evaluation of hull-less barley sourdough and dough*

Pēc katra (1. – 3.) kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas posma (2.4.1. nodaļa) paraugs (HBS1, HBS2, HBS3) apskatīts mikroskopā Leica DM 3000 LED (Leica Microsystems Ltd., Germany) palielinājumā 10×10 . Parauga daļa paņemta ar inokulācijas cilpiņu, novietota uz priekšmetstikliņa un nosepta ar segstikliņu. Attēli fiksēti ar kameru Leica DFC290 HD (Leica Microsystems Ltd., Germany) un analizēti LAS Core Version 4.3 programmā. Paraugu poru mikroskopiskā izpēte veikta digitālajā mikroskopā Hirox RH-2000 ar objektīvu MXB 2016Z (Hirox, Japan). Vizuālie attēli uzņemti ar iPhone 7 Plus telefona kameru (12 MP).

Mīklas mikrostruktūras izpētei paraugi (NFKM un FKM) tika sagatavoti kā aprakstīts 2.5.4. nodaļā, liofilizētos paraugus nesamaļot. Kailgraudu miežu mīklas mikrostruktūra tika analizēta LBTU VTN, izmantojot Mira3 skenējošo elektronmikroskopu Tescan (Tescan Orsay Holding, a.s., Čehija), kas aprīkots ar sekundāro (Secondary Electron – SE) un atpakaļizkliedēto (Back-scattered Electron – BSE) elektronu detektoriem. Paraugu fiksēšanai lietots divpusējs oglekļa disks. Elektrovadītspējas uzlabošanai paraugi pārklāti ar zelta-palādijs 15 nm biezu slāni, izmantojot Leica EM ACE600 plazmas apputināšanas iekārtu (Leica Microsystems, Vīne, Austrija). Lai veiktu detalizētus mērījumus tika lietots $1000\times$ palielinājums un 5 kV paātrinājuma spriegums.

2.7. Maizes gatavošana un fizikālo īpašību noteikšana / *Bread preparation and determination of the physical properties*

2.7.1. Maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri un receptūra / *Technological parameters and recipe of the bread preparation*

Kailgraudu miežu maize un pilngraudu kviešu maize gatavota ar spontāno kailgraudu miežu ieraugu (KMI-S) un ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu (KMI-T) saskaņā ar 2.9. tabulā doto receptūru. Maizes gatavošanai sagatavots kailgraudu miežu spontānais ieraugs, izmantojot optimālos tehnoloģiskos parametrus (2.5.1. nodaļa) un ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs (2.5.2. nodaļa). Maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri doti 2.10. tabulā. Kailgraudu miežu maizes un pilngraudu kviešu maizes gatavošanai izvēlēts atšķirīgs mīklas mīcīšanas laiks, jo to struktūra veidojas atšķirīgi. Kailgraudu miežu maizei piemērojams īsāks mīcīšanas laiks nekā pilngraudu kviešu maizei (Torbica et al., 2021), tāpēc tā mīcīta līdz tā kļuva viendabīga. Pēc samīcīšanas mīkla sadalīta 400 g gabalos un veidota ar rokām, tad ievietota formās un ievietota raudzēšanas kamerā (Sveba Dahlen AB, Fristadt, Sweden) 30 ± 2 °C temperatūrā 4 h. Cepšana veikta krāsni 190 °C temperatūrā 25 min ar tvaika padevi 3 s. Maize atdzesēta līdz 23 ± 3 °C 18 h maizes ceptuvē uz galda. Pēc atdzesēšanas maizes ķīmisko analīžu veikšanai sagatavoti paraugi kā aprakstīts 2.5.4. nodaļā.

Maizes receptūra, % no miltu masas / Recipe of bread, % of flour weight

Izejviela / Ingredient	Kailgraudu miežu maize / Hull-less barley bread			Pilngraudu kviešu maize / Wholegrain wheat bread		
	KMM-S	KMM-T	KMM-R	PKM-S	PKM-T	PKM-R
KM / HBF	88.0	88.0	100.0	–	–	–
PK / WWF	–	–	–	88.0	88.0	100.0
KMI-S / HBS-S	37.0	–	–	37.0	–	–
KMI-T / HBS-T	–	37.0	–	–	37.0	–
Miežu iesals / Barley malt	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Sāls / Salt	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Cukurs / Sugar	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Presētais raugs / Yeast	–	–	3.0	–	–	3.0
Ūdens / Water	70.0	70.0	70.0	67.0	67.0	67.0

**Maizes gatavošanas tehnoloģiskie parametri /
Technological parameters of bread preparation**

Tehnoloģiskais parametrs / Technological parameter	Kailgraudu miežu maize / Hull-less barley bread		Pilngraudu kviešu maize / Wholegrain wheat bread	
	KMM-S, KMM-T	KMM-R	PKM-S, PKM-T	PKM-R
Mīklas mīcīšanas laiks / Dough mixing time, min	7	7	15	15
Mīklas dalīšanas laiks / Dough dividing time, min	5	5	5	5
Mīklas veidošana / Dough formation	ar rokām, ar slapjo metodi / with wet hands	ar rokām, ar slapjo metodi / with wet hands	ar rokām / with hands	ar rokām / with hands
Mīklas fermentēšanas laiks / Dough fermentation time, h	4	4	4	4
Cepšanas laiks / Baking time, min	25	25	25	25
Atdzesēšana / Cooling, h	18	18	18	18

**2.7.2. Maizes fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes /
Methods for the determination of physico-chemical parameters of bread**

Kailgraudu miežu maizes un pilngraudu kviešu maizes fizikālās īpašības noteiktas saskaņā ar 2.11. tabulā dotajām metodēm. Īpatnējais tilpums izteikts kā maizes tilpuma un masas attiecība ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$). Maizes porainība analizēta ar Žuravļova ierīci (Biomer Ltd, Krievija) atbilstoši Cizeikiene et al. (2020) aprakstītai metodei. Maizes mīkstuma cietība noteikta, izmantojot TA.HD. plus struktūras analizatoru (Stable Microsystems, Lielbritānija). Analizēšanai ņemtas divas mehāniski nogrieztas maizes šķēles (katra 7 mm). Parauga saspišanai izmantotā alumīnija cilindra diametrs bija 25 mm. Maizes šķēles tika spiestas ar

iespiešanas ātrumu 1.7 mm s^{-1} un iespiešanas dziļumu 6 mm. Mērījuma uzsākšanas spēks – 0.049 N. Katrs paraugs analizēts desmit reizes. Datu analīzi veic Texture Exponent 32 programmā nosakot pozitīvo spēku, kas raksturo maizes mīkstuma cietību, un negatīvo spēku, kas raksturo maizes mīkstuma lipīgumu.

2.11. tabula / *Table 2.11*

**Maizes fizikāli-ķīmisko rādītāju noteikšanas metodes IV etapā /
Methods for the determination of physico-chemical parameters of bread in the Stage IV**

Nr. / No.	Nosakāmais rādītājs / Parameter	Metode vai standarts / Method or standard
1.	Tilpums / <i>Volume</i> , cm^3	AACC 10-05.01
2.	Īpatnējais tilpums / <i>Specific volume</i> , $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$	(Reidzane et al., 2023)
3.	Porainība / <i>Porosity</i> , %	(Cizeikiene et al., 2020)
4.	Cietība / <i>Firmness</i> , N	AACC 74-09
5.	Lipīgums / <i>Stickiness</i> , N	AACC 74-09

**2.8. Glutēna satura noteikšana pētījuma V etapā /
Determination of gluten content in the stage V of the research**

Glutēna satura noteikšana veikta kailgraudu miežu miltu, liofilizētos ierauga un kailgraudu miežu maizes paraugos (paraugi sagatavoti kā 2.5.4. nodaļā). Analizēšanai tika izmantots AgraQuant Gluten G12 (ELISA G12) (COKAL0200, Romer Labs Division Holding GmbH, Getzersdorf, Austria) tests. Tā pamatā ir antivielu-antigēna kompleksa veidošanās. Tests veikts atbilstoši pievienotai instrukcijai, koriģējot atbilstoši testa materiālam. Testa veikšanai tika ņemts 0.1 g parauga. Vispirms veic ekstrakta sagatavošanu, tad testēšanu. Lai piemērotu koncentrāciju, kas atbilstu kalibrācijas intervālam, kailgraudu miežu miltu un liofilizēto ieraugu un maizes paraugu ekstrakti tika atšķaidīti (atbilstoši ražotāja rekomendācijām) 10 000 kārtīgi, kā aprakstījusi Xhaferaj et al. (2023). Atšķaidījumu veikšanai izmantotas dažādu krāsu paletes un marķētas mikro mēģenes. 96 lauciņu plates (ar bedrītēm) mazgāšana veikta ierīcē Elx50 (BioTek Instruments Ltd, Lielbritānija). Absorbcijas vērtības noteiktas ar 96 lauciņu plates lasītāju pie 450 nm (iMark™ Microplate Absorbance Reader, Bio-Rad, ASV). Glutēna koncentrācija aprēķināta atbilstoši testu ražotāja ieteikumiem ar Bio-Rad Microplate Manager 6 programmu (Bio-Rad, ASV). Programmā iegūtā testa kalibrēšanas līkne (3. pielikums) atbilst testu sertifikātos dotajai. Rezultāti izteikti ppm (mg kg^{-1}). Testēšana veikta diviem paraugiem un katrs paraugs analizēts trīs atkārtojumos ($n=6$). Veikts iegūto rezultātu pārrēķins atbilstoši parauga mitrumam (AACC 44-15A).

**2.9. Cietes un ne-cietes polisaharīdu noteikšana /
Determination of starch and non-starch polysaccharides**

Lai novērtētu cietes un ne cietes polisaharīdu satura ietekmi uz maizes fizikālajām īpašībām, tika veikta pilngraudu kviešu miltu un kailgraudu miežu maizes un pilngraudu kviešu maizes analizēšana. Paraugu analizēšanas metodes apkopotas 2.3. tabulā. Paraugu sagatavošana analizēm veikta kā dots 2.5.4. nodaļā.

2.10. Statistiskās datu apstrādes metodes / *Statistical methods*

Kailgraudu miežu spontānā ierauga optimālo tehnoloģisko parametru modelēšana un dispersijas analīze (ANOVA) veikta Design-Expert 12 programmā (Statease Inc., Minneapolis,

ASV). Datu apstrādei tika izmantota MS Excel (Versija 16.81) programma. Iegūtajiem rezultātiem tika aprēķināts vidējais aritmētiskais un standartnovirze. Būtiskuma pārbaudei ($p < 0.05$) starp paraugiem izmantots Tukey tests, izmantojot RStudio (R Core Team, 2020). Savstarpējo sakarību noteikšanai starp paraugu ķīmiskajiem un fizikālajiem rādītājiem tika izmantota galveno komponentu analīze. Pētījuma VI etapā iegūto datu analizēšana un vizualizēšana tika veikta, izmantojot atvērtā pirmkoda programmatūru Python 3.8 un tās bibliotēku NumPy (Harris et al., 2020), Pandas (Reback et al., 2022), Statsmodels (Seabold & Perktold, 2010) un Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA / RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Kailgraudu miežu miltu ķīmiskais sastāvs / Chemical composition of hull-less barley flour

Pētījuma sākumā noteikts kailgraudu miežu 'Kornelija' miltu mitruma, olbaltumvielu, cietes un šķiedrvielu saturs.

3.1. tabula / Table 3.1

Kailgraudu miežu 'Kornelija' miltu ķīmiskais sastāvs / Chemical composition of hull-less barley 'Kornelija' flour

Rādītājs / Parameter	Saturs / Content
Mitrums / Moisture, %	12.05 ± 0.42
Olbaltumvielas / Protein, g 100 g ⁻¹	17.79 ± 0.26
Ciete / Starch, g 100 g ⁻¹	51.88 ± 0.22
Šķiedrvielas / Total dietary fibre, g 100 g ⁻¹	18.30 ± 0.22
Rezistentā ciete / Resistant starch, g 100 g ⁻¹	0.88 ± 0.30

Kailgraudu miežu miltos noteikts augsts olbaltumvielu saturs 17.76 ± 0.22 g 100 g⁻¹ (3.1. tabula). Kailgraudu miežu šķirne 'Kornelija' potenciāli spēj nodrošināt augtāku proteīna saturu nekā citas kailgraudu miežu šķirnes, ierindojot to starp augsta olbaltumvielu (>15%) satura šķirnēm (Auziņš et al., 2021). Kailgraudu miežu pētījumā šķirnes 'Kornelija' miltos konstatēts otrs augstākais olbaltumvielu saturs 18.19 g 100 g⁻¹ līdzās šķirnei 'Pihl' (Norvēģija) (Majore et al., 2021). Kailgraudu miežu šķirnes 'Kornelija' miltu augsto olbaltumvielu saturu konstatējuši arī citi pētnieki un noteikuši no 7 dažādām valstīm saņemtu 35 miežu šķirņu starpā 'Kornelija' miltos būtiski augstāku olbaltumvielu saturu 18.3 g 100 g⁻¹ atšķirībā no citiem miežu miltu paraugiem (Xhaferaj et al., 2023). Kailgraudu miežu augstais olbaltumvielu saturs un to augstā hordeīna frakcija potenciāli var dot augstu glutēna saturu. Pētnieki noteikuši būtiskas kailgraudu miežu 'Kornelija' ķīmiskā sastāva atšķirības atkarībā no audzēšanas vietas un no ražas gada (Auziņš et al., 2021; Dabina, 2013). Augstākais proteīna saturs konstatēts 20.84% Ziemeļkurzemes, bet zemākais 12.9% Vidzemes reģionā (2018–2020)⁶. Pētījumā izmantotie graudi saņemti no Vidzemes reģiona (Stende). Cietes saturs kailgraudu miežu miltos noteikts 51.88 ± 0.22 g 100 g⁻¹, un tas nav vērtējams kā ļoti augsts. Majore et al. (2021) pētījums parāda, ka cietes saturs dažādas izcelsmes kailgraudu miežu šķirnēs variē $49.15 - 64.06$ g 100 g⁻¹. 'Kornelija' šķirnes miltos noteikts 0.88 ± 0.30 g 100 g⁻¹ rezistentās cietes, kas nav augsts starp dažādām šķirnēm un neliecina par augstu amilozes saturu cietē. Šķirnes 'Kornelija' miltu analizēšanas rezultāti parāda augstu šķiedrvielu saturu 18.30 ± 0.22 g 100 g⁻¹, kas ir raksturīgs kailgraudu miežu šķirnēm. 'Kornelija' miltos Majore et al. konstatējuši 7 reizes vairāk šķīstošās šķiedrvielas nekā nešķīstošās, tostarp β -glikānus 5.6 ± 0.22 g 100 g⁻¹ (Majore et al., 2021).

3.1. nodaļas kopsavilkums / Summary of Chapter 3.1

Kailgraudu miežu 'Kornelija' miltu ķīmiskais sastāvs liecina, ka tie vērtējami kā bioloģiski pilnvērtīga izejviela ierauga un maizes gatavošanai. Augstais olbaltumvielu un β -glikānu saturs varētu ietekmēt ierauga un mīklas fermentācijas procesu.

⁶Kailgraudu miežu 'Kornelija' ķīmiskais sastāvs atsevišķās audzēšanas vietās [tiešsaiste] [skatīts 05.02.2024.]. Pieejams: <https://kornelija.lv/petijumi/>

The chemical composition of hull-less barley 'Kornelija' indicates that the flour considered a biologically complete raw material for sourdough fermentation and bread making. The high content of proteins and β -glucans could affect the sourdough and dough fermentation.

3.2. Kailgraudu miežu ierauga fermentācijas raksturojums / Characterization of hull-less barley sourdough fermentation

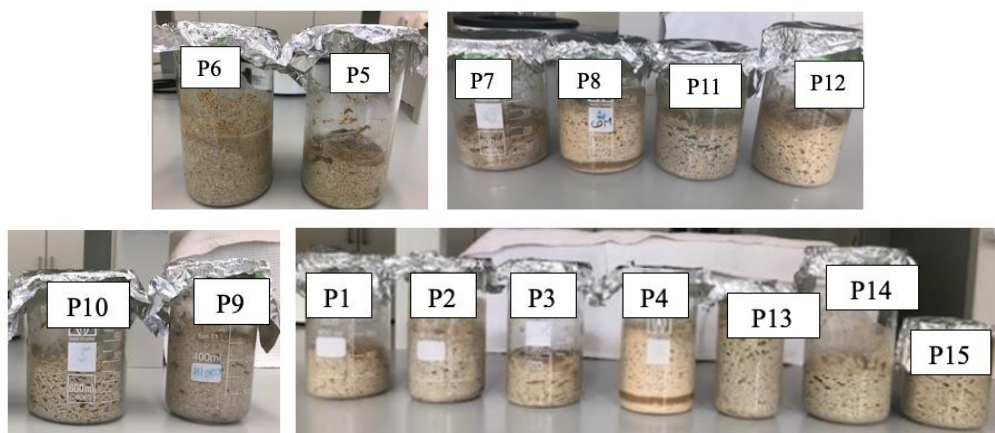
Lai raksturotu kailgraudu miežu ierauga fermentāciju un noteiktu tehnoloģiskos parametrus ierauga fermentācijā, pētīts spontānais ieraugs trīs fermentācijas posmos un ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs.

3.2.1. Mainīgo faktoru ietekme kailgraudu miežu ierauga fermentācijā / Effect of variable factors on the fermentation of hull-less barley sourdough

Optimālo tehnoloģisko parametru noskaidrošanai kailgraudu miežu spontānā ierauga (spontānā ierauga) fermentācijā tika modelēta vienlaicīga mainīgo faktoru ietekme uz pH, PB un raugu skaitu (atbildes). Modelēšana veikta pirmajos trijos spontānā ierauga fermentācijas posmos (2.1. att.), katrā posmā veicot atšķirīgu eksperimentu saskaņā ar eksperimentu plānu un metodes struktūru, kā 2.4. un 2.5. tabulā. Spontānā ierauga fermentācijā pievienotā ūdens daudzuma, temperatūras un laika ietekme uz pH, pienskābes baktēriju un raugu KVV g⁻¹ apkopota 3.2., 3.6., 3.10. tabulās un attēlota 3.2. – 3.9. att. Katrā spontānā ierauga fermentācijas posmā vienlaicīga mainīgo faktoru ietekme uz atbildēm analizēta Design-Expert 12 (DE) programmā, veicot dispersijas analīzi (ANOVA). Katra eksperimenta dispersijas analīzes rezultāti doti 3.3., 3.7. un 3.11. tabulā, kurā parādītas modeļu dispersijas analīzes p-vērtības un determinācijas koeficients R². Lai iegūtu optimālos tehnoloģiskos parametrus DE programmā, katrā spontānā ierauga fermentācijas posmā noteikti kritēriji (2.6. tabula). Optimālo tehnoloģisko parametru modelēšana veikta spontānā ierauga, kas nodrošinātu irdināšanas funkciju, iegūšanai. Kritēriju izvēle balstījās uz pienskābes baktēriju un raugu vairošanās veicināšanu.

Mainīgo faktoru ietekmes modelēšana spontānā ierauga 1. posma fermentācijā

Pirmā posma fermentācijas beigās iegūto 15 paraugu vizuālā apskate liecināja par mainīgo faktoru atšķirīgu ietekmi paraugos (3.1. att.). Vizuālais vērtējums eksperimenta plānā netika iekļauts, taču tas norādīja uz mainīgo faktoru nozīmīgo ietekmi 1. posmā.



3.1. att. 1. posma eksperimenta paraugu attēli /

Fig. 3.1. Visual images of samples in the 1st step of experiment

P1 – P15 – 1. posma eksperimenta paraugi pēc fermentācijas saskaņā ar 2.3. tabulu /
P1 – P15 – Samples after 1st step fermentation according to Table 2.3

Pirmā posma 15 paraugu mainīgo faktoru līmeņi un iegūtie mērījumu rezultāti (atbildes), kas izteikti kā vidējās mērījumu vērtības, parādīti 3.2. tabulā. Paraugam (P7) ar mazāko (100 ml) pievienotā ūdens daudzumu un paraugam (P11) ar vidēju ūdens daudzumu (150 ml), bet zemāko temperatūru (26 °C), novērota tumšāka krāsa un nepatīkams aromāts, savukārt, paraugiem (P8, P4) ar lielāko ūdens daudzumu un augstāko temperatūru (P12, P4) novērota izteikti gaiša krāsa un ass aromāts, salīdzinājumā ar pārējiem paraugiem. Tomēr lielākam pievienotā ūdens daudzumam 1. posmā nebija izšķiroša nozīme, jo paraugā P6 (3.1. att.) pievienotais ūdens nedeva tādu efektu, kā paraugā P8. Izteikti nepatīkams aromāts un tumša krāsa novērota paraugiem P9, P11, kurus fermentēja zemākajā temperatūrā. Nepatīkamo aromātu un tumšo krāsu varētu skaidrot ar miltu raksturīgās nevēlamās mikrobiotas dominēšanu un labvēlīgiem parametriem tās attīstībai, neļaujot vairoties pienskābes baktērijām un raugiem. Šajā posmā iespējama miltu nevēlamās mikrobiotas, piemēram, *Bacillus* ģints sugu ietekme, izdalot sārmainus galaproduktus. Neatbilstošu parametru izvēle 1. posmā varētu kavēt aktīva ierauga rādītāju sasniegšanu vai varētu būt kritiska turpmāko posmu fermentācijā, ar atjaunojamo daļu pārnesot nevēlamus mikroorganismus, piemēram, nevēlamās mikroskopiskās sēnes un sporas veidojošās baktērijas. Rezultātā novērota nozīmīga trīs mainīgo faktoru vienlaicīga ietekme mikrobiotas sukcesijā. Ūdens un miltu maisījums 1. posma beigās visos paraugos uzrādīja neatīstīta ierauga pazīmes: nepietiekams PB un raugu KVV g⁻¹ skaits (3.2. tabula), ieraugiem neraksturīgs blakus aromāts.

3.2. tabula / Table 3.2

**Ekspérimenta plāns un atbildes 1. posmā /
Experimental design and responses of the 1st step**

1. posms / 1st step						
Paraugi / Sample	Mainīgie faktori / Variable factors			Atbildes ¹ / Responses ¹		
	X ₁	X ₂	X ₃	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
	Ūdens / Water, ml	Temperatūra / Temperature, °C	Laiks / Time, h		log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹	log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹
P1	100	26	24	5.84	5.50	5.89
P2	200	26	24	5.72	5.29	5.34
P3	100	30	24	5.86	5.27	5.74
P4	200	30	24	4.62	5.02	5.04
P5	100	28	20	5.82	4.93	5.80
P6	200	28	20	5.72	5.58	5.86
P7	100	28	28	5.83	5.48	4.70
P8	200	28	28	4.68	4.69	5.33
P9	150	26	20	5.77	6.50	5.58
P10	150	30	20	5.72	5.48	5.95
P11	150	26	28	5.50	5.45	5.45
P12	150	30	28	5.03	5.39	5.39
P13	150	28	24	5.70	4.97	5.41
P14	150	28	24	5.75	4.86	5.54
P15	150	28	24	5.70	5.01	5.42

¹Atbildes izteiktas kā log₁₀ KVV g⁻¹ vidējais aritmētiskais PB un raugu (n=4) mērījumiem; vidējais aritmētiskais pH mērījumiem (n=3); izceltas augstākās un zemākās vērtības / Responses expressed as log₁₀ CFU g⁻¹ arithmetic mean for LAB and yeasts (n=4), arithmetic mean for pH (n=3), the highest and the lowest values are highlighted

Eksperimentā iegūtās pH, PB un raugu atbildes tika ievadītas Design-Expert 12 programmā un veikta eksperimenta atbilžu modeļu dispersijas analīze (3.3. tabula).

3.3. tabula / Table 3.3

1. posma modeļu dispersijas analīze / Analysis of variance of the 1st step models

Atbildes / Responses	Modelis / Model	p-vērtība / p-value	R ²
pH	Kvadrātiskais / Quadratic	0.0007	0.9826
PB / LAB	Kvadrātiskais / Quadratic	0.0119	0.9441
Raugi / Yeasts	Lineārais / Linear	0.0143	0.6028

Pirmā posma eksperimenta atbilžu modeļus izskaidro vienādojumi. Mainīgo faktoru vienlaicīgu ietekmi uz pH atbildēm izskaidro 3.1. vienādojums un ietekmi uz pienskābes baktēriju atbildēm – 3.2. vienādojums. Mainīgo faktoru vienlaicīgu ietekmi uz raugu atbildēm skaidrošanai piemērots lineārais modelis, kuru apraksta 3.3. vienādojums.

$$pH = 5.72 - 0.33X_1 - 0.20X_2 - 0.25X_3 - 0.28X_1X_2 - 0.26X_2X_3 - 0.11X_1X_3 - 0.10X_1^2 - 0.11X_2^2 - 0.11X_3^2 \quad (3.1.)$$

$$PB = 4.95 - 0.08X_1 - 0.20X_2 - 0.19X_3 - 0.01X_1X_2 - 0.36X_2X_3 + 0.24X_1X_3 - 0.11X_1^2 + 0.43X_2^2 + 0.33X_3^2 \quad (3.2.)$$

$$Raugi = 5.37 - 0.11X_1 + 0.03X_2 - 0.38X_3 \quad (3.3.)$$

Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes p-vērtības dotas 3.4. tabulā. pH modeļa dispersijas analīze uzrādīja pievienotā ūdens (X₁), temperatūras (X₂) un laika (X₃) būtisku (p<0.05) ietekmi, kā arī ūdens un temperatūras (X₁X₂) un ūdens un laika (X₁X₃) ietekmi uz pH.

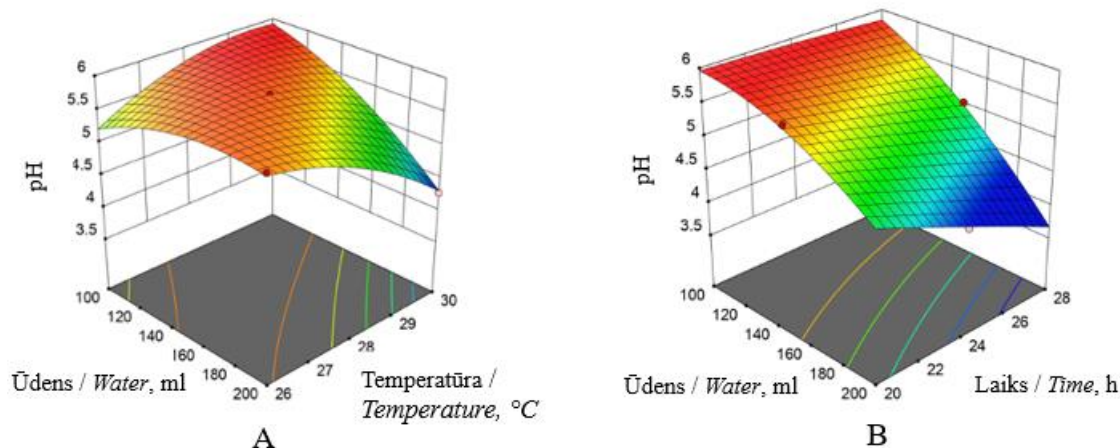
3.4. tabula / Table 3.4

Mainīgo faktoru ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 1. posmā / p-values of variable factors effect on pH, LAB and yeasts in the 1st step

l.p.Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²
pH	0.0002	0.0017	0.0006	0.0018	0.0023	0.0720	0.0850	0.0699	0.0746
PB / LAB	0.2708	0.0225	0.0283	0.9117	0.0085	0.0380	0.2888	0.0048	0.0141
Raugi / Yeasts	0.2661	0.7994	0.0025	–	–	–	–	–	–

l.p.Y – 1.posma atbildes / responses of 1st step; X₁ – ūdens; X₂ – temperatūra; X₃ – laiks; rezultāti – pH, PB log₁₀ KVV g⁻¹, raugu log₁₀ KVV g⁻¹ fermentācijas 1. posmā; izceltās vērtības uzrāda būtisku (p<0.05) ietekmi / X₁ – water; X₂ – temperature; X₃ – time; results of the 1st step fermentation: pH, LAB log₁₀ CFU g⁻¹, yeasts log₁₀ CFU g⁻¹; highlighted values show a significant (p<0.05) effect.

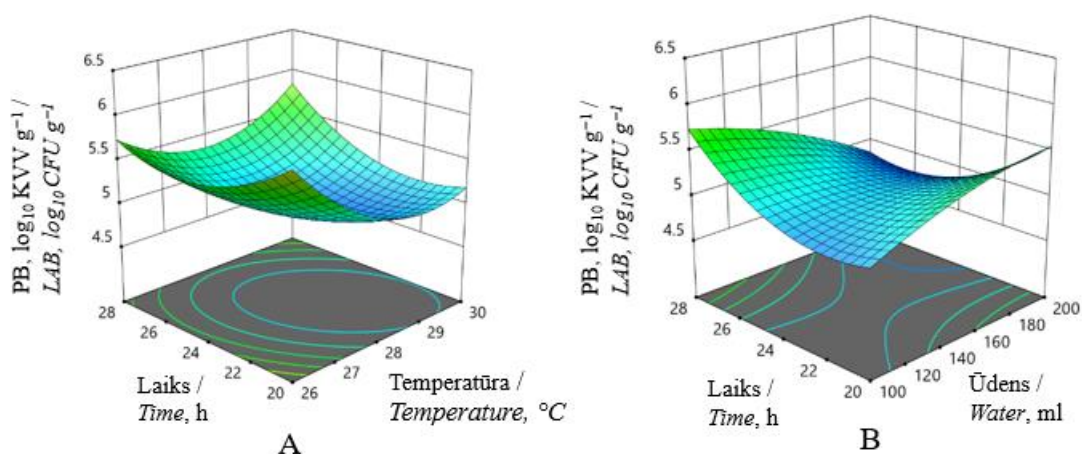
Palielinoties ūdens daudzumam un paaugstinoties temperatūrai, pH vērtības samazinājās straujāk nekā, fermentējot ar mazāku pievienotā ūdens daudzumu (100 ml) un zemākā temperatūrā (26 °C) (3.2.A att.). 1. posmā zemākais pH novērots, ja pievienots maksimālais ūdens daudzums – 200 ml un fermentācija notikusi maksimālajā temperatūrā – 30 °C (3.2.A att.) un maksimālajā fermentācijas laikā 28 h. Savukārt, augstākais pH novērots, pievienojot mazāku ūdens daudzumu (100 ml) 20 h fermentācijā (3.2.B att.).



3.2. att. **Mainīgo faktoru vienlaicīga ietekme uz ierauga pH 1. posma fermentācijā /**
Fig. 3.2. The The effect of variable factors on pH of sourdough in the 1st step of
fermentation

A – ūdens un temperatūras ietekme uz pH / *effect of water and temperature on pH*; B – ūdens un laika ietekme uz pH / *effect of water and time on pH*

PB kvadrātiskais modelis parāda laika un temperatūras (3.3.A att.) un laika un pievienotā ūdens (3.3.B att.) būtisku ($p < 0.05$) ietekmi. Augsts PB skaits novērots – 28 h un 26 °C, kā arī 20 h un 26 °C fermentācijā. Šādi rezultāti liecina, ka 1. posma fermentācijas laikā vairojas augstākām temperatūrām piemērojušās PB un zemākām temperatūrām piemērojušās PB vai arī ir piemērojušās visam eksperimenta temperatūras diapazonam 26 – 30 °C un nav izteikta vienas sugas dominēšana. Pirmā posma fermentācija vērtējama kā PB adaptācijas posms konkrētajai barības videi, tāpēc, piedāvājot piemērotākos apstākļus, varētu saīsināt adaptācijas laiku un novērst nevēlamu spontāno procesu sākšanos. Maksimālais PB \log_{10} KVV g^{-1} skaits sasniegts 28 h fermentācijā ar pievienotā ūdens daudzumu 100 ml, kā arī 20 h fermentācijā ar 200 ml ūdens (3.3.B att.).

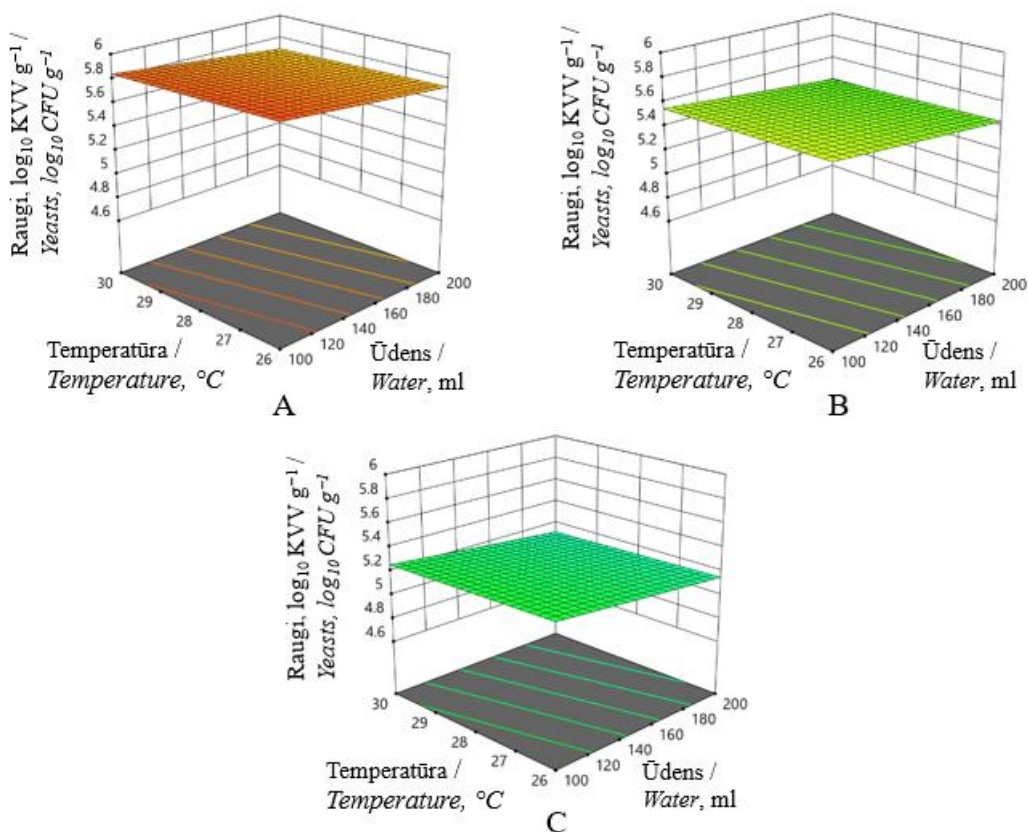


3.3. att. **Mainīgo faktoru ietekme uz PB \log_{10} KVV g^{-1} 1. posma fermentācijā /**
Fig. 3.3. The effect of variable factors on LAB \log_{10} CFU g^{-1} in the 1st step of fermentation

A – laika un temperatūras ietekme uz pienskābes baktēriju \log_{10} KVV g^{-1} / *effect of time and temperature on LAB \log_{10} CFU g^{-1}* ; B – laika un ūdens daudzuma ietekme uz pienskābes baktēriju \log_{10} KVV g^{-1} / *the effect of time and water amount on LAB \log_{10} CFU g^{-1}*

Mainīgo faktoru vienlaicīgu ietekmi uz raugiem skaidro Design-Expert 12 programmā iegūtais lineārais modelis. Laika (X_3) ietekmi attēlo būtiska ($p < 0.05$) lineāra sakarība. Programmā iegūti temperatūras un ūdens vienlaicīgas ietekmes sakarības 20, 24 un 28 h

fermentācijā (3.4.A – C att.). 28 h fermentācijā un 26 °C temperatūrā, pievienojot 100 ml ūdens, ir uzrādīts zemākais raugu KVV g^{-1} rādītājs (3.4.C att.). PB un raugu atbildes parāda nozīmīgo ūdens daudzuma ietekmi uz šo mikroorganismu vairošanos. Ilgstošā ierauga fermentācijā raugu vairošanās samazinās, taču tas atkarīgs no pārstāvētās rauga sugas un vides pH. Zinātnieki norāda, ka arī bieža ieraugu atjaunošana var kavēt raugu vairošanos (De Vuyst et al., 2017). Lineārās sakarības parāda, ka raugi 1. posmā piemērojušies plašām temperatūras un pievienotā ūdens daudzuma variācijām. Aktīvākā raugu vairošanās vērojama ieraugā ar mazāku pievienotā ūdens daudzumu. Ja miltos pieejamie cukuri tiek patērēti, tad vairs nevar notikt strauja raugu vairošanās barības vielu trūkuma dēļ. Raugu vairošanos nozīmīgi ietekmē barības vielu pieejamība.



3.4. att. Temperatūras un ūdens daudzuma ietekme uz raugu \log_{10} KVV g^{-1} 1. posmā atkarībā no ierauga fermentācijas laika / Fig. 3.4. The effect of temperature and water amount on yeasts \log_{10} CFU g^{-1} in the 1st step fermentation of sourdough (A – 20 h, B – 24 h, C – 28 h)

Ierauga 1. posma fermentācijā pH lēnā pazemināšanās skaidrojama ar zemo pienskābes baktēriju metabolismu. 1. posma eksperimenta atbildes parāda, ka rauga maksimālais KVV skaits sasniegts 30 °C. Šāda temperatūra ir labvēlīga CO_2 izdalīšanai, bet lai raugu šūnas vairotos vislabvēlīgākā temperatūra ir 20 – 27 °C (De Vuyst et al., 2017; Kunkulberga & Segliš, 2010). Kailgraudu miežu augstais β -glikānu saturs varētu kavēt cietes sašķelšanos, veidojot viskozu šķīdumu. Augstāka temperatūra veicina vielu hidrolīzi, un raugu vairošanās norit intensīvāk vieglāk pieejamo barības vielu dēļ. Augstākā temperatūrā aktīvāk norisinās ķīmiskie procesi, kas veicina cietes hidrolīzi. Optimālo tehnoloģisko parametru noteikšanai 1. posmā kritērijs tika noteikts maksimālais raugu KVV un pienskābes baktēriju KVV skaits tika noteikts kā otrās nozīmības kritērijs (iestatījums programmā). Rauga metabolismā izdalītajam etanolam varētu būt nozīme nevēlamo mikroorganismu nomākšanā, taču vienlaikus nepieciešami labvēlīgi apstākļi, lai vairotos PB. No iegūtajām sakarībām DE programmā pēc definētiem kritērijiem (2.6. tabula) tika iegūti optimālie tehnoloģiskie parametri. Kailgraudu

miežu ierauga 1. posma fermentācijā iegūti šādi optimālie tehnoloģiskie parametri: pievienotā ūdens daudzums – 113 ml, temperatūra – 30 °C, fermentācijas laiks – 24 h. Optimālie parametri izmantoti atjaunojamās daļas iegūšanai 2. posma fermentācijai. Iegūtās eksperimentālās vērtības atspoguļo 2. posma fermentācijai paredzētās atjaunojamās daļas raksturojošos rādītājus (3.5. tabula).

3.5. tabula / Table 3.5

**Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 1. posmā /
Optimal technological parameters and results in the 1st step**

Mainīgie faktori / Variable factors	Optimālie tehnoloģiskie parametri 1. posmā / Optimal technological parameters for the 1st step		
Ūdens / Water, ml	113		
Temperatūra / Temperature, °C	30		
Laiks / Time, h	24		
1. posma rezultāti / Results of the 1st step			
Ieraugu raksturojošie rādītāji/ Parameters of sourdough	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
		$\log_{10} \text{KVV g}^{-1} / \log_{10} \text{CFU g}^{-1}$	
Modelētās vērtības / Modelled values	5.7	5.3	5.5
Eksperimentālās vērtības / Experimental values	5.4 ± 0.04	5.8 ± 0.50	6.7 ± 0.47

Zinātniskajā literatūrā plašāki pētījumi atrodami par rudzu spontānā ierauga 1. posma fermentāciju. Pirmā posmā fermentācijas laiks var būt 18, 24 un 48 stundas atšķirīgā temperatūras režīmā (Spicher & Stephan, 1993), ja miltu un ūdens proporcija 1:1. Ņemot vērā trīs mainīgo faktoru vienlaicīgu ietekmi, autores pētījumā iegūts fermentācijas laiks – 24 h. Tiek atzīts, ka šo posmu raksturo dabiskas daudzveidīgās miltu mikrobiotas attīstība un zems pienskābes baktēriju metabolisms (Huys et al., 2013). Zinātnieku grupas Çakır et al. (2020) pētījumā kailgraudu miežu miltu un ūdens maisījuma (proporcijā 1:1) 28 °C temperatūrā 24 h fermentācijā pH bija samazinājies līdz 4.59. Harth et al. (2016) pētījumā miežu miltu un ūdens (proporcijā 1:1) 24 h fermentācijā 17 – 22 °C temperatūrā straujas pH izmaiņas netika novērotas un konstatēts zems (10^5) PB KVV skaits. Līdzīgi secinājumi tika iegūti šajā pētījumā par PB vairošanos zemā (26 °C) temperatūrā.

Mainīgo faktoru ietekmes modelēšana spontānā ierauga 2. posma fermentācijā

Otrā posma fermentācijas beigās krasas vizuālās atšķirības starp paraugiem netika novērotas, kas liecina par nevēlamās mikrobiotas samazināšanos un par vājāku mainīgo faktoru ietekmi. Pirmā posma fermentācijā iegūtā atjaunojamā daļa, kurai tika pievienota jauna ūdens un miltu porcija, veicinājusi vēlamās mikrobiotas attīstību 2. posmā. Ierauga 2. posma fermentācijas pH, PB un raugu atbildes dotas 3.6. tabulā. Augstākais pH novērots paraugā P5 8 h fermentācijā ar pievienotā ūdens daudzumu 100 ml. Zemākais pH konstatēts paraugā P4 ar maksimālo ūdens daudzumu 200 ml, 32 °C temperatūrā un maksimālajā 24 h fermentācijas laikā. Augstāks PB $\log_{10} \text{KVV g}^{-1}$ skaits paraugos P1 (5.98) un P9 (5.96) sasniegts ar atšķirīgiem parametriem, turklāt šajos paraugos novērots augstākais raugu $\log_{10} \text{KVV g}^{-1}$. Mainīgo faktoru ietekmi pH atbildēm atspoguļo kvadrātiskais modelis, kuru izsaka 3.4. vienādojums. PB atbildēm DE programmā iegūts divfaktoru modelis (3.5.), taču raugu atbildēm – lineārais modelis (3.6.).

$$pH = 4.47 - 0.27X_1 - 0.02X_2 - 0.32X_3 - 0.03X_1X_2 + 0.25X_2X_3 + 0.10X_1X_3 + 0.11X_1^2 + 0.10X_2^2 + 0.32X_3^2 \quad (3.4.)$$

$$PB = 5.45 + 0.10X_1 + 0.13X_2 - 0.08X_3 + 0.04X_1X_2 + 0.19X_2X_3 + 0.08X_1X_3 \quad (3.5.)$$

$$Raugi = 5.00 - 0.32X_1 - 0.20X_2 - 0.78X_3 \quad (3.6.)$$

3.6. tabula / Table 3.6

**Ekspierimenta plāns un atbildes 2. posmā /
Experimental design and responses of the 2nd step**

2. posms / 2nd step						
Paraugs / Sample	Mainīgie faktori / Variable factors			Atbildes ¹ / Responses ¹		
	X ₁	X ₂	X ₃	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
	Ūdens / Water, ml	Temperatūra / Temperature, °C	Laiks / Time, h		log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹	log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹
P1	100	29	16	5.02	5.98	6.26
P2	200	29	16	4.44	5.48	4.27
P3	100	35	16	4.97	5.79	4.57
P4	200	35	16	4.29	5.55	4.35
P5	100	32	8	5.71	5.78	6.11
P6	200	32	8	4.76	4.60	5.62
P7	100	32	24	4.55	5.58	4.53
P8	200	32	24	4.61	5.93	4.71
P9	150	29	8	5.28	5.96	6.35
P10	150	35	8	5.11	5.39	6.21
P11	150	29	24	4.48	5.49	4.34
P12	150	35	24	4.70	5.84	4.50
P13	150	32	16	4.43	5.32	4.41
P14	150	32	16	4.42	5.29	4.30
P15	150	32	16	4.57	5.46	4.40

¹Atbildes izteiktas kā log₁₀ KVV g⁻¹ vidējais aritmētiskais PB un raugu (n=4) mērījumiem; vidējais aritmētiskais pH mērījumiem (n=3); izceltas augstākās un zemākās vērtības / Responses expressed as log₁₀ CFU g⁻¹ arithmetic mean for LAB and yeasts, arithmetic mean for pH (n=3), the highest and lowest values are highlighted

Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes modeļu dispersijas analīze pH, PB un raugu atbildēm veikta DE programmā un atspoguļota 3.7. tabulā.

3.7. tabula / Table 3.7

2. posma modeļu dispersijas analīze / Analysis of variance of the 2nd step models

Atbildes / Responses	Modelis / Model	p-vērtība / p-value	R ²
pH	Kvadrātiskais / Quadratic	0.0009	0.9812
PB / LAB	Divfaktoru / Two factors	0.0445	0.7376
Raugi / Yeasts	Lineārais / Linear	0.0141	0.6039

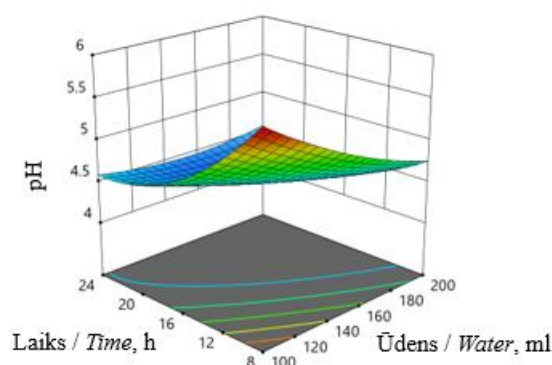
Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes p-vērtības dotas 3.8. tabulā. pH atbildes būtiski ietekmēja pievienotā ūdens daudzums (X₁), laiks (X₃), ūdens un laika (X₁ X₃) vienlaicīga ietekme. Ūdens un laika faktori (X₁ X₃) būtiski ietekmēja PB skaitu, bet raugu skaitu būtiski ietekmēja laika faktors (X₃).

**Mainīgo faktoru ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 2. posmā /
p-values of the variable factors on pH, LAB and yeasts of the 2nd step**

2.p.Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²
pH	0.0004	0.5801	0.0002	0.6013	0.0025	0.0818	0.0636	0.0953	0.0010
PB / LAB	0.6672	0.2348	0.3794	0.6056	0.0131	0.0902	–	–	–
Raugi / Yeasts	0.1612	0.3647	0.0035	–	–	–	–	–	–

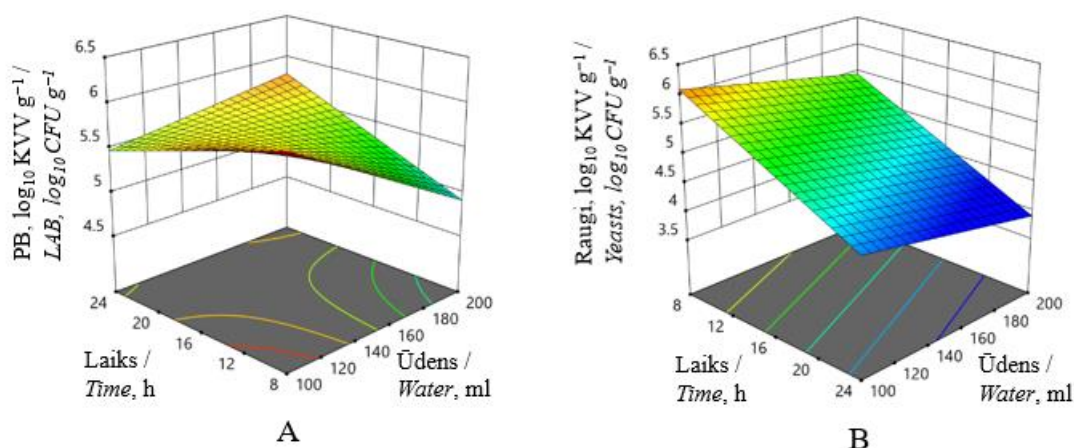
2.p.Y–2.posma atbildes / responses of 2nd step; X₁ – ūdens; X₂ – temperatūra; X₃ – laiks; rezultāti – pH, PB log₁₀ KVV g⁻¹, raugu log₁₀ KVV g⁻¹ fermentācijas 1.posmā; izceltās vērtības uzrāda būtisku (p<0.05) ietekmi / X₁ – water; X₂ – temperature; X₃ – time; results of 1st step fermentation: pH, LAB log₁₀ CFU g⁻¹, yeasts log₁₀ CFU g⁻¹; highlighted values show a significant (p<0.05) effect

pH atbildēm 3.5. attēlā dota ūdens un laika būtiska (p<0.05) savstarpēja ietekme, no kuras var secināt, ka ilgākā laikā un ar lielāko pievienotā ūdens daudzumu pH uzrāda zemākās vērtības.



3.5. att. Laika un ūdens ietekme uz ierauga pH 2. posmā /
Fig. 3.5. The effect of time and water on pH of sourdough in the 2nd step

Otrā posma fermentācijā divfaktoru modelis norāda uz būtisku (p<0.05) laika un ūdens ietekmi uz PB līdzīgi kā 1. posmā. PB maksimālais rezultāts 2. posmā novērots 8 – 16 h laika periodā un arī maksimālajā 24 h fermentācijā ar 200 ml ūdens (3.6. att.).



3.6. att. Laika un ūdens ietekme uz PB (A) un raugu (B) log₁₀ KVV g⁻¹ 2. posma fermentācijā / Fig. 3.6. The effect of time and water on LAB (A) and yeasts (B) log₁₀ CFU g⁻¹ in the 2nd step of fermentation

PB sākotnēji nepieciešams pielāgošanās periods (lag fāze), kurā baktēriju vairošanās vēl nenotiek (Bertrand, 2019). Lag fāzes laikā notiek arī šūnu rehidratācija. Lag fāzes ilgums atkarīgs no pH, temperatūras un barības vides, kā arī no baktērijas šūnas gatavības vairošanās procesam, kas intensīvi notiek eksponenciālajā fāzē. Jo augstāks ievadīto šūnu skaits, jo lag fāze ir īsāka. Zemākais PB skaits īsākajā laikā ar maksimālo pievienoto ūdens daudzumu (3.6.A att.) skaidrojams ar PB adaptācijas periodu. Otrā posma fermentācijā novērota laika faktora būtiska ($p < 0.05$) ietekme arī uz raugu vairošanos. Lineārais modelis parādīja, ka raugu maksimālais rezultāts sasniedzams ar mazāko ūdens daudzumu (100 ml) īsākajā fermentācijas laikā (8 h) (3.6.B att.). Līdzīgi ūdens faktors ietekmēja raugu rezultātu 1. posma eksperimentā.

Otrā posma fermentācijā straujākai pH pazemināšanai un raugu saglabāšanai izvirzīts kritērijs maksimālais PB un raugu skaits. Otrā posma eksperimenta atbildes ievadītas DE lietotnē un atzīmēti kritēriji (maksimālais PB un raugu skaits). 2. posmā fermentācijā iegūti optimālie tehnoloģiskie parametri: pievienotā ūdens daudzums – 137 ml, temperatūra – 31 °C, laiks – 14 h. Iegūtie optimālie parametri pārbaudīti eksperimentāli, iegūstot augstāku PB un raugu \log_{10} KVV g^{-1} skaitu, un tie raksturo atjaunojamo daļu, kas paredzēta 3. posma fermentācijai (3.9. tabula). Spontānajā fermentācijā ir nozīmīga apkārtējās vides mikrobiotas ietekme, tāpēc eksperimentāli iegūtie rezultāti var atšķirties no modelētajiem.

3.9. tabula / Table 3.9

**Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 2. posmā /
Optimal technological parameters and results in the 2nd step**

Mainīgie faktori / Variable factors	Optimālie tehnoloģiskie parametri / Optimal technological parameters		
Ūdens / Water, ml	137		
Temperatūra / Temperature, °C	31		
Laiks / Time, h	14		
2. posma rezultāti / Results of the 2nd step			
Ieraugu raksturojošie rādītāji/ Parameters of sourdough	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
		\log_{10} KVV g^{-1} / \log_{10} CFU g^{-1}	
Modelētās vērtības / Modelled values	4.7	5.6	5.3
Eksperimentālās vērtības / Experimental values	4.6 ± 0.05	6.0 ± 0.44	6.8 ± 0.04

Mainīgo faktoru ietekmes modelēšana spontānā ierauga 3. posma fermentācijā

Trešā posma atbildes parādītas 3.10. tabulā. Zemākais pH konstatēts paraugā P8, kuram pievienots lielākais ūdens daudzums (200 ml) un kurš fermentēts ilgākajā laikā (20 h). Augstākie PB un raugu rezultāti novēroti vidējo mainīgo faktoru vidējo (150 ml, 29 °C, 14 h) fermentācijā paraugos P15 un P13. Vienādā temperatūrā un fermentācijas laikā vājākā PB vairošanās novērota paraugā ar mazāku pievienoto ūdeni (P7), kas parāda ūdens nozīmi PB augšanai. Trešā posma atbilžu modeļus izsaka 3.7. – 3.9. vienādojumi.

$$pH = 4.12 - 0.07X_1 - 0.02X_2 - 0.04X_3 \quad (3.7.)$$

$$PB = 7.21 + 0.05X_1 - 0.01X_2 - 0.13X_3 + 0.01X_1X_2 + 0.05X_2X_3 + 0.01X_1X_3 - 0.15X_1^2 - 0.14X_2^2 - 0.10X_3^2 \quad (3.8.)$$

$$Raugi = 7.24 - 0.07X_1 - 0.36X_2 - 0.03X_3 + 0.45X_1X_2 - 0.26X_2X_3 - 0.07X_1X_3 - 0.17X_1^2 - 0.43X_2^2 - 1.05X_3^2 \quad (3.9.)$$

**Ekspierimenta plāns un atbildes 3. posmā /
Experimental design and responses of the 3rd step**

3. posms / 3rd step						
Paraugs / Sample	Mainīgie faktori / Variable factors			Atbildes ¹ / Responses ¹		
	X ₁	X ₂	X ₃	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
	Ūdens / Water, ml	Temperatūra / Temperature, °C	Laiks / Time, h		log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹	log ₁₀ KVV g ⁻¹ / log ₁₀ CFU g ⁻¹
P1	100	26	14	4.27	6.98	7.05
P2	200	26	14	4.13	7.03	6.45
P3	100	32	14	4.24	6.83	5.92
P4	200	32	14	4.06	6.88	7.13
P5	100	29	8	4.22	7.14	6.17
P6	200	29	8	4.09	7.20	6.11
P7	100	29	20	4.01	6.64	6.43
P8	200	29	20	3.87	6.90	5.35
P9	150	26	8	4.15	7.01	6.22
P10	150	32	8	4.08	7.08	5.15
P11	150	26	20	4.17	6.85	6.50
P12	150	32	20	4.15	6.97	5.16
P13	150	29	14	4.25	7.13	7.92
P14	150	29	14	4.13	7.23	7.15
P15	150	29	14	4.04	7.28	6.65

¹Atbildes izteiktas kā log₁₀ KVV g⁻¹ vidējais aritmētiskais PB un raugu (n=4) mērījumiem; vidējais aritmētiskais pH mērījumiem (n=3); izceltas augstākās un zemākās vērtības / Responses expressed as log₁₀ CFU g⁻¹ arithmetic mean for LAB and yeasts, arithmetic mean for pH (n=3), the highest and lowest values are highlighted

Trešā posma eksperimenta modeļi neuzrādīja būtisku mainīgo faktoru ietekmi uz pH, PB un raugu atbildēm (3.11. tabula). Tas norāda uz pienskābes baktēriju un raugu stabilu attīstību 3. posmā, un eksperimentu plāna mainīgo faktoru līmeņi to būtiski neietekmēja.

3. posma modeļu dispersijas analīze / Analysis of variance of the 3rd step models

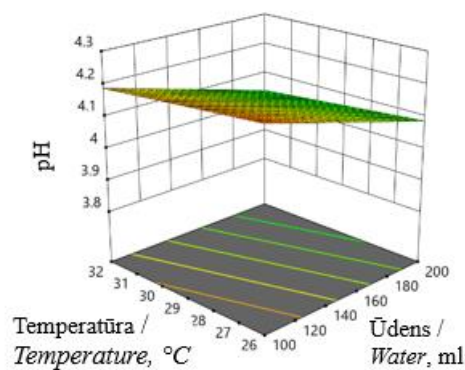
Rezultāts / Results	Modelis / Model	p-vērtība / p-value	R ²
pH	Lineārs / Linear	0.1163	0.4026
PB / LAB	Kvadrātisks / Quadratic	0.1908	0.8029
Raugi / Yeasts	Kvadrātisks / Quadratic	0.2109	0.7925

Trešā posma fermentācijā mainīgo faktoru vienlaicīgu ietekmi uz pH apraksta lineārs modelis pretēji 1. un 2. posmā novērotajam kvadrātiskajam modelim. Lineārā modeļa sakarības parāda būtisku pievienotā ūdens ietekmi. 3. posmā vienlaicīgi palielinoties pievienotā ūdens daudzumam un paaugstinoties temperatūrai, pH pazeminās (3.7. att.).

**Mainīgo faktoru vienlaicīgas ietekmes uz pH, PB un raugiem p-vērtības 3. posmā /
p-values of the variable factors on pH, LAB and yeasts of the 3rd step**

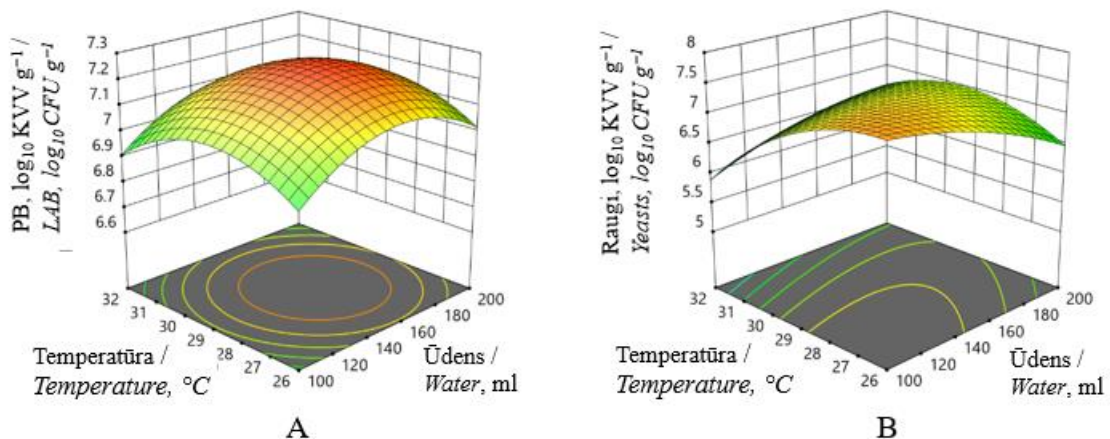
3.p.Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²
pH	0.0441	0.4796	0.2170	–	–	–	–	–	–
PB / LAB	0.3008	0.7747	0.0323	1.0000	0.4724	0.8536	0.0821	0.0946	0.2037
Raugi / Yeasts	0.7649	0.1490	0.9053	0.1876	0.4292	0.8290	0.6004	0.2224	0.0191

3.p.Y – 3. posma rezultāti / results of 3rd step; X₁ – ūdens; X₂ – temperatūra; X₃ – laiks; rezultāti – pH, PB log₁₀ KVV g⁻¹, raugu log₁₀ KVV g⁻¹ fermentācijas 1. posmā; izceltās vērtības uzrāda būtisku (p<0.05) ietekmi / X₁ – water; X₂ – temperature; X₃ – time; results of 1st step fermentation: pH, LAB log₁₀ CFU g⁻¹, yeasts log₁₀ CFU g⁻¹; highlighted values show a significant (p<0.05) effect



3.7.att. **Temperatūras un ūdens ietekme uz pH 3. posma fermentācijā /**
Fig.3.7. *The effect of temperature and water on pH in 3rd step of the fermentation*

Līdzīgām sakarībām vajadzētu atspoguļoties PB atbildēs, jo PB aktivitāte saistāma ar pH pazemināšanos, taču mainīgie faktori atšķirīgi ietekmē PB atbildes, kuru maksimālās vērtības novērojamas faktoru (X₁, X₂) vidējos līmeņos (3.8. att.).



3.8. att. **Temperatūras un ūdens ietekme uz PB (A) un raugu (B) atbildēm 3. posma fermentācijā /** Fig. 3.8. *The effect of temperature and water on LAB (A) and yeasts (B) responses in 3rd step of fermentation*

Pretēji 1. posmā PB un raugu maksimālās vērtības novērotas zemākajā un augstākajā temperatūras un ūdens līmenī. Mazāks pievienotā ūdens daudzums varētu veicināt barības vielu

pieejamību raugiem. Taču zemākās temperatūrās, veidojoties β -glikānu viskozajai šķidrājai fāzei un uzbriestot cietei, barības vielu pieejamība varētu arī samazināties.

DE programmā 3. posma fermentācijā iegūti šādi optimālie tehnoloģiskie parametri: pievienotā ūdens daudzums – 153 ml, temperatūra – 28.5 °C, laiks – 12 h (3.13. tabula). Optimālie temperatūras un laika parametri sakrīt ar literatūrā aprakstītajiem miežu, kā arī kviešu un rudzu ieraugu fermentācijas apstākļiem pirmajā posmā, kas paredz 24 h fermentāciju 1. posmā (Brandt & Gänzle, 2006; De Vuyst et al., 2017). Pētījumos aprakstītajā kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijā visos posmos tiek piemērots laiks 24 h (Çakır et al., 2020; Harth et al., 2016; Mariotti et al., 2014). Autores pētījumā piedāvāti atšķirīgi parametri katrā posmā, atkarībā no vienlaicīgas mainīgo faktoru ietekmes. Vairāku pētnieku aprakstītās metodes miežu ierauga fermentācijā paredz 30 °C temperatūru. Šajā pētījumā iegūta augstākā optimālā fermentācijas temperatūra 31 °C 2. posmā. Noteikta katrā posmā atšķirīga miltu un ūdens proporcija, un augstāks pievienotā ūdens daudzums 2. un 3. posmā nekā spontānajiem ieraugiem raksturīgi. Kailgraudu miežu miltu augstā ūdens absorbcija (70%) un šķīstošo šķiedrvielu, īpaši β -glikānu īpašība veidot viskozus šķīdumus nozīmīgi ietekmē fermentāciju (Torbica et al., 2021).

3.13. tabula / Table 3.13

**Optimālie tehnoloģiskie parametri un rezultāti 3. posmā /
Optimal technological parameters and results in the 3rd step**

Mainīgie faktori / Variable factors	Optimālie tehnoloģiskie parametri / Optimal technological parameters		
Ūdens / Water, ml	150		
Temperatūra / Temperature, °C	28.5		
Laiks / Time, h	12		
3.posma rezultāti / Results of the 3rd step			
Ieraugu raksturojošie rādītāji/ Parameters of sourdough	pH	PB / LAB	Raugi / Yeasts
		\log_{10} KVV g ⁻¹ / \log_{10} CFU g ⁻¹	
Modelētās vērtības / Modelled values	4.1	7.2	6.8
Eksperimentālās vērtības / Experimental values	3.8 ± 0.05	8.2 ± 0.14	7.3 ± 0.68

Kā rāda pētījumā eksperimentāli iegūtie dati (3.12. tabula), optimālos apstākļos spontānās fermentācijas trīs posmos ir attīstījusies aktīvu ieraugu raksturojoša mikrobiota: pienskābes baktērijas – no 3.0 \log_{10} KVV g⁻¹ pirmajā posmā līdz 8.2 \log_{10} KVV g⁻¹ trešajā posmā un raugi – no 4.9 \log_{10} KVV g⁻¹ pirmajā posmā līdz 7.3 \log_{10} KVV g⁻¹ trešajā posmā. pH pazemināšanās no 5.4 līdz 3.8 norāda uz pienskābes baktēriju metabolisma aktivizēšanos.

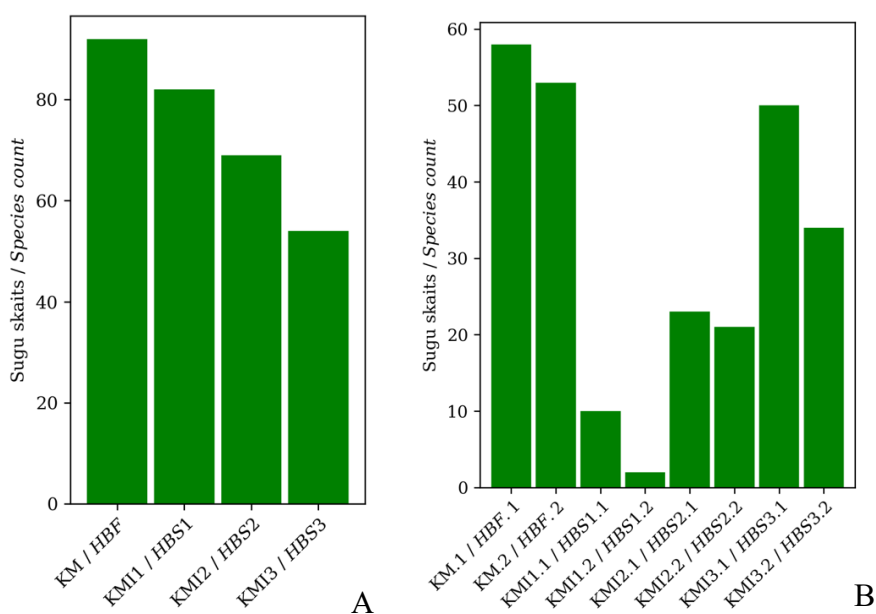
Iegūtās sakarības izmantojamas kailgraudu miežu spontānā ierauga tehnoloģiskā procesa vadīšanai un parametru koriģēšanai atkarībā no nepieciešamā pH, PB un raugu KVV skaita. Kopumā iegūtie modelēšanas rezultāti parāda līdzīgus tehnoloģiskos parametrus, kādi novēroti tradicionālo spontāno ieraugu fermentācijā. Kailgraudu miežu ierauga fermentācijā nepieciešams augstāks pievienotā ūdens daudzums (150 ml) nekā raksturīgs tradicionālo spontāno ieraugu fermentācijā.

**3.2.2. Mikrobiotas sukcesija kailgraudu miežu ierauga fermentācijas trijos posmos /
Succession of microbiota in hull-less barley sourdough three step fermentation**

Piemērojot optimālos parametrus ierauga fermentācijā, kailgraudu miežu miltu daudzveidīgo mikrobiotu iespējams virzīt vēlamo mikroorganismu augšanai. Lai pētītu mikroorganismu sukcesiju un daudzveidību kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijā un

noteiktu pienskābes baktēriju un raugu sastāvu ieraugā, kas fermentēts izmantojot optimālos tehnoloģiskos parametrus, veikta baktēriju un mikroskopisko sēņu identifikācija. Analizēti kailgraudu miežu miltu un ierauga paraugi 1. posma, 2. posma un 3. posma fermentācijas beigās.

Kailgraudu miežu miltu mikroorganismu daudzveidība (*richness*, angļu val.), kā arī mikrobiotas attīstība katrā fermentācijas posmā parādīta 3.9. attēlā. Augstākā baktēriju sugu daudzveidība identificēta KM (92) un ierauga 1. posmā KMI1 paraugā (82), taču 2. un 3. posmā KMI2 un KMI3 to daudzveidība samazinās (3.9.A att.) un dominē pienskābes baktērijas (3.11. att.). Tas sakrīt ar citu pētnieku secināto par pienskābes baktēriju sukcesiju fermentācijas laikā, saglabājoties noteiktām konkurētspējīgām sugām. Kailgraudu miežu spontānajā ieraugā arī citi pētnieki konstatējuši plašu sugu daudzveidību (Çakır et al., 2020). Augstākais mikroskopisko sēņu pārstāvju skaits noteikts KM divos paraugos (KM.1 un KM.2), bet mazāka daudzveidība konstatēta 1. posma fermentācijā (3.9.B att.). Kailgraudu miežu miltu mikrobiotas daudzveidību ietekmē arī kailgraudu miežu specifiskā uzbūve. Miltu ražošanas procesā ziedplēksne, kas vērtējama kā mikroorganismu vide, tiek atdalīta, kas varētu ietekmēt mikroorganismu sastāvu, palielināt citu baktēriju un mikroskopisko sēņu klātbūtni un daudzveidību, kas ir novērojama KM paraugos.



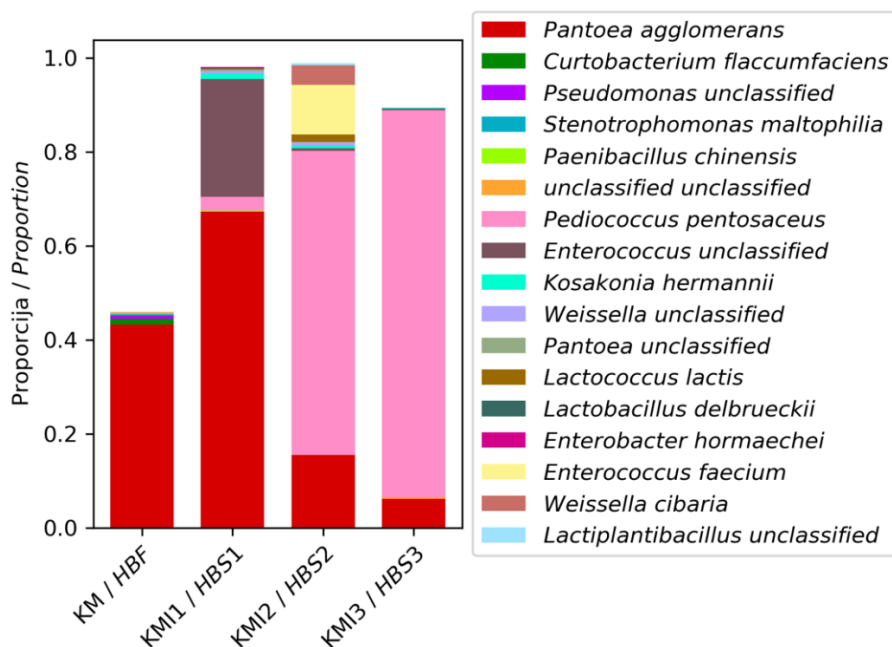
3.9. att. **Baktēriju (A) un mikroskopisko sēņu (B) identificēto sugu skaits kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas trīs posmos / Fig.3.9. Bacteria (A) and fungi (B) richness in hull-less barley flour and in hull-less barley spontaneous sourdough three steps fermentation**

KM – kailgraudu miežu milti; KMI1 – fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 1. posma; KMI2 – fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 2. posma; KMI3 – kailgraudu miežu spontānais ieraugs pēc 3. posma / HBF – hull-less barley flour; HBS1 – fermented flour and water mixture after 1st step; HBS2 – fermented HBF and water mixture after 2nd step; HBS3 – hull-less barley spontaneous sourdough after 3rd step

KMI1.1, KMI1.2 / HBS1.1, HBS1.2 – KMI1 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / KMI1 sample 1 and 2 in the identification of fungi; KMI2.1, KMI2.2 / HBS2.1, HBS2.2 – KMI2 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / KMI2 sample 1 and 2 in the identification of fungi; KMI3.1, KMI3.2 / HBS3.1, HBS3.2 – KMI3 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / KMI3 sample 1 and 2 in the identification of fungi

Taksonomiskais sastāvs parāda pienskābes baktēriju ģintis un sugas (3.10. att.) kailgraudu miežu miltos un ierauga fermentācijas trīs posmos. Kailgraudu miežu miltu paraugā identificētas biežāk pārstāvētās baktēriju ģintis un sugas *Pantoea agglomerans*, *Curtobacterium flaccumfaciens* un *Pseudomonas* spp. (3.10. att., 1. pielikums). Starp biežāk

pārstāvētajām baktērijām kailgraudu miežu miltos nav konstatētas pienskābes baktērijas. *Pantoea agglomerans* tiek aprakstīta kā sporas neveidojoša aeroba gram-negatīva *Enterobacteriaceae* dzimtas baktērija, kurai ir augu valsts izcelsme, un var būt infekciju izraisītāja, taču cilvēkiem ar normālu imunitāti nav bīstama (Admire et al., 2022). Šādu baktēriju nokļūšana uz graudiem no apkārtējās vides varētu notikt graudu uzglabāšanas laikā. Kailgraudu neatbilstoša uzglabāšana pirms malšanas var veicināt nevēlamu mikroorganismu nokļūšanu miltos.



3.10. att. Biežāk pārstāvēto baktēriju ģintis un sugas kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas trīs posmos /

Fig. 3.10. The most represented bacteria genus and species in hull-less barley flour and in spontaneous sourdough three steps fermentation

KM – kailgraudu miežu milti; KMI1 – fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 1. posma; KMI2 – fermentēts KM un ūdens maisījums pēc 2. posma; KMI3 – kailgraudu miežu spontānais ieraugs pēc 3. posma
 HBF – hull-less barley flour; HBS1 – fermented flour and water mixture after 1st step; HBS2 – fermented HBF and water mixture after 2nd step; HBS3 – hull-less barley spontaneous sourdough after 3rd step

Ar retāku pārstāvniecību kailgraudu miežu miltos identificētas *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus delbrueckii*, kā arī neatpazītas pienskābes baktērijas. *Lactobacillus delbrueckii* identificēta visos analizētajos paraugos (3.14. tabula). *Lactobacillus* spp. uzrādīja visaugstāko daudzveidību starp retāk pārstāvētajām pienskābes baktērijām. Retāk pārstāvētās pienskābes baktērijas labvēlīgos apstākļos potenciāli varētu aktivizēt augšanu. Pirmā posma fermentācijā dominēja *Pantoea agglomerans* un *Enterococcus* spp., kuru proporcija 2. un 3. posmā bija samazinājusies. Ieraugi ar dominējošu graudu raksturīgo mikrobiotu un ieraugiem neraksturīgajām pienskābes baktērijām uzskatāmi par neattīstītiem (Oshiro et al., 2021). Pirmā posma ierauga identifikācijas rezultāti apstiprina 1. posma eksperimentā iegūtos rezultātus, kuros nav novērota PB, raugu aktivitāte un strauja pH pazemināšanās. Savukārt, fermentācijas 2. un 3. posmā dominēja pienskābes baktērijas *Pediococcus pentosaceus*, kā arī parstāvētas *Pantoea agglomerans*, *Weissella cibaria*, *Lactococcus lactis*. Kā liecina literatūras dati, 2. posma fermentācijā raksturīga *Weissella*, *Lactococcus* un *Leuconostoc* ģints sugu dominēšana, taču šī pētījumā 2. posmā dominēja *Pediococcus pentosaceus*. Zinātniskajā literatūrā atrodams, ka pienskābes baktēriju ģintis *Pediococcus* un *Weissella* ir atzītas kā retāk pārstāvētās rudzu un kviešu ieraugos (De Vuyst et al., 2017), tomēr miežu ieraugos *Pediococcus pentosaceus* sastopama kā dominējošā (Çakir et al., 2020). Starp retāk pārstāvētajām PB 1. un 2. posmā konstatētas *Lactobacillus helveticus*, bet tikai 2. posmā *Lactobacillus amylolyticus*,

kas sastopamas fermentētos produktos. Nenobriedušas mikrobiotas gadījumā ar jaunu miltu porciju ienestie mikroorganismi labvēlīgos apstākļos var vairoties un radīt konkurenci dominējošiem mikroorganismiem.

3.14. tabula / Table 3.14

Retāk pārstāvētās pienskābes baktērijas kailgraudu miežu miltos un spontānā ierauga fermentācijas trīs posmos / Less represented bacteria in the hull-less barley flour and three steps fermentation of sourdough

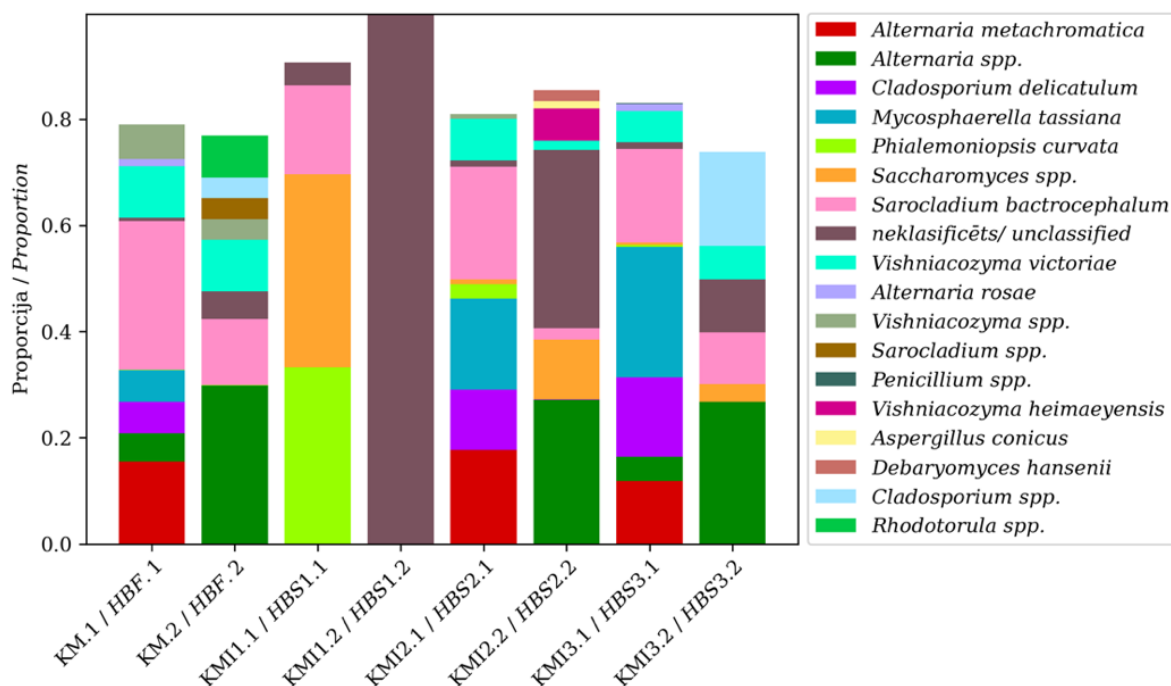
Pienskābes baktērija / <i>Lactic acid bacteria</i>	KM / <i>HBF</i>	KMI1 / <i>HBS1</i>	KMI2 / <i>HBS2</i>	KMI3 / <i>HBS3</i>
<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	+	+	+	+
<i>Lactococcus lactis</i>	+	+	+	+
<i>Lactobacillus helveticus</i>	–	+	+	–
<i>Lactobacillus amylolyticus</i>	–	–	+	–
<i>Lactiplantibacillus</i> spp.	–	+	+	+
<i>Weissella</i> spp.	–	+	+	+

Līdzās *Lactobacillus* spp. ieraugos atrodamas *Enterococcus*, *Lactococcus* un *Streptococcus* baktēriju ģintis (Gobbetti & Gänzle, 2013; Oshiro et al., 2021; Weckx et al., 2010) spontānās fermentācijas pirmajos posmos (Corsetti et al., 2007). Šīs blakus pastāvošās (*subdominant*, angļu val.) pienskābes baktēriju sugas adaptējušās augšanai augu izcelsmes materiālos. Sākotnēji šīs nobriedušam spontānam ieraugam neraksturīgās pienskābes baktērijas var būt nozīmīgas, lai strauji pazeminātu skābumu ūdens miltu maisījumā, tādējādi aktivizējot miltos esošos enzīmus (De Vuyst et al., 2017). Tās uzskatītas par nozīmīgākām skābas vides veidošanā nekā ieraugu raksturīgās pienskābes baktērijas, radot labvēlīgu vidi ierauga raksturīgām pienskābes baktērijām. Zinātnieki norāda, ka 2. – 5. fermentācijas posmos konstatēto *Weissella*, *Leuconostoc*, *Lactococcus* un *Pediococcus* spp. dominēšana var būt sasniegta no 3. līdz 5. posmam. Autores pētījumā *Pediococcus pentosaceus* dominēšana sasniegta fermentācijas 2. posmā KMI2 paraugā. Pētnieku grupa Calabrese et al. (2022) norādījusi, ka *Pediococcus pentosaceus* arī sastopama mikroorganismu asociācijās līdzās *Lactobacillus* spp. Fakultatīvi anaerobā, homofermentatīvā *Pediococcus pentosaceus* pētījumos minēta kā specifiskās peptidāzes producējoša suga (Gerez et al., 2012; Scherf et al., 2018) un ar antimikrobiālu un probiotisku aktivitāti (Jiang et al., 2021; Porto et al., 2017), kas vērtējama kā nozīmīga nevēlamās mikrobiotas nomākšanā. Citi pētnieki noteikuši no kailgraudu miežu ierauga izolētu *Lactiplantibacillus plantarum* un *Pediococcus pentosaceus* antimikrobiālu (*Penicillium funiculosum*, *Fusarium poae*) un fitāzes aktivitāti (Adnan et al., 2021; Bartkiene et al., 2020).

No optimālo parametru modelēšanas rezultātiem (3.9., 3.13. tabula) var secināt, ka 2. un 3. posmā *Pediococcus pentosaceus* augšanai piemēroti spontānā ierauga fermentācijas parametri, attiecīgi 14 un 12 h fermentācija 31.0 °C un 28.5 °C temperatūra. Nelabvēlīgā mikrobiotas dominēšana samazinājās spontānā ierauga 2. un 3. posma fermentācijā, par ko liecina biežāk pārstāvēto baktēriju identifikācija (3.10. att.) un pienskābes baktēriju vairošanās, pārbaudot eksperimentāli optimālos tehnoloģiskos parametrus (3.13. tab.). KMI3 paraugā ierauga raksturīgās pienskābes baktērijas netika atrastas. Ieraugam raksturīgās pienskābes baktēriju sugas *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, kailgraudu miežu ieraugos zinātnieki konstatējuši 5. līdz 7. fermentācijas posmā (Çakır et al., 2020; Harth et al., 2016)

Starp biežāk pārstāvētajām mikroskopisko sēņu sugām kailgraudu miežu miltos atrodamas *Alternaria metachromatica*, *Cladosporium delicatulum*, *Mycosphaerella tassiana*, *Sarocladium bactrocephalum* un *Vishniacozyma victoriae* (3.11. att., 2. pielikums). Līdzīgi rezultāti aprakstīti Katsi et al. (2021) pētījumā par kviešu ieraugu. Pirmā posma fermentācijas

laikā konstatēta *Phialemoniopsis curvata*, *Sarocladium bactrocephalum* un *Saccharomyces* spp. Arī citu pētnieku darbi liecina par miltu mikrobiotas daudzveidību, ko veido *Fusarium*, *Alternaria*, *Penicillium* ģinšu mikroskopiskās sēnes (De Angelis et al., 2019; Minervini et al., 2015).



3.11. att. Biežāk pārstāvēto mikroskopisko sēņu ģintis un sugas kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānajā ierauga fermentācijas trīs posmos / Fig. 3.11. *The most represented genus and species of fungi in hull-less barley flour and spontaneous sourdough in three steps fermentation*

KMI1.1, KMI1.2 / HBS1.1, HBS1.2 – KMI1 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / *KMI1 sample 1 and 2 in the identification of fungi*; KMI2.1, KMI2.2 / HBS2.1, HBS2.2 – KMI2 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / *KMI2 sample 1 and 2 in the identification of fungi*; KMI3.1, KMI3.2 / HBS3.1, HBS3.2 – KMI3 pirmais un otrais paraugs mikroskopisko sēņu identifikācijā / *KMI3 sample 1 and 2 in the identification of fungi*

Savukārt, mikroskopisko sēņu izmaiņas fermentācijas 2. posmā parādīja *Sarocladium bactrocephalum*, *Alternaria* spp., *Saccharomyces* spp. dominēšanu, bet 3. posmā kā biežāk pārstāvētās identificētas *Alternaria*, *Cladosporium* ģintis (3.11. att.). Starp identificētajām mikroskopiskajām sēnēm konstatētas vairākas raugveida sēnes (2.pielikums), piemēram, *Rhodotorula* spp., *Visniacozyma heimaeyensis*, *Candida* spp. *Debaryomyces hansenii* tiek izmantota fermentētos piena produktos, bet *Visniacozyma heimaeyensis* vīnogu fermentācijā, veidojot izstrādājumu aromātu.

3.2. Nodaļas kopsavilkums / Summary of Chapter 3.2

Nodaļā apskatīta optimālo tehnoloģisko parametru noteikšana spontānā ierauga fermentācijā ar Box-Behnken metodi, datu statistisko analīzi veicot Design-Expert 12 programmā. Mainīgie faktori būtiski ietekmēja pH, pienskābes baktēriju un raugu atbildes 1. un 2. posma fermentācijā, bet 3. posmā to ietekme nebija būtiska, norādot uz mikrobiotas stabilizēšanos. Modelēšanā iegūtās likumsakarības izmantojamas spontānā kailgraudu miežu ierauga fermentācijas tehnoloģiskā procesa izstrādei, lai sasniegtu nepieciešamo spontānā

ierauga kvalitāti. Spontānā procesa raksturojums sniedz likumsakarības, kas izmantojamas kailgraudu miežu ierauga fermentācijas koriģēšanai.

Kailgraudu miežu spontānā ieraugā fermentācijas laikā novērota daudzveidīga mikrobiota. Kailgraudu miežu spontānā ierauga trīs posmu fermentācijas pētījums ir apstiprinājis pienskābes baktēriju sugas *Pediococcus pentosaceus* dominēšanu 2. un 3. posmā, un *Weissella cibaria*, *Lactococcus lactis* retāku pārstāvniecību, un rauga *Saccharomyces cerevisiae* klātbūtni. 3. posmā palielinājās pienskābes baktēriju un raugu KVV skaits, tādējādi sasniedzot aktīva spontānā ierauga rādītājus un nodrošinot atbilstošas kvalitātes ieraugu maizes gatavošanai. Šāds ieraugs ir uzskatāms par *Pediococcus pentosaceus* avotu ierauga fermentācijas sākšanai un jaunu mikroorganismu konsorciju veidošanai ierauga fermentācijā.

Tālāki kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas pētījumi vairākās ģenerācijās dotu informāciju par fermentācijas faktoru ietekmi uz pienskābes baktēriju sastāvu nobriedušos ieraugos. Mikrobiotas sukcesija atkarīga no tā, kādi apstākļi piemēroti fermentācijai un kāda miltu mikrobiota pievienota ar jaunu miltu porciju. Ierauga fermentācijas procesā jāņem vērā spontānās mikrobiotas ietekme, kas varētu konkurēt, ja veidotos piemēroti apstākļi. Tāpēc pienskābes baktēriju un raugu taksonomiskais sastāvs vērtējams kā nozīmīgs ierauga raksturotājs, jo mikroorganismu metabolisms un funkcionālās īpašības ietekmē ierauga fermentācijas procesu un tā rezultātu. Būtu lietderīgi pētīt *Pediococcus pentosaceus* sugas stabilitāti nobriedušos kailgraudu miežu spontānos ieraugos, ar mērķi izmantot šīs sugas antimikrobiālās īpašības, kā arī peptidāzes producēšanas potenciālu.

The chapter examines the determination of the optimal technological parameters in spontaneous sourdough fermentation following the Box-Behnken method, with the statistical analysis of the data conducted using the Design-Expert 12 software. As a result, the effect of added water, fermentation temperature and time on yeast pH and microbiological parameters characterizing lactic acid bacteria and yeast \log_{10} CFU g^{-1} hull-less barley sourdough in three steps of spontaneous fermentation are shown. The obtained patterns can be utilized to develop the technological process of spontaneous hull-less barley sourdough fermentation to achieve the desired quality and to adjust fermentation process parameters for hull-less barley sourdough.

*A diverse microbiota is formed during fermentation in the spontaneous hull-less barley sourdough. A study of the three-steps fermentation of hull-less barley spontaneous sourdough has confirmed the dominance of the lactic acid bacteria species *Pediococcus pentosaceus* in steps 2 and 3, and the presence of *Weissella cibaria*, a rarer representation of *Lactococcus lactis*, and the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. In the 3rd stage, the number of lactic acid bacteria and yeast CFU increased, thus reaching the values that correspond to the state of active spontaneous sourdough and ensuring appropriate quality leaven for breadmaking. Such sourdough can be considered a source of *Pediococcus pentosaceus* for the initiation of sourdough fermentation and the formation of new consortia of microorganisms in sourdough fermentation.*

*Further studies of spontaneous sourdough fermentation of hull-less barley in several generations would provide information on the influence of fermentation factors on the diversity of lactic acid bacteria in mature sourdough. Microbiota succession depends on the conditions selected for fermentation and flour microbiota, which is added with a new portion of flour. In the sourdough fermentation process, the influence of the spontaneous microbiota, which could compete if suitable conditions were created, should be considered. Therefore, the taxonomic composition of lactic acid bacteria and yeasts can be evaluated as an essential characteristic of sourdough since the metabolism and functional properties of microorganisms affect the fermentation process of sourdough and its result. It would be necessary to study the stability of *Pediococcus pentosaceus* species in spontaneous fermentations of mature hull-less barley,*

aiming to exploit the antimicrobial properties of this species and the peptidase production potential.

3.3. Kailgraudu miežu spontānā un ar tīrkultūrām fermentēta ierauga izvērtējums / Evaluation of hull-less barley spontaneous and fermented with starter cultures sourdough

3.3.1. Kailgraudu miežu ierauga kvalitātes rādītāju raksturojums / Characterization of quality parameters of hull-less barley sourdough

Raksturojošo rādītāju analizēšanai un maizes gatavošanai tika veikta spontānā ierauga (KMI-S) fermentācija saskaņā ar 3.2.1. nodaļā definētajiem optimālajiem tehnoloģiskajiem parametriem un tika sagatavots ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs (KMI-T). KMI-T ierauga fermentācijas gaitai izmantoti 3.2.1. nodaļā noteiktie spontānā ierauga fermentācijas optimālie tehnoloģiskie parametri. Kailgraudu miežu ieraugu raksturojošie rādītāji apkopoti 3.15. tabulā.

3.15. tabula / Table 3.15

Kailgraudu miežu ierauga ķīmiskie un mikrobioloģiskie rādītāji / Chemical and microbiological characteristics of hull-less barley sourdough

Paraugs / Sample	pH	Skābums / TTA, ml NaOH 10g ⁻¹	PB log ₁₀ KVVg ⁻¹ / LAB log ₁₀ CFU g ⁻¹	Raugi log ₁₀ KVVg ⁻¹ / Yeasts log ₁₀ CFU g ⁻¹	Proteāžu aktivitāte / Protease activity U ml ⁻¹
KMI-S / HBS-S	3.82 ^a ± 0.02	14.05 ^a ± 0.28	8.43 ^a ± 0.22	6.52 ^a ± 0.12	0.015 ^a ± 0.001
KMI-T / HBS-T	3.67 ^b ± 0.02	13.25 ^b ± 0.14	9.62 ^b ± 0.27	6.53 ^a ± 0.25	0.148 ^b ± 0.057

KMI-S – kailgraudu miežu spontānais ieraugs fermentēts, ievērojot optimālos tehnoloģiskos parametrus; KMI-T – ar tīrkultūrām fermentēts kailgraudu miežu ieraugs / HBS-S – hull-less barley spontaneous sourdough fermented at optimal technological parameters; HBS-T – hull-less barley sourdough fermented with starter cultures
Kolonnas ietvaros ar vienu un to pašu burtu apzīmētās vērtības norāda, ka nepastāv būtiskas atšķirības starp rādītājiem p>0.05 / Values marked with the same letter within the column indicate that there is no significant difference between the values (p>0.05)

Ierauga KMI-T veidošanā papildus izmantota zinātniskās literatūras informācija par pienskābes baktēriju asociācijām spontānajos ieraugos (Calabrese et al., 2022). *Lactiplantibacillus plantarum* uzrāda stabilitāti un konstatēta kā biežāk pārstāvētā suga ieraugos gan laboratorijas, gan ceptuvju ieraugos. Tāpēc izvēlēta kā dominējošā PB suga, bet *Pediococcus pentosaceus* – kā blakus pastāvošā. Tika izvēlēts raugs *Saccharomyces cerevisiae*, jo pētījumos konstatēta asociācija ar šīm PB. *Pediococcus pentosaceus* identificēta spontānā ierauga 3. posmā kā dominējoša, tāpēc uzskatāms, ka piemērota kailgraudu miežu fermentācijai. Pētījumā KMI-T fermentācijai izmantota *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773, kuras izcelsme ir miežu produkts (Semjonovs & Zikmanis, 2008). *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773 raksturota kā fruktānu saturošu eksopolisaharīdu kompleksus sintezējošs celms, kas piemērots graudu substrātam, un spēj *in situ* sintezēt fruktānus fermentācijas gaitā. Pētnieki Semjonova un Zikmaņa (2008) pētījums atklāj, ka *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773 aktīva augšana novērota piena un burkānu substrātā, taču pietiekoša augšana (>10⁷) sasniegta arī miežu substrāta fermentācijā 7.9 log₁₀ KVV ml⁻¹. *Lactiplantibacillus plantarum* zinātniskajā literatūrā raksturota kā homofermentatīva, kas kā barības vidi var izmantot miltu ogļhidrātus un piemērojas straujam pH samazinājumam. Šīs abas sugas atzīmētas kā piemērotas maltozes izmantošanai un tām ir nepieciešamais gēnu potenciāls proteāžu, peptidāžu un pediocīna producēšanai (Zheng et al., 2015). *Lactiplantibacillus plantarum* piemīt antimikrobiālas

īpašības, kas palīdzētu nomākt graudu raksturīgo nevēlamo mikrobiotu. *Lactiplantibacillus plantarum* pētījumos konstatēta kā viena no biežāk sastopamajām spontānajos ieraugos (Arora et al., 2021) ar augstu pielāgošanās spēju vides apstākļiem (pH, temperatūra u.c.) (Bartkiene et al., 2020). Tā kā kailgraudu mieži satur augstu olbaltumvielu saturu un potenciāli arī glutēna saturu, tad izvēlētas tīrkultūras, lai paaugstinātu proteolītisko aktivitāti kailgraudu miežu ieraugā un fermentācijas ietekmē hidrolizētu peptīdu saites un samazinātu glutēna saturu maizē. Pētījumā izmantotās *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 un *Pediococcus pentosaceus* LMKK 773 raksturotas kā peptidāzes producējošas sugas (Lim et al., 2019). Proteolītiskās aktivitātes paaugstināšana nepieciešama arī, lai veicinātu cietes-olbaltumvielu struktūras sairšanu un cietes sašķelšanās veicināšanu fermentācijā.

Ieraugu analizēšanas rezultāti parāda zemu ierauga KMI-T pH. Tas liecina par *Pediococcus pentosaceus* P773 un *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 metabolisma aktivitāti un pienskābes izdalīšanu. Arī pētniece E. Bartkiene et al. (2020) konstatējuši, ka *Pediococcus pentosaceus* 2 h pie pH 2.5 uzrāda aktīvu augšanu, taču *Lactiplantibacillus plantarum* KVV skaits samazinās. Paraugā KMI-S un KMI-T konstatēts augsts $8.43 \log_{10}$ KVV g^{-1} un $9.62 \log_{10}$ KVV g^{-1} , abos paraugos sasniedzot aktīva ierauga PB rādītājus.

Augstākā proteāžu aktivitāte $0.148 U ml^{-1}$ konstatēta ar tīrkultūrām gatavotā ieraugā. Tā ir zemāka par citu pētnieku noteikto proteolītisko aktivitāti $0.43 - 1.19 U ml^{-1}$ (pH 4.3) rudzu ierauga fermentācijā ar *Lactiplantibacillus plantarum*, *Levilactobacillus brevis* un *Saccharomyces cerevisiae* (noteikšanas metodē kā substrāts izmantots azokazeīns), konstatējot arī specifisko peptidāžu aktivitāti (Loponen et al., 2004). Loponen et al. (2004) norāda, ka proteolītiskā aktivitāte ir regulējama ar fermentācijas apstākļiem – augstāka aktivitāte novērota, ja $pH < 5.5$.

Ar tīrkultūrām fermentētajam ieraugam KMI-T un spontānam ieraugam KMI-S novērota atšķirīga krāsa un aromāts. Ar tīrkultūrām fermentēts ieraugs 24 h pēc mikroorganismu pievienošanas atšķīrās ar gaišāku krāsu un patīkamu pienskābes aromātu (3.12. att.).



3.12. att. Ierauga KMI-T (A) un KMI-S (B) attēls /
Fig. 3.12. Image of sourdough HBS-T (A) and HBS-S (B)

Spontānā ierauga KMI-S fermentācijā pēc 1. posma uz virsmas novērots purpura krāsas slānis (3.13. att.).



3.13. att. Kailgraudu miežu spontānā ierauga virsmas slāņa krāsojums pēc 1. posma fermentācijas / Fig. 3.13. Surface coloration of hull-less barley spontaneous sourdough after 1st step of fermentation

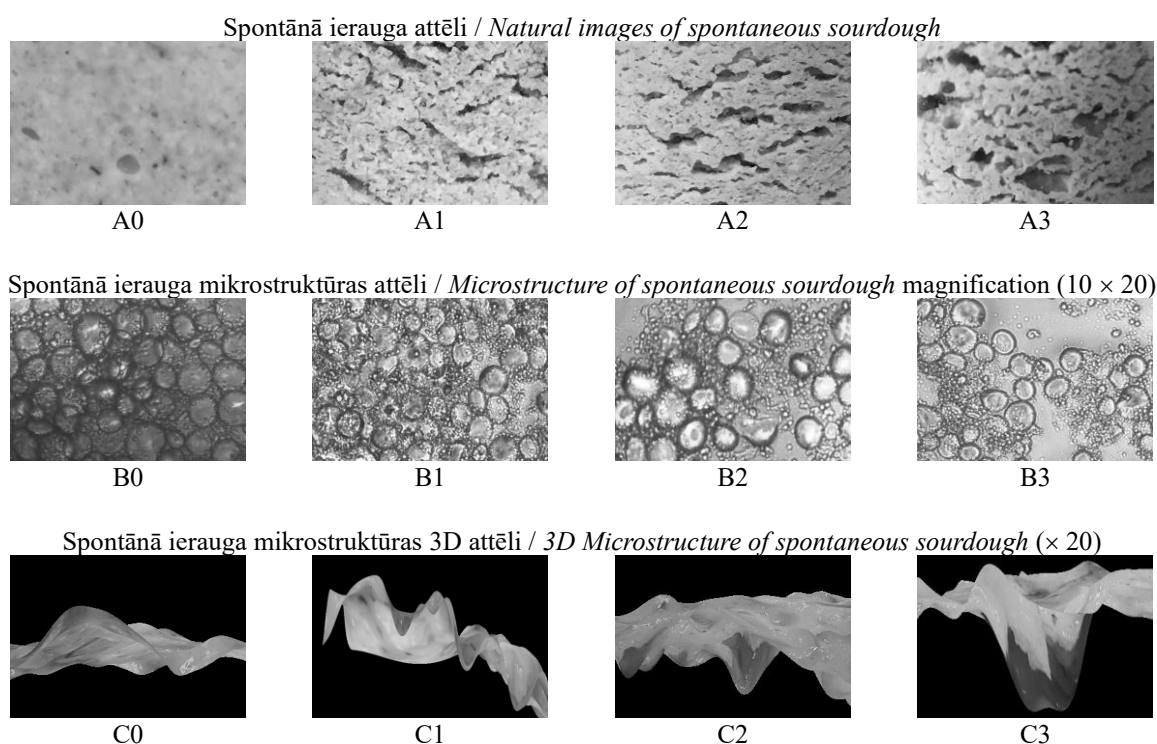
Zinātniskajā literatūrā minēts, ka miežos atrodami augstas molekulas kompleksi antociānu un polifenolu savienojumi, kas veidojas spirta rūgšanas laikā, kā violetas nokrāsas pigments zema pH vidē (Shewry & Ullrich, 2014). Literatūras dati apstiprina augsto antociānu

saturu un antioksidantu aktivitāti kailgraudu miežos (Baik & Ullrich, 2008; Brennan et al., 1996; Šterna et al., 2015). Tomēr par šo savienojumu nav pieejama pietiekama informācija, tāpēc nolemts virsējo kārtu noņemt pirms ierauga atjaunošanas. 2. un 3. fermentācijas posmā šāds virsmas krāsojums netika novērots.

3.3.2. Kailgraudu miežu ierauga reoloģiskās īpašības un fermentācijas ietekme uz mīklas struktūras veidošanos / *The rheological properties of hull-less barley sourdough and effect of fermentation on dough structure formation*

Kailgraudu miežu spontānā ierauga struktūras veidošanās fermentācijas ietekmē

Kailgraudu miežu spontānais ieraugs vizuāli atšķiras no kviešu un rudzu ierauga. Mikrostruktūras izmaiņu izpēte veikta uzreiz pēc ūdens un miltu samaisīšanas un pēc 1., 2. un 3. posma fermentācijas (3.14. att.).



3.14. att. Mikrostruktūras attēli kailgraudu miežu ierauga fermentācijas trīs posmos /

Fig. 3.14. Microstructure of spontaneous sourdough in three steps of fermentation

A0, B0, C0 – uzreiz pēc miltu un ūdens samaisīšanas / *after flour and water mixing*; A1, B1, C1 – pēc 1. posma / *after 1st step (24 h)*; A2, B2, C2 – pēc 2. posma / *after 2nd step (14 h)*; A3, B3, C3 – pēc 3. posma / *after 3rd step (12 h)*

Uzreiz pēc ūdens un miltu samaisīšanas novērota vienmērīga mīklas struktūra, kurā redzama cietās fāzes dominēšana, miltu daļiņas salīpušas un uzbriedušas (3.14. att., A0, B0). Gāzveida fāze šajā stadijā novērota minimāla (3.14. att., C0). Pēc fermentācijas 1. posma (24 h) mīklā palielinājusies gāzveida fāze, veidojot poras. Tas norāda uz mikrobioloģisko procesu sākšanos, miltos esošās dabiskās mikrobiotas aktivizēšanos, izdalot metabolisma gala produktus, tostarp CO₂. Fermentācijas 2. posma beigās vizuāli novērotas izteikti iegarenas poras, kuras trešā posma beigās kļuvušas vēl intensīvākas. Poru iegarenā forma novērota ierauga dabiskajā attēlā (3.14. att., A3, C3). un digitālā mikroskopa uzņemtajā attēlā (3.14. att., C0 – C3). Kailgraudu miežu spontānā ierauga un mīklas poru forma atšķiras no rudzu un kviešu spontānā ierauga, kurām raksturīga ovāli-apaļa forma. 3. posmā novērots aktīvāks mikroorganismu metabolisms, par ko liecināja CO₂ izdalīšanās un struktūras izmaiņas no blīvas

uz irdenāku un plastiskāku. Tādējādi trīs ierauga fermentācijas posmos bija novērojama ierauga struktūras mainīgā daba.

Fermentācijas ietekme uz ierauga reoloģiskajām īpašībām

Ierauga fermentācija ietekmē mīklas reoloģiskās īpašības, kas savukārt nosaka maizes fizikālās īpašības, tāpēc veikta ierauga reoloģisko īpašību izpēte. Kailgraudu miežu ierauga (KMI-S; KMI-T) struktūras izmaiņas fermentācijā nosaka ierauga reoloģiskās īpašības. Dinamiskā reoloģija ļauj izskaidrot plūstamības īpašības un strukturālas izmaiņas, kas notiek fermentācijas procesā. Tā izskaidro fizikālo īpašību izmaiņas dinamiskos apstākļos. Ierauga fermentācijā notiek vienlaicīga vairāku faktoru mijiedarbība un vielu pārvērtības, kas izmaina to fizikālās īpašības. Kailgraudu miežu ierauga kompleksās viskozitātes, uzkrājuma (G') un zudumu moduļu (G'') rādītāju izmaiņas parādītas 3.16. tabulā un 3.15. attēlā. Kailgraudu miežu ierauga paraugu kompleksā viskozitāte ir atkarīga no piemērotās frekvences. Fermentācijas ietekmē vērojama kompleksās viskozitātes samazināšanās tendence paraugos KMI-S un KMI-T pie 10 un 100 rad s⁻¹, bet pie 1 rad s⁻¹ kompleksā viskozitāte nav būtiski atšķirīga. Nav novērotas būtiskas reoloģisko īpašību atšķirības starp paraugiem KMI-S un KMI-T. Enzīmu un mikroorganismu ietekmes un hidrolīzes rezultātā pārveidojas sākotnējā miltu un ūdens maisījuma struktūra un samazinās elastīgās un viskozās īpašības (3.16. att.).

3.16. tabula / Table 3.16

Kompleksās viskozitātes un zudumu koeficienta izmaiņas kailgraudu miežu ierauga fermentācijā / Changes in complex viscosity and loss factor of hull-less barley sourdough fermentation

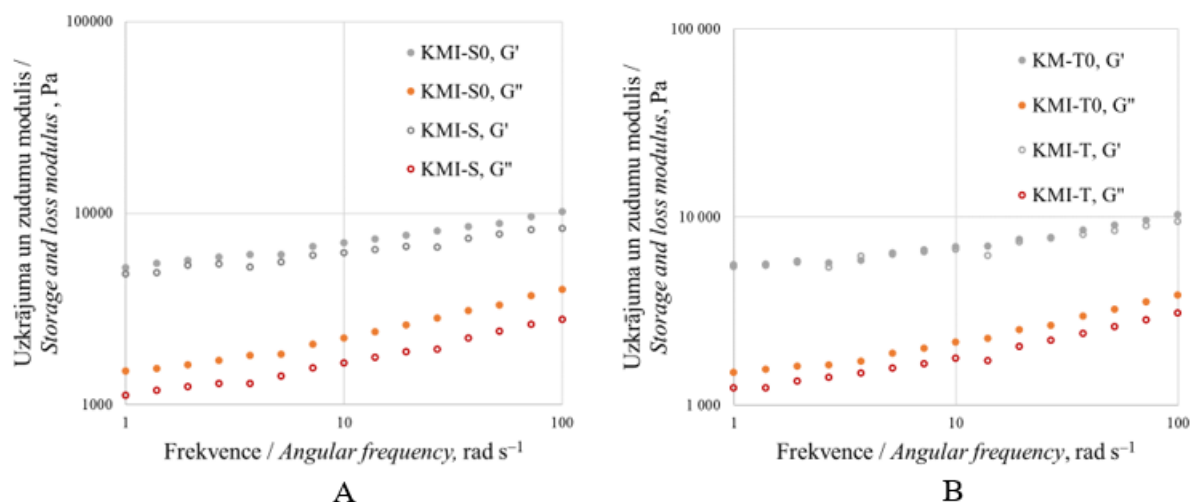
Paraugs / Sample	1 rad s ⁻¹		10 rad s ⁻¹		100 rad s ⁻¹	
	η , Pa s	Zudumu koeficients / Loss factor	η , Pa s	Zudumu koeficients / Loss factor	η , Pa s	Zudumu koeficients / Loss factor
KMI-S0 / HBS-S0	5399±54 ^b	0.28±0.01 ^a	731±36 ^a	0.32±0.01 ^a	109±14 ^a	0.39±0.02 ^a
KMI-T0 / HBS-T0	5634±207 ^{ab}	0.27±0.01 ^a	725±36 ^a	0.31±0.01 ^a	110±17 ^a	0.37±0.01 ^a
KMI-S / HBS-S	4935±50 ^c	0.23±0.01 ^b	642±15 ^b	0.26±0.01 ^b	87±9 ^b	0.34±0.02 ^{ab}
KMI-T / HBS-T	5713±49 ^a	0.22±0.01 ^b	697±59 ^{ab}	0.26±0.01 ^b	100±1 ^a	0.33±0.01 ^b

η – kompleksā viskozitāte / complex viscosity.

KMI-S0 – kailgraudu miežu miltu un ūdens maisījums atjaunots ar KMI-S atjaunojamo daļu; KMI-S – kailgraudu miežu spontānais ieraugs fermentēts, ievērojot optimālos tehnoloģiskos parametrus; KMI-T0 – kailgraudu miežu miltu un ūdens maisījums atjaunots ar KMI-T atjaunojamo daļu; KMI-T – ar tīrkultūrām fermentēts kailgraudu miežu ieraugs. / HBS-S0 – the mixture of hull-less barley flour and water backslopped with renewable part of HBS-S; HBS-S – hull-less barley spontaneous sourdough fermented at optimal technological parameters; HBS-T0 – the mixture of hull-less barley flour and water backslopped with renewable part of HBS-T; HBS-T – hull-less barley sourdough fermented with starter cultures

Kolonnas ietvaros ar vienu un to pašu burtu apzīmētas vērtības norāda, ka nepastāv būtiskas atšķirības starp rādītājiem $p > 0.05$ / Values marked with the same letter within the column indicate that there is no significant difference between the values ($p > 0.05$)

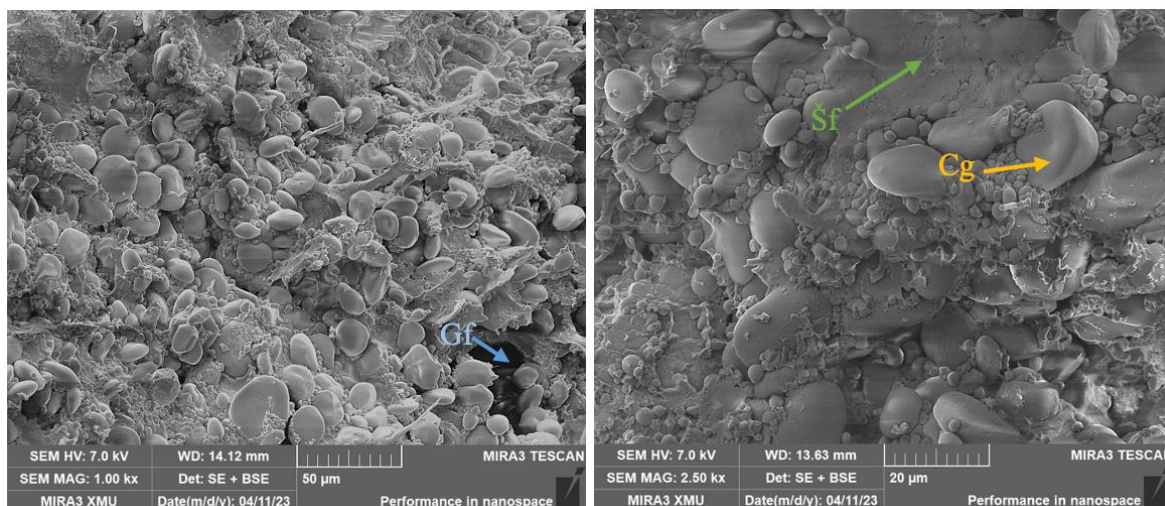
KMI-S un KMI-T paraugos novērots $G' > G''$, kas norāda uz elastīgās komponentes pārsvaru pār viskozo līdzīgi citu zinātnieku pētījumiem (Abedfar et al., 2020; Galle et al., 2011). Zudumu koeficienta samazināšanās norāda uz ierauga struktūras degradāciju, kas novērota KMI-S un KMI-T paraugā.



3.15. att. Uzkrājuma (G' , Pa) un zudumu (G'' , Pa) moduļu izmaiņas fermentācijas ietekmē / Fig. 3.15. *Effect of fermentation on storage (G' , Pa) and loss (G'' , Pa) moduli*
 A – kailgraudu miežu spontānā ieraugā pirms (KMI-S0) un pēc (KMI-S) fermentācijas / A – in the hull-less barley sourdough before (HBS-S0) and after (HBS-S) fermentation, B – ar tīrkultūrām fermentēta kailgraudu miežu ieraugā pirms (KMI-T0) un pēc (KMI-T) fermentācijas / B – in the sourdough fermented with starter cultures before (HBS-T0) and after (HBS-T) fermentation

Kailgraudu miežu mīklas mikrostruktūras izpēte

Lai novērtētu kailgraudu miežu ierauga fermentācijas ietekmi uz kailgraudu miežu mīklas struktūras izmaiņām, veikta mikrostruktūras izpēte. Mīklas mikrostruktūras izpēte dod padziļinātu ieskatu mīklas struktūras veidošanās mehānismā. Kailgraudu miežu mīklas NFKM parauga 3.16. attēlā redzamas mazu cietes graudu iegarenas virknes un kopā sagrupējušies kaili cietes graudi.

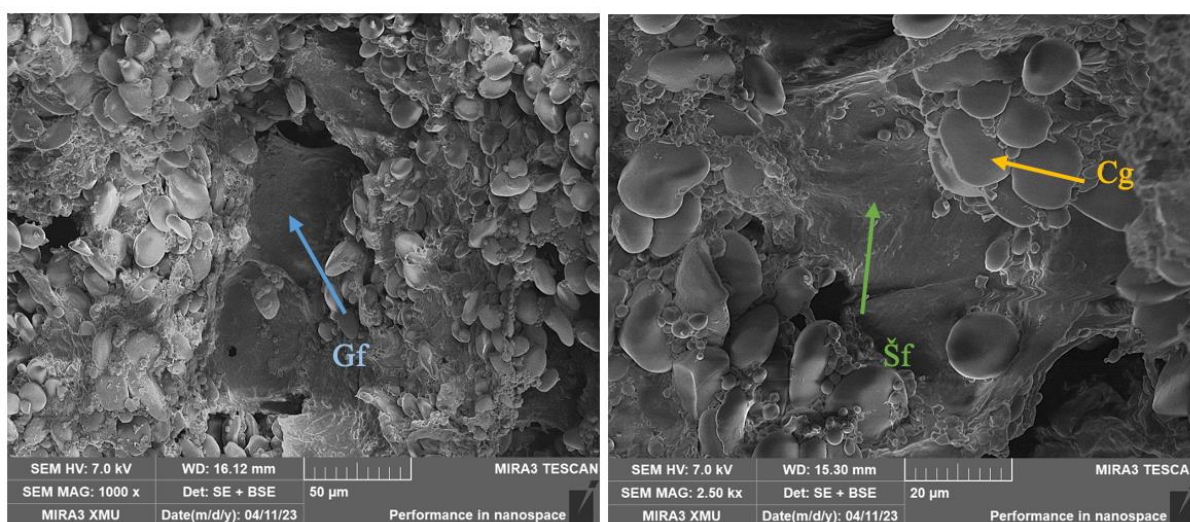


3.16. att. Kailgraudu miežu mīklas struktūra pēc samīcīšanas / Fig. 3.16. *Structure of hull-less barley dough after kneading*
 Palielinājums / magnification 1.0 kx (50 μm), 2.5 kx (20 μm)

Tikko samīcītā mīklā cietes graudi novietoti blīvi viens pie otra. Iegarenie virknējumi varētu būt viens no iemesliem iegarenajām porām (3.14. att., A2). Zinātnieku pētījumi par dažādu šķirņu kailgraudu miežu cietes graudu izmēriem un formu liecina, ka lielāko daļu cietes veido lieli ovāli (12 – 16 μm), mazāki neregulāras formas (<10 μm) graudi un arī lielas zvana veida cietes graudu kopas (Li et al., 2001), kas varētu veidot iegarenās gāzes poras (3.14. att., C3). Endosperma šūnu sienās esošie β-glikāni var būt saistīti ar olbaltumvielām ar kovalentām

saitēm, veidojot lielas molekulas (Baik & Ullrich, 2008). Zvana veida cietes grauds (Cg) saskatāms 3.16. attēlā, kādi konstatēti citu kailgraudu miežu šķirņu cietei. Nav novērota lipekļa veidošanās, proti, struktūra, kas aptvertu cietes graudus. Tas liecina par miežu hordeīna un hordenīna īpašībām, kas atšķiras no kviešu gliadīna un glutenīna īpašībām.

Pēc mīklas fermentēšanas (4 h) paraugā FKM novēroti gan daļēji mīklā integrēti, gan kaili lieli un mazi cietes graudi. Šķidrā fāze novērota izteiktāka, nekā mīklā uzreiz pēc samīcīšanas (3.17. att.). Gāzveida fāze redzama iekļauta stabilizējošā virsmā. Tomēr iegarenās poras varētu būt saistāmas arī ar poru nestabilitāti, kad neveidojas pietiekama poras stabilizējošā virsma.



3.17. att. **Kailgraudu miežu mīklas struktūra pēc 4 h fermentācijas /**
Fig. 3.17. Structure of hull-less barley dough after 4 h fermentation

Palielinājums / Magnification 1.0 k× (50 μm), 2.5 k× (20 μm); Cg – cietes graudi / starch granules; Gf – gāzveida fāze / gaseous phase; Šf – šķidrā fāze / liquid phase

Atšķirīgi rudzu mīklā novērota vienmērīga struktūra, kas redzama kā vienmērīgas šūnas, un kā izteikta stabilizējoša šķidrā fāze, kurā iekļauti cietes graudi (Murniece et al., 2023). Šāda struktūra norādīja uz aktīvu cietes un olbaltumvielu hidrolīzi, un šķīstošo šķiedrvielu arabinoksilānu klātbūtni. Xie et al. (2023) pētījumā novērota miežu cietes graudu noārdīšana fermentācijas *Lactiplantibacillus plantarum* un *Saccharomyces cerevisiae* ietekmē. Taču 3.17. attēlā nav redzami sagrauzti cietes graudi. Murniece et al. (2023) pētījums norāda, ka kailgraudu miežu mīklas fermentācijā ar rudzu ieraugu, novērots mīklas kompleksās viskozitātes un reoloģisko moduļu samazinājums. Taču kailgraudu miežu mīklas viskozitāte konstatēta būtiski augstāka, salīdzinot ar rudzu mīklas viskozitāti, kas uzskatāms, kā iemesls augstai kailgraudu miežu maizes mīkstuma cietībai. Zudumu koeficients norādīja uz mērenu struktūras degradēšanos. Kailgraudu miežu šķīstošie ne-cietes polisaharīdi, kā β-glikāni, fruktāni un mannāni ūdens šķīdumā veido viskozus šķīdumus, kas veido šķidro fāzi. Taču kailgraudu miežu mīklā novērota nepietiekama un nevienmērīga struktūru veidojošā šķidrā fāze pretstatā tam, kāda novērota rudzu mīklā (Murniece et al., 2023), lai veidotu struktūru. Kailgraudu miežu milti, galvenokārt tiek izmantoti kviešu miltu daļējai aizstāšanai (līdz 20%), lai bagātinātu ar šķiedrvielām mīklu, kurā struktūras veidošanos nodrošina lipekļi. Novērojumi liecina, ka kailgraudu miežu mīklā cietes pakāpeniskas uzbriešanas un β-glikānu augstās viskozitātes dēļ neveidojas pietiekama šķidrā fāze. Rudzu plaucējums pazīstams kā struktūras veidotājs rudzu mīklā (Ask et al., 1991) un izmantots arī kā struktūras uzlabotājs kviešu mīklā (Li et al., 2022; Wójcik et al., 2021), kas veido vienmērīgāku mīklas struktūru un atvieglo mīklas apstrādi. Šādā mīklā cietes graudi vienmērīgi tiek pārklāti ar plaucējuma masu kā struktūru veidojošo komponenti. Pētījumi ar miežu plaucējuma pievienošanu kailgraudu miežu

mīklā nedeva kailgraudu miežu maizes mīkstuma struktūras uzlabojošu rezultātu (Murniece et al., 2023). Kailgraudu miežu plaucējuma kompleksā viskozitāte palielinājās pēc fermentācijas, salīdzinot ar rudzu plaucējumu, kas liecināja par cietes uzbriešanu. Tomēr potenciāli izmantojams fermentēts rudzu plaucējums, kura pievienošana rudzu mīklā deva pozitīvu rezultātu, samazinot rudzu maizes mīkstuma cietību. Arī kailgraudu miežu augstais olbaltumvielu saturs varētu ietekmēt ogļhidrātu pieejamību. β -glikānu kompleksa veidošanās ar cieti un olbaltumvielām, un enzīmu atrašanās olbaltumvielu struktūrā var kavēt cietes sašķelšanos un varētu būt par iemeslu maizes mīkstuma cietībai. Kailgraudu miežu mīklas struktūru veidojošo šķidro fāzi varētu palielināt, paaugstinot mīklas enzimatisko aktivitāti un veicinot cietes sašķelšanu.

3.3. Nodaļas kopsavilkums / Summary of Chapter 3.3

Kailgraudu miežu spontāno un ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu raksturo aktīva ierauga mikrobioloģiskie un fizikāli-ķīmiskie rādītāji. Ieraugā ar tīrkultūrām novērota augstāka proteolītiskā aktivitāte nekā ieraugā spontānajā ieraugā. Kailgraudu miežu spontānā ierauga vizuālā un mikrostruktūras izpēte parāda izmaiņas kailgraudu miežu spontānā ierauga struktūrā – atšķirīgu cietās un gāzveida fāzes proporciju trīs ierauga fermentācijas posmos. Novērota gāzveida fāzes palielināšanās, kas veidojas kā iegarenas poras. Fermentācijas laikā kailgraudu miežu ieraugu kompleksā viskozitāte samazinās, novērots $G' > G''$, kas norāda uz ierauga elastīgo īpašību pārsvaru pār viskozajām. Kompleksās viskozitātes un zuduma koeficienta samazināšanās norāda uz struktūras sairšanu kailgraudu miežu ierauga fermentācijā. Tas liecina par aktīvu hidrolīzes norisi. Kailgraudu miežu mīklas, kas gatavota ar kailgraudu miežu ieraugu, mikrostruktūras izpēte apstiprināja struktūras izmaiņas – gāzveida un šķidrās fāzes palielināšanos pēc 4 h mīklas fermentācijas.

Spontaneous and fermented with starter cultures, sourdough was prepared to evaluate the quality indicators of hull-less barley sourdough. Sourdough fermentation with starter cultures was initiated with the addition of starter cultures. Hull-less barley spontaneously fermented sourdough, and that fermented with starter cultures are characterized by microbiological and physicochemical indicators characteristic of active sourdough. A higher proteolytic activity was observed in sourdough fermented with starter cultures than spontaneously. The visual and microstructural analysis of the spontaneous sourdough of hull-less barley shows changes in the spontaneous sourdough structure of hull-less barley – a different ratio of solid to gaseous phases in the three steps of fermentation. An increase in the gaseous phase, which forms as elongated pores, was observed. During fermentation, the complex viscosity of hull-less barley sourdough decreases, observed by $G' > G''$ pattern, indicating the prevalence of sourdough's elastic character over viscous. The decrease of complex viscosity and loss coefficient indicates the disintegration of the structure during the fermentation of hull-less barley sourdough. This observation indicates an active hydrolysis process.

3.4. Glutēna satura izmaiņas kailgraudu miežu ierauga fermentācijā / Changes in gluten content in fermentation of hull-less barley sourdough

Glutēna satura noteikšanai analizēti kailgraudu miežu milti, ieraugs un kailgraudu miežu maize ar ELISA G12 (dati 4. pielikumā). Kailgraudu miežu miltos noteikts $90.6 \cdot 10^4 \text{ mg kg}^{-1}$ sausnas. Arī citu pētīnieku rezultāti liecina par kailgraudu miežu augsto glutēna saturu, testēšanā izmantojot ELISA testus (Lexhaller et al., 2017; Tanner et al., 2013; Xhaferaj et al., 2023). Xhaferaj et al. (2023) pētījumā, izmantojot ELISA G12 testu, dažādu šķirņu miežu paraugos konstatēts glutēna saturs 7.3 – 94.0 g 100 g^{-1} . Starp 35 miežu paraugiem kailgraudu miežu

'Kornelija' miltos konstatēts augstākais glutēna saturs $15.9 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ($159 \cdot 10^3 \text{ mg kg}^{-1}$), kamēr pārējos paraugos $4.4 - 9.3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, testējot ar hromatogrāfijas metodi. Kerpes et al. (2016) noteicis $32 \cdot 10^3 \text{ mg kg}^{-1}$ glutēna miežu graudos, kas paredzēti iesala gatavošanai. Tomēr citi pētnieki konstatējuši zemāku glutēna saturu 164.1 mg kg^{-1} miežos (Šterna et al., 2022).

Analizējot ierauga paraugus, netika novērota strauja glutēna satura samazināšanās fermentācijas laika ietekmē. Kā pētījumos minēts, pienskābes baktēriju lag fāzē (12 h) un vēlējā lag fāzē novērota augstākā enzīmu aktivitāte (Gerez et al., 2012; Reale et al., 2021). Ar tīrkultūrām fermentēta kailgraudu miežu ierauga (KMI-T) testēšanas rezultātos tas ir apstiprinājies, jo vislielākais glutēna satura samazinājums – 29% konstatēts pēc 24 h, bet vismazākais – 13% pēc 6 h fermentācijas. KMI-T (12 h fermentācija) paraugā konstatēts lielāks glutēna satura samazinājums (16%) nekā KMI-S paraugā (8%) attiecībā pret tā saturu miltos.

Kailgraudu miežu maizes paraugā KMM-S noteikts viszemākais glutēna saturs $64.57 \cdot 10^4 \text{ mg kg}^{-1}$. Fermentācijas ietekmē glutēna saturs samazinājies attiecībā pret saturu miltos. KMI-S paraugā tas samazinājies par 29%, bet KMI-T paraugā par 22%. KMI-T konstatēts mazāks glutēna samazinājums nekā KMI-S pretēji ieraugā novērotai tendencei. To varētu skaidrot ar to, ka, mīklas fermentācijā ir nozīmīga miltu raksturīgās mikrobiotas ietekme, kurai ir peptīdu saišu šķelšanas potenciāls, kamēr mīklā ar KMI-T ieraugu pienskābes baktērijām 4 h fermentācija ir nepietiekama peptidāžu producēšanas maksimālās aktivitātes sasniegšanai. Maizes augstais kailgraudu miežu glutēna saturs ievērojams, rekomendējot produktus cilvēkiem ar glutēna nepanesību. Tomēr kailgraudu miežu olbaltumvielas uzturā lietojamas atkarībā no individuālas glutēna nepanesības (reakcijas uz hordeīnu), un tas nav saistāms ar kviešu alerģiju.

Glutēna monitorēšanas metodes balstās, galvenokārt, uz principu, vai tā saturs ir mazāks par 20 mg kg^{-1} . Tas apgrūtina noteikšanu produktos ar augstu glutēna saturu. Glutēna satura noteikšanas problemātiku izceļ Prolamīnu analīzes darba grupa (WGPAT)⁷, kas publicējusi pētnieku secināto (Scherf et al., 2021) par glutēna noteikšanu miežu, rudzu un fermentētajos produktos. Xhaferaj et al. (2023) norāda, ka, izmantojot AgraQuant Gluten G12 un RIDASCREEN Gliadin R5 testu, paraugi uzrāda par 60 – 90% augstāku rezultātu, nekā analizējot ar hromatogrāfijas metodi. Tanner et al. (2013) arī norāda uz problemātiku, analizējot glutēna saturu ar ELISA testu alū, kurā glutēna saturs samazināts pārstrādes laikā, hidrolizējot ar prolilendopeptidāzēm vai nogulsnejot ar tanīniem. Tiek uzsvērts precīzas testēšanas svarīgums, lai ražotājs un patērētājs iegūtu precīzu informāciju par glutēna saturu produktā. ELISA testu ražotājs norāda, ka metodes piemērotas arī miežu un rudzu testēšanai, tomēr tās izstrādātas kviešu glutēna noteikšanai. Precīza glutēna kvantitatīva noteikšana fermentētajos produktos, tostarp ierauga maizē, ar ELISA metodēm, kuru pamatā ir antivielas, ir apgrūtināša atbilstošu atsauces materiālu dēļ miežiem un rudziem (Alves et al., 2019; Buggy et al., 2022; Schalk et al., 2017). Xhaferaj et al. (2023) norāda uz atsauces materiāla nepieciešamību speciāli miežu glutēna testēšanai, tāpēc pētnieku grupa izveidojusi vidējo paraugu no 7 miežu šķirnēm, iekļaujot arī Latvijā selekcionēto kailgraudu miežu šķirni 'Kornelija'. Kā liecina pētījumi, ar dažādām metodēm noteiktā glutēna saturs nozīmīgi atšķiras (Lexhaller et al., 2017). Par precīzākām tiek uzskatītas hromatogrāfijas metodes. Fermentētos produktos mainīgās proteolīzes rezultātā var rasties dažādas peptīdu virknes (Panda & Garber, 2019), kas apgrūtina testēšanu arī ar hromatogrāfijas metodi. Nav pētījumu par peptīdiem, kas rodas fermentācijas laikā, un par peptīdu bioloģisko aktivitāti, kas saistīta ar toksiskumu vai tieši pretēju iedarbību. Trūkst arī klīnisko pētījumu par bioloģiski aktīvo peptīdu ietekmi. Kā arī indivīdu alerģiskuma sliekšnis var atšķirties.

⁷*Specifications of PWG-Gliadin: Working Group of Prolamin analysis and Toxicity* [tiešsaiste] [skatīts 20.02.2024.]. Pieejams: <https://www.wgpat.com/pwggliadin.html>

3.4. nodaļas kopsavilkums / *Summary of Chapter 3.4*

Fermentācijas rezultātā kailgraudu miežu ieraugā un maizē samazinājās glutēna saturs salīdzinot ar saturu kailgraudu miežu miltos. Pēc 24 h fermentācijas spontānajā ieraugā noteikts par 29% zemāks glutēna saturs nekā miltos. Zemāks glutēna saturs noteikts kailgraudu miežu ierauga ar tīrkultūrām paraugā nekā spontānā ierauga paraugā. Tas apstiprina ierauga ar tīrkultūrām augstāku proteolītisko aktivitāti. Taču kailgraudu miežu maizes paraugā ar spontāno ieraugu glutēna saturs konstatēts zemāks nekā maizē ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu, kas liecina par spontānās fermentācijas nozīmi peptīdu saišu šķelšanā. Fermentācijas ar kailgraudu miežu ieraugu ietekmē glutēna saturs maizē ir samazinājies (8 – 16%), bet maizē ar rauga fermentāciju samazinājums nav novērots. Lai paaugstinātu olbaltumvielu sašķelšanu ierauga un mīklas fermentācijā izmantojamas speciāli selekcionētas peptidāzes producējošas pienskābes baktēriju tīrkultūras. Miežu produktu testēšana ir apgrūtināta atbilstoša atsauces materiāla dēļ, tāpēc glutēna satura analizēšanai kailgraudu miežu miltos, kā arī ieraugā un maizē ieteicams izmantot hromatogrāfijas metodes, kas dotu precīzāku rezultātu.

As a result of fermentation, the gluten content in hull-less barley sourdough and bread decreases compared with the initial content observed in hull-less barley flour. The fermentation time reduced the gluten content after 24 h of fermentation, and this amount was 29% lower in the spontaneous yeast than in the flour. A lower gluten content was determined in the hull-less barley sourdough fermented with starter cultures than in spontaneous sourdough. This observation confirms the higher proteolytic activity of sourdough with starter cultures than spontaneous sourdough. However, in the hull-less barley bread prepared with spontaneous sourdough, the gluten content was lower than in the bread fermented with starter cultures, indicating the importance of spontaneous fermentation in the cleavage of peptide bonds. As a consequence of hull-less barley dough fermentation with sourdough, the gluten content in bread was decreased within the range from 8% to 16%, while no decrease was observed in bread with yeast fermentation. To increase the breakdown of proteins, specially selected peptidase-producing starter cultures of lactic acid bacteria are used in sourdough and dough fermentation. Testing barley products is challenging due to the limitations in appropriate reference material. For the analysis of gluten content in hull-less barley grain, flour, sourdough, and bread, it is recommended to use chromatographic methods, which would give a more accurate result.

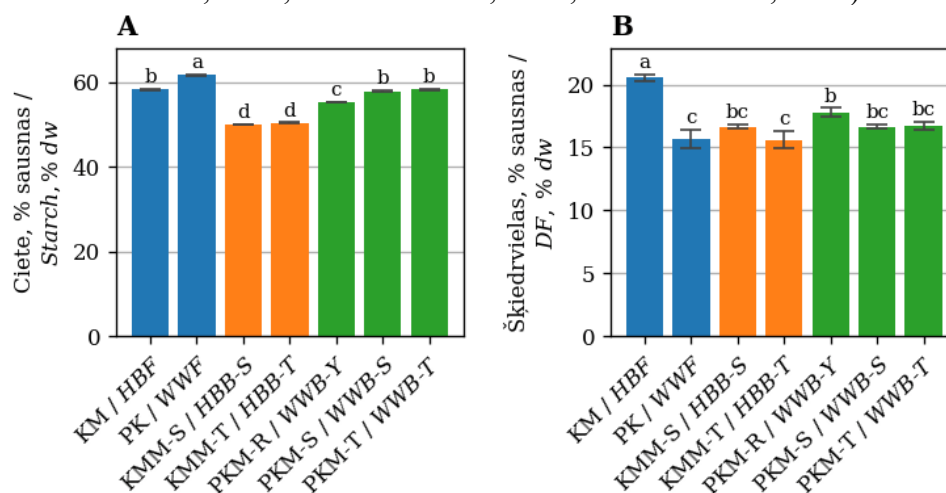
3.5. Cietes un ne-cietes polisaharīdu ietekme uz maizes fizikālajām īpašībām / *Impact of starch and non-starch polysaccharides on the physical properties of bread*

Ierauga un mīklas fermentācijā notiek mikroorganismu metabolisma radītās bioķīmiskās un fizikāli – ķīmiskās pārvērtības, kas ietekmē miltu cepamīpašības un uzturvielu funkcionalitāti un nosaka maizes fizikālās īpašības. Tāpēc pētīts cietes un ne-cietes polisaharīdu saturs kailgraudu miežu miltos, kā arī kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizē un to savstarpējā ietekme.

Cietes un ne-cietes polisaharīdu saturs kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizē

Cietes saturs pilngraudu kviešu miltos $61.68 \pm 0.14\%$ sausnas (3.18. att.) būtiski atšķirās no cietes satura kailgraudu miežu miltos $58.27 \pm 0.11\%$ sausnas. Nozīmīgas cietes pārvērtības notiek ieraugu un mīklas fermentācijas laikā enzīmu α un β -amilāzes ietekmē. Iegūtie rezultāti parāda, ka cietes saturs samazinās attiecībā pret tās saturu miltos. Cietes saturs KMM-S un KMI-T paraugā būtiski neatšķirās, tas noteikts $50.08 \pm 0.11\%$ sausnas un $48.26 \pm 0.06\%$ sausnas. Pētnieku atzinumi liecina, ka ar ieraugu fermentētai maizei ir zemāks glikēmiskais

indekss, jo fermentējamie cukuri un daļa cietes tiek izmantoti fermentācijas procesā (Demirkesen-Bicak et al., 2021; Poutanen et al., 2009; Scazzina et al., 2009).



3.18. att. Cietes (A) un šķiedrvielu (B) saturs, % sausnas /

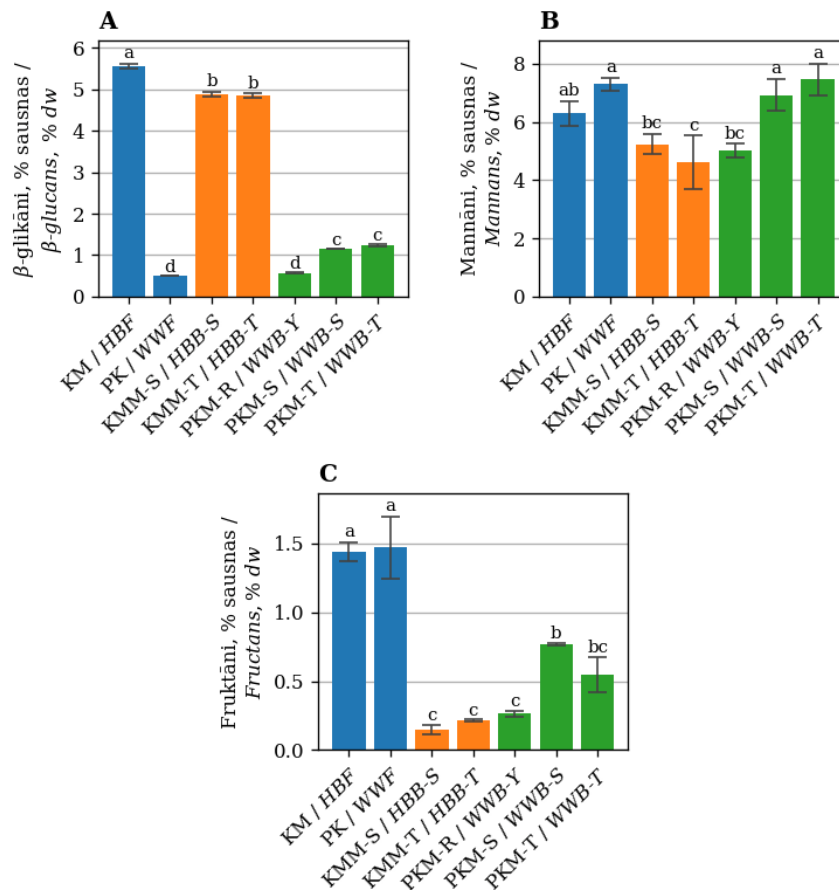
Fig. 3.18. *Starch (A) and dietary fibre (B) content, % dw*

KM – kailgraudu miežu milti; PK – pilngraudu kviešu milti; kailgraudu miežu maize: KMM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; KMM-T – ar tūrkultūrām fermentētu ieraugu; pilngraudu kviešu maize: PKM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; PKM-T – ar tūrkultūrām fermentētu kailgraudu miežu ieraugu; PKM-R – ar raugu; atšķirīgie burti kolonnu apakšpusē parāda būtiski ($p < 0.05$) atšķirīgās vērtības / HBF – hull-less barley flour / WWF – wholegrain wheat flour; hull-less barley bread: HBB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; HBB-T – prepared with starter cultures sourdough; wholegrain wheat bread: WWB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; WWB-T – prepared with sourdough with starter cultures; WWB-Y – wholegrain wheat bread with yeast; different letter within the column indicates that there is significant difference between the values ($p < 0.05$)

KM tika noteikts augsts šķiedrvielu saturs $20.55 \pm 0.25\%$ sausnas, bet pilngraudu kviešu miltos konstatēts būtiski mazāks šķiedrvielu saturs $15.67 \pm 0.73\%$ (3.18. att.). Kailgraudu miežu maizē KMI-S konstatēts 16.64 ± 0.18 un maizē KMI-T 15.61 ± 0.68 , kas ir būtiski mazāk nekā kailgraudu miežu miltos. Pilngraudu kviešu maize satur $16.64 - 17.78\%$ sausnas, un šķiedrvielu samazinājums attiecībā pret saturu pilngraudu kviešu miltos nav novērots. Šķiedrvielas mīklā tiek iekļautas lipekļa struktūrā un varētu būt grūtāk sašķeļamas mīklas fermentācijā. Nenožīmīgi augstāks šķiedrvielu saturs varētu norādīt uz rezistentās cietes veidošanos maizes cepšanas / atdzesēšanas procesā (Djurle et al., 2018).

β -glikānu saturs kailgraudu miežu miltos noteikts $5.57 \pm 0.05\%$ sausnas (3.19. att.). Pilngraudu kviešu maizē, kas gatavota ar raugu, β -glikānu saturs konstatēts $0.56 \pm 0.01\%$ sausnas – 2 reizes mazāks nekā pilngraudu kviešu maizes paraugos ar miežu ieraugu. Miežu ierauga pievienošana divas reizes palielināja β -glikāna saturu pilngraudu kviešu maizēs PKM-S un PKM-T attiecīgi līdz $1.14 \pm 0.01\%$ un $1.24 \pm 0.01\%$ sausnas. Nenožīmīgs β -glikānu samazinājums novērots kailgraudu miežu maizēs attiecībā pret kailgraudu miežu miltiem. Kailgraudu miežu maize KMM-S satur $4.89 \pm 0.05\%$ sausnas un KMM-T $4.83 \pm 0.07\%$ sausnas β -glikānu. Maizes gatavošanas tehnoloģijai ir nozīmīga ietekme uz β -glikāna saturu produktā. Šie rezultāti sakrīt ar citu zinātnieku pētījumiem, ka ierauga un mīklas fermentācijas laikā β -glikānu saturs samazinās (Djurle et al., 2018; Pejcz et al., 2015). β -glikānu degradācija notiek β -glikanāzes dēļ, kas atrodama gan kviešu, gan miežu miltos (Maina et al., 2021). Pilngraudu kviešu miltos mannānu saturs noteikts $7.29 \pm 0.20\%$ sausnas. Savukārt, miežu miltos mannānu saturs konstatēts $6.29 \pm 0.41\%$ sausnas. Kailgraudu miežu ierauga maizes paraugā KMM-S mannānu saturs samazinājās līdz $5.24 \pm 0.61\%$ sausnas. Pilngraudu kviešu maizes paraugā PKM-R mannānu saturs konstatēts viszemākais $5.01 \pm 0.24\%$ sausnas. Fruktānu saturs kailgraudu miežu miltos būtiski neatšķīrās no tā satura pilngraudu kviešu miltos attiecīgi $1.44 \pm 0.07\%$ un $1.47 \pm 0.22\%$ sausnas (3.19. att.).

KMM-S un KMM-T noteikts zemākais fruktānu saturs – 0.15 ± 0.04 un $0.21 \pm 0.01\%$ sausnas. Fruktānu satura izmaiņas ietekmē fermentācijas laikā *Saccharomyces cerevisiae* izdalītais enzīms invertāze (Loponen & Gänzle, 2018; Struyf et al., 2017). Augstākais fruktānu samazinājums 89.6% novērots kailgraudu miežu maizē KMM-S, kā arī pilngraudu kviešu maizē ar raugu – 81.6%. Ierauga un mīklas fermentācijā izmantotās *Pediococcus pentosaceus* potenciāli var patērēt un arī izdalīt fruktānu saturošus eksopolisaharīdus. Taču šī pētījuma rezultāti neļauj secināt par pienskābes baktēriju sintezētu eksopolisaharīdu klātbūtni.



3.19. att. β -glikānu (A), mannānu (B), fruktānu (C) saturs, % sausnas /

Fig. 3.19. β -glucans (A), mannans (B), fructans (C) content, % dw

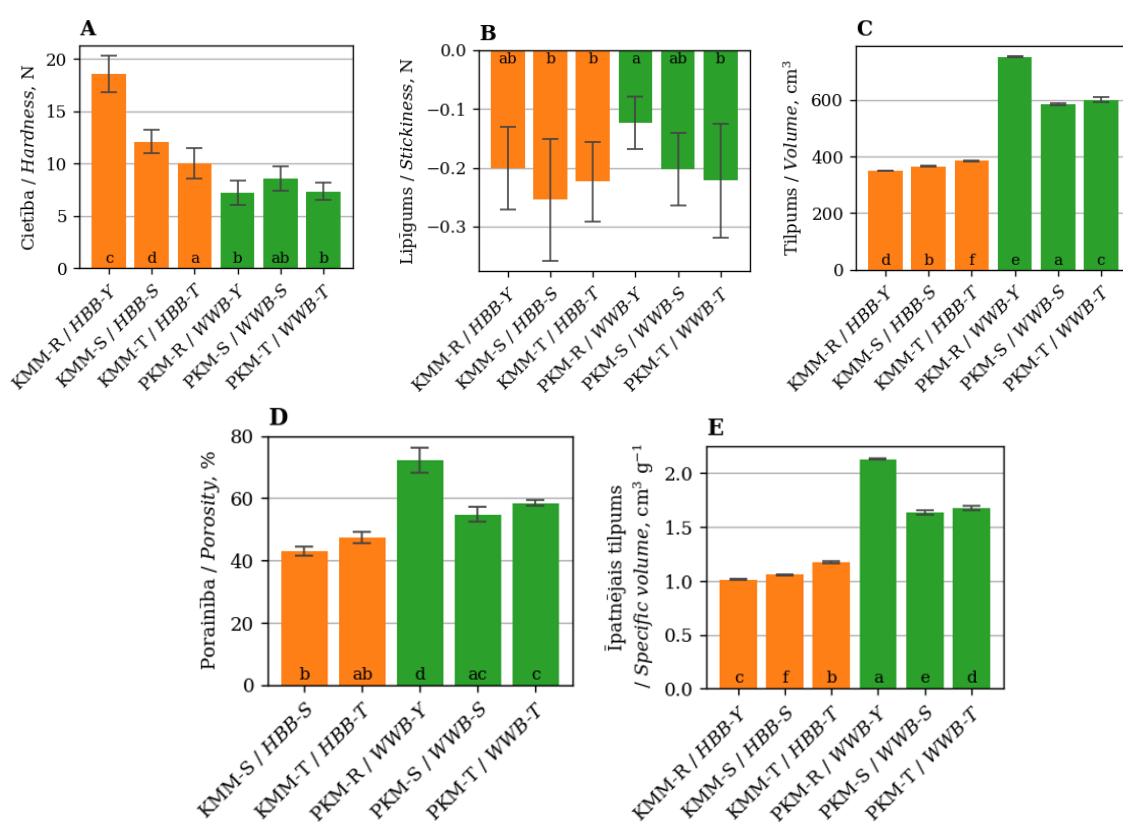
KM – kailgraudu miežu milti; PK – pilngraudu kviešu milti; kailgraudu miežu maize: KMM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; KMM-T – ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu; pilngraudu kviešu maize: PKM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; PKM-T – ar tīrkultūrām fermentētu kailgraudu miežu ieraugu; PKM-R – ar raugu; atšķirīgie burti kolonnu apakšpusē parāda būtiski ($p < 0.05$) atšķirīgās vērtības / HBF – hull-less barley flour; WWF – wholegrain wheat flour; hull-less barley bread: HBB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; HBB-T – prepared with starter cultures sourdough; wholegrain wheat bread: WWB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; WWB-T – prepared with sourdough with starter cultures; WWB-Y – wholegrain wheat bread with yeast; different letter within the column indicates that there is significant difference between the values ($p < 0.05$).

Cietes un ne-cietes polisaharīdu saturs maizē KMM-S un KMM-T būtiski neatšķirās, neuzrādot tīrkultūru atšķirīgu ietekmi. No uzturvērtības viedokļa kailgraudu miežu maize un pilngraudu kviešu maize vērtējama kā šķiedrvielu avots. Atbilstoši Eiropas Pārtikas un nekaitīguma iestādes (EFSA, 2016) rekomendācijām pārtikas produkts saucams par šķiedrvielu avotu, ja produkts satur vismaz $3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, bet ja produkts satur vismaz $6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ šķiedrvielu, tas vērtējams kā augsta šķiedrvielu satura avots. Ņemot vērā kailgraudu miežu maizes mitrumu (45 – 48%) (Murniece et al., 2023), secināms, ka tā atbilst produktam ar augstu šķiedrvielu saturu. EFSA norāda, ka 3 g uzņemtu β -glikānu (uz 30 g ogļhidrātu), samazina holesterīna līmeni asinīs. Kailgraudu miežu maize vērtējama kā nozīmīgs β -glikānu avots normāla

holesterīna līmeņa uzturēšanai. Kailgraudu miežu maizē novērots zems fruktānu saturs, kas, līdzās glutēnam, tiek vērtēts kā kairinātājs cilvēkiem ar zarnu trakta traucējumiem.

Kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizes fizikālo īpašību raksturojums

Fermentācijas rezultātā mainās miltu polisaharīdu sastāvs, kā arī to īpašības, un tas ietekmē maizes fizikālās īpašības. Analizētās maizes mīkstuma cietība, lipīgums, tilpums, īpatnējais tilpums un porainība ir attēloti 3.20. attēlā. Pilngraudu kviešu maizes paraugā PKM- R konstatēta viszemākā mīkstuma cietība 7.2 ± 0.09 N, taču tā būtiski neatšķirās no pilngraudu kviešu maizes PKM-S un PKM-T mīkstuma cietības. Kailgraudu miežu maize KMM-S un KMM-T izceļas ar augstu mīkstuma cietību 12.1 ± 1.1 N un 10.0 ± 1.5 N, un tā konstatēta būtiski augstāka nekā rudzu maizes mīkstuma cietība 4.29 ± 1.13 N (Murniece et al., 2023). Visaugstākais tilpums 752.0 ± 1.9 cm³ noteikts pilngraudu kviešu maizei PKM-R. Paraugs PKM-R izceļas ar visaugstāko porainību (71%), kas liecina par intensīvu raugu aktivitāti un CO₂ izdalīšanos fermentācijas laikā.



3.20. att. Kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizes fizikālie rādītāji /

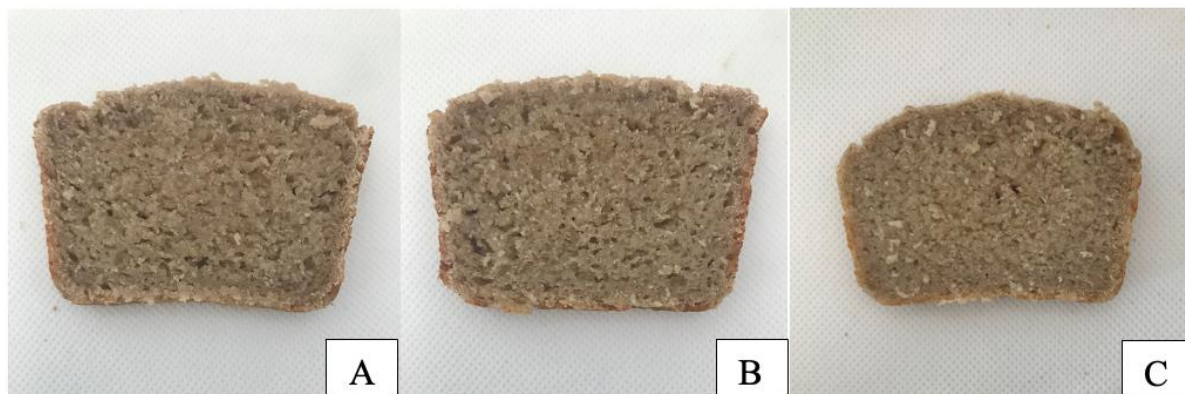
Fig. 3.20. *Physical characteristics of hull-less barley and wholegrain wheat bread*

A – cietība / hardness, N; B – lipīgums / stickiness, N; C – tilpums, volume, cm³; D – porainība / porosity, % E – īpatnējais tilpums / specific volume, cm³ g⁻¹;

kailgraudu miežu maize: KMM-R – gatavota ar raugu; KMM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; KMM-T – ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu; pilngraudu kviešu maize: PKM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; PKM-T – ar tīrkultūrām fermentētu kailgraudu miežu ieraugu; PKM-R – gatavota ar raugu; atšķirīgie burti kolonnu apakšpusē parāda būtiski ($p < 0.05$) atšķirīgās vērtības / hull-less barley bread: HBB-Y – prepared with yeast; HBB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; HBB-T – prepared with starter cultures sourdough; HBB-Y – prepared with yeast; wholegrain wheat bread: WWB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; WWB-T – prepared with sourdough with starter cultures; WWB-Y – wholegrain wheat bread with yeast; different letter within the column indicates that there is significant difference between the values ($p < 0.05$)

Kailgraudu miežu maize ir mazāk poraina, ar neregulārām porām un blīvu mīkstumumu (3.21. att.) pretēji pilngraudu kviešu maizei (3.22. att.). Arī citi pētnieki norādījuši uz miežu

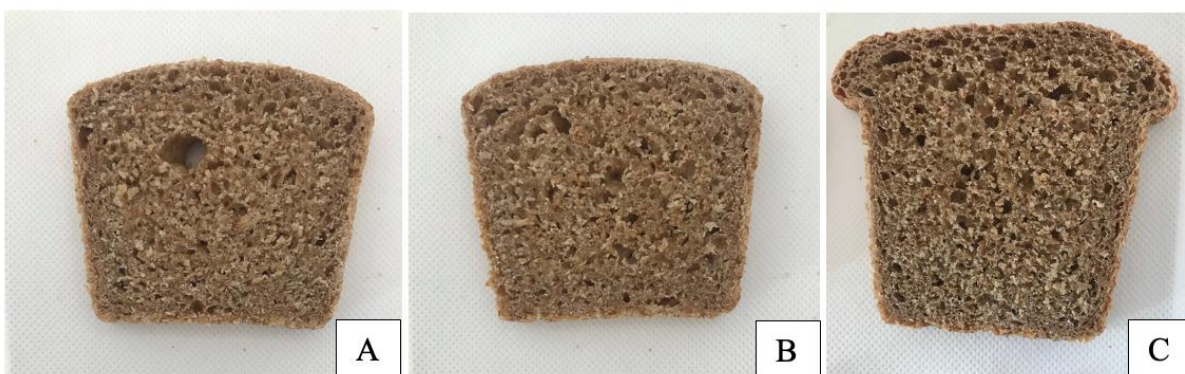
maizes kompakto mīkstuma struktūru un iegarenām neregulāras formas porām (Cakir et al., 2021; Robles-Ramírez et al., 2020). Murniece et al. (2023) parāda, ka kailgraudu miežu maizes porainība un tilpums ir būtiski zemāki nekā rudzu maizei. Miežu maize KMM-R uzskatīta par nepieņemamu, jo konstatēta būtiski augstāka mīkstuma cietība 18.5 ± 1.1 N nekā KMM-S un KMM-T, kā arī blīvās struktūras dēļ nebija iespējams noteikt porainību, mīklas fermentācijas laikā apjoms nepalielinājās, nebija rauga metabolisma pazīmju, kā arī novērota izteikta specifiska garša.



3.21. att. **Kailgraudu miežu maizes mīkstuma attēls /**
Fig. 3.21. Hull-less barley bread crumb image

A – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu (KMM-S) / with hull-less barley spontaneous sourdough (HBB-S); B – ar tūrkultūrām fermentētu ieraugu (KMM-T) / with sourdough with starter cultures (HBB-T); C – ar raugu (KMM-R) / with yeast (HBB-Y)

PKM-R uzrāda visaugstākos fizikālos rādītājus – īpatnējo tilpumu, porainību un zemāko mīkstuma cietību. Taču to raksturoja viszemākie ne-cietes polisaharīdu β -glikānu, mannānu un fruktānu rādītāji, salīdzinot ar pilngraudu kviešu maizēm, kas gatavotas ar kailgraudu miežu ieraugu. Miežu ieraugu pievienošana samazināja tilpumu un porainību, bet nesamazināja mīkstuma cietību, taču būtiski palielināja β -glikānu saturu. Ne-cietes polisaharīdi tiek saukti par bioloģiski aktīviem savienojumiem, kas pozitīvi ietekmē cilvēka veselību. Ne-cietes polisaharīdi darbojas kā prebiotikas. Miežu maizēm KMM-S un KMM-T novēroti līdzīgi fizikālo īpašību rādītāji.

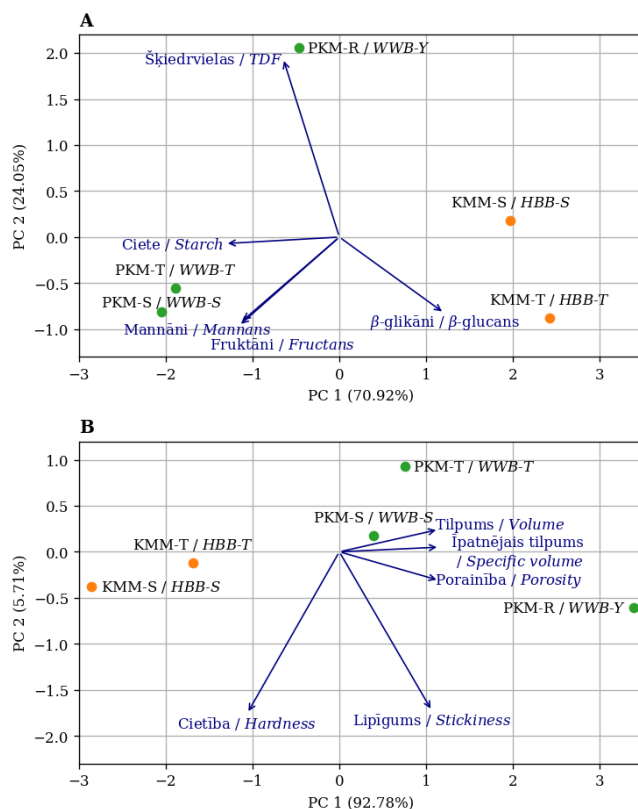


3.22. att. **Pilngraudu kviešu maizes mīkstuma attēls /**
Fig. 3.22. Wholegrain wheat bread crumb image

A – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu (PKM-S) / with hull-less barley spontaneous sourdough (WWB-S); B – ar tūrkultūrām fermentētu ieraugu (PKM-T) / with sourdough with starter cultures (WWB-T); C – ar raugu (PKM-R) / with yeast (WWB-Y)

Lai noteiktu sakarības starp kailgraudu miežu un pilngraudu kviešu maizi un to ķīmiskiem un fizikāliem rādītājiem tika veikta rezultātu galveno komponentu analīze (3.23. att.). Galveno

komponentu analīze parādīja, ka miežu maizi (KMM-S; KMM-T) raksturo augstāks β -glikānu saturs, bet zemāks tilpums un porainība, un izteikta cietība. Pilngraudu kviešu maizes (PKM-S; PKM-T) raksturo augstāks cietes, mannānu, fruktānu saturs un augstāks tilpums, izteiktāka porainība un zemāka cietība. Pilngraudu kviešu maizei ar raugu raksturo izteikts šķiedrvielu saturs. Kailgraudu miežu maizes fizikālās īpašības nosaka β -glikānu saturs. Savstarpējā ķīmisko un fizikālo rādītāju sakarība norāda uz to, ka kailgraudu miežu maizē fermentācijas laikā notikusi nozīmīga ne-cietes polisaharīdu satura samazināšanās. Ne-cietes polisaharīdu sastāvs un īpašības uzskatāmas par vienu no iemesliem struktūru veidojošās šķidrās fāzes nepietiekamībai, kas tika konstatēts mikrostrukturā izpētē 3.3.2. nodaļā. Secināms, ka kailgraudu miežu β -glikāni neveicina šķidrās fāzes veidošanos.



3.23. att. Kailgraudu miežu, pilngraudu kviešu maizes un to ķīmisko un fizikālo rādītāju savstarpējo sakarību attēlojums galveno komponentu analīzes plaknēs /

Fig. 3.23. Relationship between physical and chemical parameters of hull-less barley and wholegrain wheat bread

hull-less barley bread: HBB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; HBB-T – prepared with starter cultures sourdough; wholegrain wheat bread: WWB-S – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; WWB-T – prepared with sourdough with starter cultures; WWB-Y – wholegrain wheat bread with yeast; different letter within the column indicates that there is significant difference between the values ($p < 0.05$)

3.5. nodaļas kopsavilkums / Summary of Chapter 3.5

Maizes gatavošanas procesā notiek miltu uzturvielu kvantitatīvās un kvalitatīvās pārvērtības dažādu mehānisku procesu, hidrolīzes ietekmē, un tas maina maizes uzturvērtību un fizikālās īpašības. Iegūtie rezultāti parāda, ka kailgraudu miežu maizēs cietes un ne-cietes polisaharīdu saturs ir būtiski mazāks nekā kailgraudu miežu miltos. Vislielākais fruktānu samazinājums noteikts kailgraudu miežu maizē ar spontāno ieraugu. Kailgraudu miežu maizēs noteikts zemākais fruktānu saturs, bet augstākais β -glikānu saturs. Cietes un ne-cietes polisaharīdu saturs kailgraudu miežu maizē ar spontāno ieraugu un ar tīrkultūru fermentāciju

būtiski neatšķirās, neuzrādot tīrkultūru atšķirīgu ietekmi. Kailgraudu miežu maizē, kas gatavota ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu, konstatēta mazāka cietība nekā maizē ar spontāno ieraugu. Galveno komponentu analīze parādīja, ka kailgraudu miežu maizi raksturo augstāks β -glikānu saturs, bet lielāka cietība un mazāks tilpums, zema porainība, kamēr pilngraudu kviešu maizi raksturo lielāks tilpums, izteiktāka porainība un augstāks cietes, fruktānu un mannānu saturs. Rezultāti liecina, ka kailgraudu miežu maizes fizikālās īpašības nosaka β -glikānu saturs. Tā kā ierauga fermentācija samazina β -glikānu saturu, tad secināms, ka tā uzlabo maizes fizikālās īpašības. Kailgraudu miežu ieraugs izmantojams gan kailgraudu miežu maizes, gan pilngraudu kviešu maizes gatavošanai. Kailgraudu miežu maize satur augstu šķiedrvielu (15.61 – 16.64% sausnas), īpaši β -glikānu (4.83 – 4.89% sausnas), kā arī fruktānus un mannānus, kas liecina par kailgraudu miežu maizes augsto bioloģisko vērtību.

In breadmaking, quantitative and qualitative modifications of flour components occur under various mechanical processes and hydrolysis, leading to changes in bread's nutritional value and physical properties. The results show that the content of starch and non-starch polysaccharides in hull-less barley bread is significantly lower than in hull-less barley flour. The most substantial reduction in fructans content was determined in hull-less barley bread made with spontaneous hull-less barley sourdough. Hull-less barley bread represents the lowest fructans content, though the highest content of β -glucans. The content of starch and non-starch polysaccharides in hull-less barley bread with spontaneous sourdough and that with starter cultures did not differ significantly, indicating no any noticeable effect of starter cultures. However, the structure of barley bread prepared with spontaneously fermented sourdough was found to be harder than that of bread made with sourdough fermented with starter cultures. Principal component analysis revealed that a higher content of β -glucans characterizes hull-less barley bread but with a firmer crumb structure, smaller specific volume and low porosity. In contrast, wholegrain wheat bread is characterized by higher volume, more pronounced porosity and higher content of starch, fructans and mannans but low β -glucans content. It can be revealed that the content of β -glucans determines the physical properties of hull-less barley bread. Since sourdough fermentation reduces the content of β -glucans, it can be concluded that it enhances the physical properties of bread. Hull-less barley bread includes high fiber (15.61 – 16.64% on a dry weight basis), specifically β -glucans (4.83 – 4.89% dry matter), as well as fructans and mannans content, which demonstrates the high biological value of hull-less barley bread.

SECINĀJUMI / CONCLUSIONS

1. Kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas optimālie tehnoloģiskie parametri trīs posmos noteikti šādi: 1. posmā – pievienotā ūdens daudzums 113 ml 100 g⁻¹ miltu, fermentācijas temperatūra 30 °C un laiks 24 h; 2. posmā – 137 ml ūdens, fermentācijas temperatūra 31 °C un laiks 14 h; 3. posmā – 150 ml ūdens, fermentācijas temperatūra 28.5 °C un laiks 12 h. Kailgraudu miežu spontānā ierauga trīs fermentācijas posmos sasniegti aktīvu ieraugu raksturojošie mikrobioloģiskie un fizikāli ķīmiskie rādītāji: pienskābes baktērijas – 8.2 log₁₀ KVV g⁻¹; raugi 7.3 log₁₀ KVV g⁻¹ un pH 3.8.
 2. Fermentācijas trīs posmos novērota kailgraudu miežu spontānā ierauga mikrobiotas sukcesija. Fermentācijas 2. un 3. posmā konstatēta *Pediococcus pentosaceus* dominēšana un identificēta rauga *Saccharomyces cerevisiae* pārstāvniecība.
 3. Ar pienskābes baktēriju tīrkultūrām *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 un *Pediococcus pentosaceus* P773 un komerciālo rauga kultūru *Saccharomyces cerevisiae* iegūstams aktīvs kailgraudu miežu ieraugs ar augstāku proteolītisko aktivitāti kā spontānais ieraugs.
 4. Kailgraudu miežu ierauga un mīklas mikrostrukturā un reoloģisko īpašību izpēte apstiprina strukturālas izmaiņas fermentācijas rezultātā. Mikrostrukturā rezultāti parādīja, ka struktūra veidojas līdzīgi kā rudzu ieraugā un mīklā.
 5. Kailgraudu miežu maizē ar spontāno ieraugu glutēna saturs samazinājās par 29%, bet maizē ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu par 22% attiecībā pret tā saturu miltos. Maizē ar spontāno ieraugu zemāks glutēna saturs liecina par būtisku proteolīzes nozīmi spontānā fermentācijā.
 6. Augstais β-glikānu saturs ietekmēja maizes fizikālās īpašības. Kailgraudu miežu maizi raksturo, augsta cietība, samazināts tilpums un porainība.
 7. Ierauga fermentācija uzlabo kailgraudu miežu maizes fizikālās īpašības: samazina mīkstuma cietību, uzlabo porainību un tilpumu.
 8. Kailgraudu miežu maize, kas gatavota ar kailgraudu miežu ieraugu, uzskatāma par šķiedrvielu un ne-cietes polisaharīdu, īpaši β-glikānu avotu.
 9. Iegūtie rezultāti **apstiprina** pētījumā izvirzīto **hipotēzi**, ka kailgraudu mieži ir alternatīva izejviela ierauga un maizes gatavošanā.
-
1. *The optimal technological parameters of the spontaneous sourdough fermentation of hull-less barley in three steps are as follows: in the 1st step – the amount of added water is 113 ml per 100 g⁻¹ flour, the fermentation temperature is 30 °C and the time is 24 h; in the 2nd step – 137 ml, fermentation temperature 31 °C and time 14 h; in the 3rd step – the amount of added water is 150 ml, fermentation temperature 28.5 °C and time 12 h. The microbiological and physicochemical indicator characteristics of active yeast were achieved in the spontaneous sourdough of hull-less barley in three steps of fermentation: lactic acid bacteria – 8.2 log₁₀ CFU g⁻¹; yeasts 7.3 log₁₀ CFU g⁻¹ and pH 3.8.*
 2. *Spontaneous succession of sourdough microbiota of hull-less barley was observed in three steps of fermentation. In the 2nd and 3rd stages of fermentation, the prevalence of *Pediococcus pentosaceus* was found, and the dominance of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* was identified.*
 3. *With the starter cultures of lactic acid bacteria *Lactiplantibacillus plantarum* DSMZ 20205 and *Pediococcus pentosaceus* P773 and the commercial yeast culture *Saccharomyces cerevisiae*, an active hull-less barley sourdough characterized by higher proteolytic activity than spontaneous sourdough.*
 4. *The study of the microstructure and rheological properties of hull-less barley sourdough and dough confirmed structural changes due to fermentation. The microstructure results showed that the structure formed similarly to rye sourdough and dough.*
 5. *The gluten content in hull-less barley bread with spontaneous sourdough and bread with sourdough fermented by starter cultures decreased by 29% and 22% relative to its flour*

- content, respectively. The lower gluten content in bread with spontaneous sourdough indicated the pivotal role of proteolysis in spontaneous fermentation.
6. The high content of β -glucans affected the physical properties of bread. Hull-less barley bread is characterized by high crumb hardness, smaller specific volume and porosity.
 7. Sourdough fermentation improved the physical properties of hull-less barley bread: it reduced pulp hardness and improved porosity and volume.
 8. Hull-less barley bread prepared with hull-less barley sourdough was considered a source of fiber and non-starch polysaccharides, especially β -glucans.
 9. The results obtained **proved** the **hypothesis** defined in PhD thesis: hull-less barley is an alternative raw material for sourdough and breadmaking.

REKOMENDĀCIJAS / RECOMMENDATIONS

1. Kailgraudu mieži izmantojami spontānā ierauga fermentācijā. Kailgraudu miežu spontānais ieraugs pēc trešā fermentācijas posma uzskatāms par pienskābes baktērijas *Pediococcus pentosaceus* avotu un izmantojams ierauga, piemēram, rudzu un kviešu fermentācijas uzsākšanai.
 2. Lai ierauga fermentācijas process būtu kontrolējams un prognozējams, kā arī izslēgtu nevēlamās mikrobiotas attīstību, fermentācijas uzsākšanai iesakāma pienskābes baktēriju (*Lactiplantibacillus plantarum* un *Pediococcus pentosaceus* un rauga *Saccharomyces cerevisiae*) tīrkultūru izmantošana.
 3. Maizes gatavošanai no kailgraudu miežu miltiem piemērota spontānā un ar tīrkultūrām fermentēta ierauga izmantošana mīklas fermentācijā. No kailgraudu miežu miltiem gatavotas mīklā ieteicams ieraugu pievienot lielākā daudzumā, piemēram, 37% no miltu masas un palielināt ūdens daudzumu – 70%.
-
1. *Hull-less barley can be used in spontaneous sourdough fermentation. After the third fermentation steps, the spontaneous sourdough of hull-less barley is considered the source of the lactic acid bacteria *Pediococcus pentosaceus*. It can be used to initiate the fermentation of rye and wheat sourdough.*
 2. *For the sourdough fermentation process to be controllable and predictable and to exclude the development of undesirable microbiota, the use of lactic acid bacteria pure cultures (*Lactiplantibacillus plantarum* and *Pediococcus pentosaceus* and yeast *Saccharomyces cerevisiae*) is recommended to initiate the fermentation.*
 3. *In breadmaking, spontaneous and fermented sourdough with starter cultures is suitable for the fermentation of hull-less barley dough. Adding higher sourdough and water amounts is recommended for the preparation of hull-less barley dough, corresponding to 37% and 70% of the flour weight, respectively.*

LITERATŪRAS SARAKSTS / *BIBLIOGRAPHY*

1. Abedfar, A., Hosseini-zhad, M., & Rafe, A. (2020). Effect of microbial exopolysaccharide on wheat bran sourdough: Rheological, thermal and microstructural characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, *154*, 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.149>
2. Abedfar, A., & Sadeghi, A. (2019). Response surface methodology for investigating the effects of sourdough fermentation conditions on Iranian cup bread properties. *Heliyon*, *5*, 02608. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02608>
3. Admire, K., Jornlid, C., & Blackwood, R. A. (2022). Claws and effect: A case of *Pantoea agglomerans* endocarditis following a cat scratch and literature review. *IHJ Cardiovascular Case Reports (CVCR)*, *6*(4), 163–164. <https://doi.org/10.1016/j.ihjccr.2022.11.003>
4. Adnan, M., Siddiqui, A. J., Hamadou, W. S., Ashraf, S. A., Hassan, M. I., Snoussi, M., Badraoui, R., Jamal, A., Bardakci, F., Awadelkareem, A. M., Sachidanandan, M., & Patel, M. (2021). Functional and structural characterization of *Pediococcus pentosaceus*-derived biosurfactant and its biomedical potential against bacterial adhesion, quorum sensing, and biofilm formation. *Antibiotics*, *10*(11), 1371. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10111371>
5. Alves, T. O., D’Almeida, C. T. S., Scherf, K. A., & Ferreira, M. S. L. (2019). Modern approaches in the identification and quantification of immunogenic peptides in cereals by LC-MS/MS. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1470. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01470>
6. Arena, M. P., Caggianiello, G., Fiocco, D., Russo, P., Torelli, M., Spano, G., & Capozzi, V. (2014). Barley β -glucans-containing food enhances probiotic performances of beneficial bacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, *15*(2), 3025–3039. <https://doi.org/10.3390/ijms15023025>
7. 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*(July 2020), 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.008>
8. 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*(1), 15–26. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80024-6](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80024-6)
9. Auziņš, A., Leimane, I., Bleidere, M., Šterna, V., & Krieviņa, A. (2021). Opportunities for commercialization of high-protein barley: case of new variety 'Kornelija' *Rural Sustainability Research*, *46*(341), 75–89. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0019>
10. Badea, A., & Wijekoon, C. (2021). Benefits of barley grain in animal and human diets. In *Cereal Grains - Volume 1*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97053>
11. Baik, B. K., & Ullrich, S. E. (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, *48*, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.02.002>
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. Ballance, G. M., Meredith, W. O. S., & Laberge, D. E. (1976). Distribution and development of endo- β -glucanase activities in barley tissues during germination. *Canadian Journal of Plant Science*, *56*(3), 459–466. <https://doi.org/10.4141/cjps76-076>
14. 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(1). <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010064>
15. Beck, M., Jekle, M., Selmair, P. L., Koehler, P., & Becker, T. (2011). Rheological properties and baking performance of rye dough as affected by transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 54(1), 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.01.012>
 16. Beinaroviča, I., Bleidere, M., Piliksere, D., Aija, V., Gaiķe, M., & Legzdiņa, L. (2012). Vasaras kailgraudu miežu šķirnes 'Irbe' izveidošana. *Zinātniski Praktiskā Konference Līdzsvarota Lauksaimniecība*.
 17. Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). *Food chemistry*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1201/b18894-16>
 18. Bertrand, R. L. (2019). Lag phase is a dynamic, organized, adaptive, and evolvable period that prepares bacteria for cell division. *Journal of Bacteriology*, 201(7), e00697-18. <https://doi.org/10.1128/JB.00697-18>
 19. Bessmeltseva, M., Viiard, E., Simm, J., Paalme, T., & Sarand, I. (2014). Evolution of bacterial consortia in spontaneously started rye sourdoughs during two months of daily propagation. *PLoS ONE*, 9(4), 10–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095449>
 20. Bleidere, M. (2010). *Graudu kvalitātes izvērtējums lopbarības miežu selekcijai Latvijā: promocijas darba kopsavilkums Dr.agr. zinātn. grāda iegūšanai*. LLU.
 21. Bleidere, M., Grunte, I., & Legzdiņa, L. (2020). Performance and stability of agronomic and grain quality traits of Latvian spring barley varieties. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 74(4), 270–279. <https://doi.org/10.2478/prolas-2020-0042>
 22. Borén, M., Larsson, H., Falk, A., & Jansson, C. (2004). The barley starch granule proteome - internalized granule polypeptides of the mature endosperm. *Plant Science*, 166(3), 617–626. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.028>
 23. Bose, U., Juhász, A., Yu, R., Bahmani, M., Byrne, K., Blundell, M., Broadbent, J. A., Howitt, C. A., & Colgrave, M. L. (2021). Proteome and nutritional shifts observed in hordein double-mutant barley lines. *Frontiers in Plant Science*, 12(September). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.718504>
 24. Bradauskiene, V., Vaiciulyte-Funk, L., Shah, B. R., Cernauskas, D., & Tita, M. A. (2021). Recent advances in biotechnological methods for wheat gluten immunotoxicity abolishment - A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 71(1), 5–20. <https://doi.org/10.31883/pjfn/132853>
 25. Brandt, M. J., & Gänzle, M. G. (2006). Handbuch Sauerteig. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
 26. Brennan, C. S., Harris, N., Smith, D., & Shewry, P. R. (1996). Structural differences in the mature endosperms of good and poor malting barley cultivars. *Journal of Cereal Science*, 24(2), 171–177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0050>
 27. Bugyi, Z., Muskovics, G., Schall, E., Török, K., Hajas, L., Scherf, K., Xhaferaj, M., Koehler, P., Schoenlechner, R., D'Amico, S., Poms, R., & Tömösközi, S. (2022). Classics in a new perspective: gluten as a special food safety and analytical challenge. *Elelmiszervizsgalati Kozlemenyek*, 68(4), 4190–4198. <https://doi.org/10.52091/EVIK-2022/4-4-ENG>
 28. Cakir, E., Arici, M., & Durak, M. Z. (2021). Effect of starter culture sourdough prepared with *Lactobacilli* and *Saccharomyces cerevisiae* on the quality of hull-less barley-wheat bread. *LWT*, 152, 112230. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112230>
 29. Çakır, E., Arici, M., & Durak, M. Z. (2020). Biodiversity and techno-functional properties of lactic acid bacteria in fermented hull-less barley sourdough. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 130(5), 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.05.002>
 30. 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>
31. Chen, L., Fincher, G. B., & Høj, P. B. (1993). Evolution of polysaccharide hydrolase substrate specificity: Catalytic amino acids are conserved in barley 1,3-1,4- and 1,3- β -glucanases. *Journal of Biological Chemistry*, 268(18), 13318–13326. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)38654-5](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)38654-5)
 32. Cizeikiene, 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>
 33. Comino, P., Shelat, K., Collins, H., Lahnstein, J., & Gidley, M. J. (2013). Separation and purification of soluble polymers and cell wall fractions from wheat, rye and hull less barley endosperm flours for structure-nutrition studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(49), 12111–12122. <https://doi.org/10.1021/jf403558u>
 34. Corsetti, A., Settanni, L., Valmorri, S., Mastrangelo, M., & Suzzi, G. (2007). Identification of subdominant sourdough lactic acid bacteria and their evolution during laboratory-scale fermentations. *Food Microbiology*, 24(6), 592–600. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2007.01.002>
 35. Dabina, I. (2013). *Antioksidantu dinamika iesala un alus ražošanā: promocijas darbs inženierzinātņu zinātniskā grāda iegūšanai pārtikas zinātnes nozarē*. Latvijas Lauksaimniecības universitāte.
 36. Dancite, D., Zagorska, J., Kince, T., & Sterna, V. (2021). Application of hull-less barley variety 'Kornelija' grains for yogurt development. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 75(6), 432–437. <https://doi.org/10.2478/prolas-2021-0064>
 37. Day, L. (2013). Proteins from land plants – Potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science & Technology*, 32(1), 25–42. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2013.05.005>
 38. De Angelis, M., Minervini, F., Siragusa, S., Rizzello, C. G., & Gobbetti, M. (2019). Wholemeal wheat flours drive the microbiome and functional features of wheat sourdoughs. *International Journal of Food Microbiology*, 302(May), 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.009>
 39. De Vuyst, L., Comasio, A., & Kerrebroeck, S. Van. (2021). Sourdough production: fermentation strategies, microbial ecology, and use of non-flour ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 0(0), 1–33. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1976100>
 40. De Vuyst, L., & Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science and Technology*, 16(1–3), 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>
 41. 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>
 42. Demirkesen-Bicak, H., Arici, M., Yaman, M., Karasu, S., & Sagdic, O. (2021). Effect of different fermentation condition on estimated glycemic index, in vitro starch digestibility, and textural and sensory properties of sourdough bread. *Foods*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030514>
 43. Di Cagno, R., Barbato, M., Di Camillo, C., Rizzello, C. G., De Angelis, M., Giuliani, G., De Vincenzi, M., Gobbetti, M., & Cucchiara, S. (2010). Gluten-free sourdough wheat baked goods appear safe for young celiac patients: a pilot study. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 51(6), 777–783. <https://doi.org/10.1097/mpg.0b013e3181f22ba4>
 44. Di Cagno, R., Pontonio, E., Buchin, S., De Angelis, M., Lattanzi, A., Valerio, F., Gobbetti, M., & Calasso, M. (2014). Diversity of the lactic acid bacterium and yeast microbiota in

- the switch from firm- to liquid-sourdough fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(10), 3161–3172. <https://doi.org/10.1128/AEM.00309-14>
45. Djurle, S., Andersson, A. A. M., & Andersson, R. (2016). Milling and extrusion of six barley varieties, effects on dietary fibre and starch content and composition. *Journal of Cereal Science*, 72, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.017>
 46. Djurle, S., Andersson, A. A. M., & Andersson, R. (2018). Effects of baking on dietary fibre, with emphasis on β -glucan and resistant starch, in barley breads. *Journal of Cereal Science*, 79, 449–455. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.017>
 47. Dornez, E., Holopainen, U., Cuyvers, S., Poutanen, K., Delcour, J. A., Courtin, C. M., & Nordlund, E. (2011). Study of grain cell wall structures by microscopic analysis with four different staining techniques. *Journal of Cereal Science*, 54(3), 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.07.003>
 48. EFSA. (2016). Scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA Journal*, 8(3), 1–77. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1462>
 49. EL Houssni, I., Khedid, K., Zahidi, A., & Hassikou, R. (2023). The inhibitory effects of lactic acid bacteria isolated from sourdough on the mycotoxigenic fungi growth and mycotoxins from wheat bread. In *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (Vol. 50). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102702>
 50. EU. (2009). *Commission Regulation (EC) No 41/2009 of 20 January 2009 concerning the composition and labelling of foodstuffs suitable for people intolerant to gluten* (p. L 16/3). Official Journal of the European Union.
 51. FDA. (2018). *Microorganisms & Microbial-Derived Ingredients Used in Food. Code of Federal Regulations* (p. Title 21, 21CFR, 172-173). US Food and Drug Administration.
 52. Fox, G. P., Onley Watson, K., & Osman, A. (2002). Multiple linear regression calibrations for barley and malt protein based on the spectra of hordein. *Journal of the Institute of Brewing*, 108(2), 155–159.
 53. François, J. M. (2007). A simple method for quantitative determination of polysaccharides in fungal cell walls. *Nature Protocols*, 1(6), 2995–3000. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.457>
 54. Fu, W., Liu, C., Meng, X., Tao, S., & Xue, W. (2021). Co-culture fermentation of *Pediococcus acidilactici* XZ31 and yeast for enhanced degradation of wheat allergens. *International Journal of Food Microbiology*, 347, 109190. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109190>
 55. Galle, S., Schwab, C., Arendt, E. K., & Gänzle, M. G. (2011). Structural and rheological characterisation of heteropolysaccharides produced by lactic acid bacteria in wheat and sorghum sourdough. *Food Microbiology*, 28(3), 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.11.006>
 56. 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>
 57. Gänzle, M. G., Loponen, J., & Gobbetti, 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>
 58. Gänzle, M. G., Qiao, N., & Bechtner, J. (2023). The quest for the perfect loaf of sourdough bread continues: Novel developments for selection of sourdough starter cultures. *International Journal of Food Microbiology*, 407, 110421. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110421>
 59. Gerez, C. L., Dallagnol, A., Rollán, G., & Font de Valdez, G. (2012). A combination of two lactic acid bacteria improves the hydrolysis of gliadin during wheat dough fermentation. *Food Microbiology*, 32(2), 427–430. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.06.007>
 60. Gil-Humanes, J., Pistón, F., Altamirano-Fortoul, R., Real, A., Comino, I., Sousa, C., Rosell, C. M., & Barro, F. (2014). Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the

- gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. *PLoS ONE*, 9(3), e90898. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090898>
61. Gobbetti, M. (1998). The sourdough microflora: Interactions of lactic acid bacteria and yeasts. *Trends in Food Science & Technology*, 9(7), 267–274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00053-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00053-3)
 62. Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M., Archetti, G., & Rizzello, C. G. (2019). Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>
 63. Gobbetti, M., & Gänzle, M. (2013). Handbook on sourdough biotechnology. In *Handbook on Sourdough Biotechnology*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5425-0>
 64. Goudar, G., Sharma, P., Janghu, S., & Longvah, T. (2020). Effect of processing on barley β -glucan content, its molecular weight and extractability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1204–1216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.208>
 65. Graça, C., Lima, A., Raymundo, A., & Sousa, I. (2021). Sourdough fermentation as a tool to improve the nutritional and health-promoting properties of its derived-products. *Fermentation*, 7(4), 246. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040246>
 66. Haraszi, R., Chassaing, H., Maquet, A., & Ulberth, F. (2011). Analytical methods for detection of gluten in food-method developments in support of food labeling legislation. *Journal of AOAC International*, 94(4), 1006–1025. <https://doi.org/10.1093/jaoac/94.4.1006>
 67. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
 68. Harth, H., Van Kerrebroeck, S., & De Vuyst, L. (2016). Community dynamics and metabolite target analysis of spontaneous, backslopped barley sourdough fermentations under laboratory and bakery conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 228, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.04.011>
 69. Huys, G., Daniel, H. M., & De Vuyst, L. (2013). Taxonomy and biodiversity of sourdough yeasts and lactic acid bacteria. In M. Gobbetti & M. Ganzle (Eds.), *Handbook on Sourdough Biotechnology* (p. 298). Springer, New York.
 70. Ispiryan, L., Kuktaite, R., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2021). Fundamental study on changes in the FODMAP profile of cereals, pseudo-cereals, and pulses during the malting process. *Food Chemistry*, 343, 128549. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128549>
 71. Ispiryan, L., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2020). Characterization of the FODMAP-profile in cereal-product ingredients. *Journal of Cereal Science*, 92, 102916.
 72. 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>
 73. Janssen, F., Wouters, A. G. B., Chatzigiannakis, E., Delcour, J. A., & Vermant, J. (2021). Thin film drainage dynamics of wheat and rye dough liquors and oat batter liquor. *Food Hydrocolloids*, 116, 106624. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106624>
 74. Janssen, F., Wouters, A. G. B., Meeus, Y., Moldenaers, P., Vermant, J., & Delcour, J. A. (2020). The role of non-starch polysaccharides in determining the air-water interfacial properties of wheat, rye, and oat dough liquor constituents. *Food Hydrocolloids*, 105(January), 105771. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105771>
 75. Jiang, S., Cai, L., Lv, L., & Li, L. (2021). *Pediococcus pentosaceus*, a future additive or probiotic candidate. *Microbial Cell Factories*, 20(1), 20:45. <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01537-y>

76. Katina, K., Heiniö, R. L., Autio, K., & Poutanen, K. (2006). Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread. *LWT - Food Science and Technology*, *39*(10), 1189–1202. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.08.001>
77. Katsi, P., Kosma, I. S., Michailidou, S., Argiriou, A., Badeka, A. V., & Kontominas, M. G. (2021). Characterization of artisanal spontaneous sourdough wheat. *Foods*, *10*, 635.
78. Kerpes, R., Knorr, V., Procopio, S., Koehler, P., & Becker, T. (2016). Gluten-specific peptidase activity of barley as affected by germination and its impact on gluten degradation. *Journal of Cereal Science*, *68*, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.01.004>
79. 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>
80. 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.
81. Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2010). Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review. *Food Chemistry*, *120*(4), 945–959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.052>
82. Kunkulberga, D., & Segliņš, V. (2010). *Maizes ražošanas tehnoloģija*. Rīga: RTU Izdevniecība.
83. Leroy, F., De Winter, T., Remedios, M., Moreno, F., & De Vuyst, L. (2007). The bacteriocin producer *Lactobacillus amylovorus* DCE 471 is a competitive starter culture for type II sourdough fermentations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *87*(9), 1726–1736. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.2903>
84. Lexhaller, B., Tompos, C., & Scherf, K. A. (2017). Fundamental study on reactivities of gluten protein types from wheat, rye and barley with five sandwich ELISA test kits. *Food Chemistry*, *237*, 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.121>
85. 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>
86. Li, H., Vasanthan, T., Rossnagel, B., & Hoover, R. (2001). Starch from hull-less barley: I. Granule morphology, composition and amylopectin structure. *Food Chemistry*, *74*(4), 395–405. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00246-1)
87. Lim, Y. H., Foo, H. L., Loh, T. C., Mohamad, R., & Abdullah, N. (2019). Comparative studies of versatile extracellular proteolytic activities of lactic acid bacteria and their potential for extracellular amino acid productions as feed supplements. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *10*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0323-z>
88. Liu, M., Bayjanov, J. R., Renckens, B., Nauta, A., & Siezen, R. J. (2010). The proteolytic system of lactic acid bacteria revisited: A genomic comparison. *BMC Genomics*, *11*(1), 36. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-36>
89. Loponen, J., & Gänzle, M. G. (2018). Use of sourdough in low FODMAP baking. *Foods*, *7*(96). <https://doi.org/10.3390/foods7070096>
90. Loponen, J., Mikola, M., Katina, K., Sontag-Strohm, T., & Salovaara, H. (2004). Degradation of HMW glutenins during wheat sourdough fermentations. *Cereal Chemistry*, *81*(1), 87–93. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.1.87>
91. Loveday, S. M. (2019). Food proteins: technological, nutritional, and sustainability attributes of traditional and emerging proteins. *Annual Review of Food Science and Technology*, *10*, 311–339. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121128>
92. Lukinac, J., & Jukić, M. (2022). Barley in the production of cereal-based products. *Plants*, *11*, 3519. <https://doi.org/10.3390/plants11243519>

93. Maina, N. H., Rieder, A., De Bondt, Y., Mäkelä-Salmi, N., Sahlström, S., Mattila, O., Lamothe, L. M., Nyström, L., Courtin, C. M., Katina, K., & Poutanen, K. (2021). Process-induced changes in the quantity and characteristics of grain dietary fiber. *Foods*, *10*, 2566. <https://doi.org/10.3390/foods10112566>
94. Majore, K., Šterna, V., Bleidere, M., Reidzāne, S., & Ciproviča, I. (2021). In-vitro study on fermentation characteristics of different hullless barley cultivar flakes. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences.*, *75*(6), 438–443. <https://doi.org/10.2478/prolas-2021-0065>
95. Marchesi, J. R., & Ravel, J. (2015). The vocabulary of microbiome research: a proposal. *Microbiome*, *3*(31). <https://doi.org/10.1186/s40168-015-0094-5>
96. Mariotti, M., Garofalo, C., Aquilanti, L., Osimani, A., Fongaro, L., Tavoletti, S., Hager, A. S., & Clementi, F. (2014). Barley flour exploitation in sourdough bread-making: A technological, nutritional and sensory evaluation. *LWT - Food Science and Technology*, *59*, 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.052>
97. Martínez-Subirà, M., Romero, M. P., Puig, E., Macià, A., Romagosa, I., & Moralejo, M. (2020). Purple, high β -glucan, hullless barley as valuable ingredient for functional food. *LWT*, *131*, 109582. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109582>
98. Meints, B., Vallejos, C., & Hayes, P. (2021). Multi-use naked barley: A new frontier. *Journal of Cereal Science*, *102*, 103370. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103370>
99. Mežaka, I. (2018). *Videi draudzīgā un bioloģiskā lauksaimniecībā vasaras miežiem (Hordeum vulgare L.) nozīmīgu pazīmju ģenētiskā kartēšana: promocijas darbs doktora grāda iegūšani bioloģijas nozarē*. Latvijas Universitāte.
100. Minervini, F., De Angelis, M., Di Cagno, R., & Gobbetti, M. (2014). Ecological parameters influencing microbial diversity and stability of traditional sourdough. *International Journal of Food Microbiology*, *171*, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.021>
101. Minervini, F., De Angelis, M., Di Cagno, R., Pinto, D., Siragusa, S., Rizzello, C. G., & Gobbetti, M. (2010). Robustness of *Lactobacillus plantarum* starters during daily propagation of wheat flour sourdough type I. *Food Microbiology*, *27*(7), 897–908. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.05.021>
102. Minervini, F., Lattanzi, A., De Angelis, M., Celano, G., & Gobbetti, M. (2015). House microbiotas as sources of lactic acid bacteria and yeasts in traditional Italian sourdoughs. *Food Microbiology*, *52*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.06.009>
103. Mir, S. A., Manickavasagan, A., & Shah, M. A. (Eds.). (2019). *Whole grains. Processing, product development and nutrition aspects*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019.
104. Muir, J. G., Varney, J. E., Ajamian, M., & Gibson, P. R. (2019). Gluten-free and low-FODMAP sourdoughs for patients with coeliac disease and irritable bowel syndrome: A clinical perspective. *International Journal of Food Microbiology*, *290*(July), 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.10.016>
105. 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>
106. Nakov, G., Jukić, M., Šimić, G., Šumanovac, F., Komlenić, D. K., & Lukinac, J. (2022). Effect of the addition of hullless barley flour on the quality of short-dough cookies. *Foods*, *11*, 2428. <https://doi.org/10.3390/foods11162428>
107. Nemeth, C., Andersson, A. A. M., Andersson, R., Mangelsen, E., Sun, C., & Åman, P. (2014). Relationship of grain fructan content to degree of polymerisation in different barleys. *Food and Nutrition Sciences*, *5*, 581–589. <https://doi.org/10.4236/fns.2014.56068>
108. Newman, C. W., & Newman, R. K. (2006). A brief history of barley foods. *Cereal Foods World*, *51*(1), 4–7. <https://doi.org/10.1094/cfw-51-0004>
109. Oshiro, M., Tanaka, M., Zendo, T., & Nakayama, J. (2020). Impact of pH on succession

- of sourdough lactic acid bacteria communities and their fermentation properties. *Bioscience of Microbiota, Food and Health*, 39(3), 152–159. <https://doi.org/10.12938/bmfh.2019-038>
110. Oshiro, M., Zendo, T., & Nakayama, J. (2021). Diversity and dynamics of sourdough lactic acid bacteriota created by a slow food fermentation system. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 131(4), 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.11.007>
 111. Otero, E. A., Miralles, D. J., Peton, A., Conti, V. A., Giménez, F. J., & Benech-Arnold, R. L. (2021). On-field assessment of the environmental modulation of malting quality in barley crops. *Field Crops Research*, 271, 108252. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108252>
 112. Panda, R., & Garber, E. A. E. (2019). Detection and quantitation of gluten in fermented-hydrolyzed foods by antibody-based methods: Challenges, progress, and a potential path forward. *Frontiers in Nutrition*, 6(97). <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00097>
 113. Pauly, A., Pareyt, B., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2014). Fermentation affects the composition and foaming properties of the aqueous phase of dough from soft wheat flour. *Food Hydrocolloids*, 37, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.11.008>
 114. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
 115. Pejcz, E., Czaja, A., Wojciechowicz-Budzisz, A., Gil, Z., & Szychaj, R. (2017). The potential of naked barley sourdough to improve the quality and dietary fibre content of barley enriched wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 77, 97–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.08.007>
 116. Pejcz, E., Gil, Z., Wojciechowicz-Budzisz, A., Póltorak, M., & Romanowska, A. (2015). Effect of technological process on the nutritional quality of naked barley enriched rye bread. *Journal of Cereal Science*, 65, 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.015>
 117. Perri, G., Rizzello, C. G., Ampollini, M., Celano, G., Coda, R., Gobbetti, M., De Angelis, M., & Calasso, M. (2021). Bioprocessing of barley and lentil grains to obtain in situ synthesis of exopolysaccharides and composite wheat bread with improved texture and health properties. *Foods*, 10, 1489. <https://doi.org/10.3390/foods10071489>
 118. Petrovska-Avramenko, N., Karklina, D., & Gedrovica, I. (2017). Water soluble vitamins B1, B2 and B3 in triticale and hull-less barley grains. *Food Science and Technology in a Changing World*, 207–209. <https://doi.org/10.22616/foodbalt.2017.039>
 119. Porto, M. C. W., Kuniyoshi, T. M., Azevedo, P. O. S., Vitolo, M., & Oliveira, R. P. S. (2017). *Pediococcus* spp.: An important genus of lactic acid bacteria and pediocin producers. *Biotechnology Advances*, 35, 361–374. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.03.004>
 120. Poutanen, K., Flander, L., & Katina, K. (2009). Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective. *Food Microbiology*, 26, 693–699. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.011>
 121. Poutanen, K. S., Kårlund, A. O., Gómez-Gallego, C., Johansson, D. P., Scheers, N. M., Marklinder, I. M., Eriksen, A. K., Silventoinen, P. C., Nordlund, E., Sozer, N., Hanhineva, K. J., Kolehmainen, M., & Landberg, R. (2022). Grains - a major source of sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*, 80(6), 1648–1663. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab084>
 122. Punia, S. (2020). Barley starch: Structure, properties and in vitro digestibility - A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 155, pp. 868–875). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.219>
 123. Punia, S., Siroha, A. K., Sandhu, K. S., & Kaur, M. (2019). Rheological behavior of wheat starch and barley resistant starch (type IV) blends and their starch noodles making potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 595–604.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.009>
124. R Core Team. (2020). A Language and Environment for Statistical Computing. *R Foundation for Statistical Computing*, 3. <http://www.r-project.org>
 125. Reale, A., Di Stasio, L., Di Renzo, T., De Caro, S., Ferranti, P., Picariello, G., Addeo, F., & Mamone, G. (2021). Bacteria do it better! Proteomics suggests the molecular basis for improved digestibility of sourdough products. *Food Chemistry*, 359, 129955. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129955>
 126. Reback, J., jbrockmendel, McKinney, W., Bossche, J. Van den, Roeschke, M., Augspurger, T., Hawkins, S., Cloud, P., gfyong, Hoefler, P., Sinhrks, Klein, A., Petersen, T., Tratner, J., She, C., Ayd, W., Shadrach, R., Naveh, S., Garcia, M., ... Li, T. (2022). pandas-dev/pandas: Pandas 1.4.4. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7037953>
 127. Reidzane, S., Gramatina, I., Galoburda, R., Komasilovs, V., Zacepins, A., Bljahhina, A., Kince, T., Traksmā, A., & Klava, D. (2023). Composition of polysaccharides in hull-less barley sourdough bread and their impact on physical properties of bread. *Foods*, 12, 155. <https://doi.org/10.3390/foods12010155>
 128. Reidzane, S., Kruma, Z., Kazantseva, J., Traksmā, 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>
 129. Rizzello, C. G., Calasso, M., Campanella, D., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2014). Use of sourdough fermentation and mixture of wheat, chickpea, lentil and bean flours for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of white bread. *International Journal of Food Microbiology*, 180, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.04.005>
 130. Rizzello, C. G., Nionelli, L., Coda, R., & Gobbetti, M. (2012). Synthesis of the cancer preventive peptide lunasin by lactic acid bacteria during sourdough fermentation. *Nutrition and Cancer*, 64(1), 111–120. <https://doi.org/10.1080/01635581.2012.630159>
 131. Rizzello, C. G., Portincasa, P., Montemurro, M., di Palo, D. M., Lorusso, M. P., de Angelis, M., Bonfrate, L., Genot, B., & Gobbetti, M. (2019). Sourdough fermented breads are more digestible than those started with baker's yeast alone: An in vivo challenge dissecting distinct gastrointestinal responses. *Nutrients*, 11, 2954. <https://doi.org/10.3390/nu11122954>
 132. Robles-Ramírez, M. del C., Ortega-Robles, E., Monterrubio-López, R., Mora-Escobedo, R., & Beltrán-Orozco, M. del C. (2020). Barley bread with improved sensory and antioxidant properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22, 100279. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100279>
 133. Salminen, S., & Wright, A. (Eds). (2004). *Lactic Acid Bacteria: microbiological and functional aspects* (Third Edit). New York: Marcel Dekker, Inc. <https://doi.org/10.1201/9780824752033>
 134. Salt, L. J., Wilde, P. J., Georget, D., Wellner, N., Skeggs, P. K., & Mills, E. N. C. (2006). Composition and surface properties of dough liquor. *Journal of Cereal Science*, 43, 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.12.013>
 135. Scazzina, F., Del Rio, D., Pellegrini, N., & Brighenti, F. (2009). Sourdough bread: Starch digestibility and postprandial glycemic response. *Journal of Cereal Science*, 49, 419–421. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.12.008>
 136. Schalk, K., Lexhaller, B., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2017). Isolation and characterization of gluten protein types from wheat, rye, barley and oats for use as reference materials. *PLoS ONE*, 12(2), e0172819. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172819>
 137. Scherf, K. A., Catassi, C., Chirido, F. G., Ciclitira, P. J., Feighery, C. F., Gianfrani, C., Koning, F., Lundin, K. E. A., Masci, S., Schuppan, D., Smulders, M. J. M., Tranquet, O., Troncone, R., & Koehler, P. (2021). Statement of the Prolamin Working Group on the

- determination of gluten in fermented foods containing partially hydrolyzed gluten. *Frontiers in Nutrition*, 7, 626712. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.626712>
138. Scherf, K. A., Wieser, H., & Koehler, P. (2018). Novel approaches for enzymatic gluten degradation to create high-quality gluten-free products. *Food Research International*, 110, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.021>
 139. Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: econometric and statistical modeling with Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 92–96. <https://doi.org/10.25080/majora-92bf1922-011>
 140. Semjonovs, P., & Zikmanis, P. (2008). Evaluation of novel lactose-positive and exopolysaccharide-producing strain of *Pediococcus pentosaceus* for fermented foods. *European Food Research and Technology*, 227, 851–856. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0796-4>
 141. Serena, G., D'Avino, P., & Fasano, A. (2020). Celiac disease and non-celiac wheat sensitivity: state of art of non-dietary therapies. *Frontiers in Nutrition*, 7(152). <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00152>
 142. Shewry, P., & Ullrich, S. E. (2014). *Barley: Chemistry and Technology*. AACC International.
 143. Singh, S., Singh, G., & Arya, S. K. (2018). Mannans: An overview of properties and application in food products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.130>
 144. Siragusa, S., Di Cagno, R., Ercolini, D., Minervini, F., Gobbetti, M., & De Angelis, M. (2009). Taxonomic structure and monitoring of the dominant population of lactic acid bacteria during wheat flour sourdough type I propagation using *Lactobacillus sanfranciscensis* starters. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(4), 1099–1109. <https://doi.org/10.1128/AEM.01524-08>
 145. Spicher, G., & Stephan, H. (1993). *Handbuch Sauerteig: Biology, Biochemie, Technologie*. Hamburg: BBV Wirtschaftsinformationen GmbH.
 146. Šterna, V., Segliņa, D., Krasnova, I., Kince, T., Jansone, Z., & Bleidere, M. (2022). Sprouted hullless barley grains and their application possibilities for the functional sweet snacks development. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences.*, 76(1), 116–123. <https://doi.org/10.2478/prolas-2022-0018>
 147. Šterna, V., Zute, S., & Jakobsone, I. (2015). Grain composition and functional ingredients of barley varieties created in Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 69(4), 158–162. <https://doi.org/10.1515/prolas-2015-0023>
 148. 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>
 149. Sturite, I., Kronberga, A., Strazdina, V., Kokare, A., Aassveen, M., Bergjord Olsen, A. K., Sterna, V., & Straumite, E. (2019). Adaptability of hull-less barley varieties to different cropping systems and climatic conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 69(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1481995>
 150. Tanner, G. J., Colgrave, M. L., Blundell, M. J., Goswami, H. P., & Howitt, C. A. (2013). Measuring hordein (gluten) in beer - a comparison of ELISA and mass spectrometry. *PLoS ONE*, 8(2), e56452. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056452>
 151. Thuany, T., Lima, M., Oliveira, B. De, Dea, J. De, Pirozi, R., & Martin, P. (2023). How to deliver sourdough with appropriate characteristics for the bakery industry ? The answer may be provided by microbiota. *Food Bioscience*, 56, 103072. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103072>
 152. Torbica, A., Belović, M., Popović, L., Čakarević, J., Jovičić, M., & Pavličević, J. (2021).

- Comparative study of nutritional and technological quality aspects of minor cereals. *Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 311–322. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04544-w>
153. Torbica, A., Radosavljević, M., Belović, M., Djukić, N., & Marković, S. (2022). Overview of nature, frequency and technological role of dietary fibre from cereals and pseudocereals from grain to bread. *Carbohydrate Polymers*, 290, 119470. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119470>
 154. Van Kerrebroeck, S., Maes, D., & De Vuyst, L. (2017). Sourdoughs as a function of their species diversity and process conditions, a meta-analysis. *Trends in Food Science and Technology*, 68, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.016>
 155. Varney, J., Barrett, J., Scarlata, K., Catsos, P., Gibson, P. R., & Muir, J. G. (2017). FODMAPs: food composition, defining cutoff values and international application. *Journal of Gastroenterology and Hepatology (Australia)*, 32, 53–61. <https://doi.org/10.1111/jgh.13698>
 156. Verherbruggen, Y., Falourd, X., Sterner, M., Guillon, F., Girousse, C., Foucat, L., Le Gall, S., Chateigner-Boutin, A. L., & Saulnier, L. (2019a). Challenging the putative structure of mannan in wheat (*Triticum aestivum*) endosperm. *Carbohydrate Polymers*, 224(July). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115063>
 157. Verherbruggen, Y., Falourd, X., Sterner, M., Guillon, F., Girousse, C., Foucat, L., Le Gall, S., Chateigner-Boutin, A. L., & Saulnier, L. (2019b). Challenging the putative structure of mannan in wheat (*Triticum aestivum*) endosperm. *Carbohydrate Polymers*, 224(115063). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115063>
 158. Verma, D. K., Patel, A. R., Thakur, M., Singh, S., Tripathy, S., Srivastav, P. P., Chávez-González, M. L., Gupta, A. K., & Aguilar, C. N. (2021). A review of the composition and toxicology of fructans, and their applications in foods and health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 99, 103884. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103884>
 159. Verspreet, J., Dornez, E., van den Ende, W., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2015). Cereal grain fructans: Structure, variability and potential health effects. *Trends in Food Science and Technology*, 43(1), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.01.006>
 160. Vrancken, G., Rimaux, T., Weckx, S., Leroy, F., & De Vuyst, L. (2011). Influence of temperature and backslopping time on the microbiota of a type I propagated laboratory wheat sourdough fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(8), 2716–2726. <https://doi.org/10.1128/AEM.02470-10>
 161. Wang, Y. X., Li, L. Y., Zhang, T., Wang, J. Q., Huang, X. J., Hu, J. L., Yin, J. Y., & Nie, S. P. (2021a). Fractionation, physicochemical and structural characterization of polysaccharides from barley water-soluble fiber. *Food Hydrocolloids*, 113(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106539>
 162. Wang, Y. X., Li, L. Y., Zhang, T., Wang, J. Q., Huang, X. J., Hu, J. L., Yin, J. Y., & Nie, S. P. (2021b). Fractionation, physicochemical and structural characterization of polysaccharides from barley water-soluble fiber. *Food Hydrocolloids*, 113, 106539. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106539>
 163. Weckx, S., Van der Meulen, R., Maes, D., Scheirlinck, I., Huys, G., Vandamme, P., & De Vuyst, L. (2010). Lactic acid bacteria community dynamics and metabolite production of rye sourdough fermentations share characteristics of wheat and spelt sourdough fermentations. *Food Microbiology*, 27(8), 1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.06.005>
 164. Weipert, D. (1990). The benefits of basic rheometry in studying dough rheology. *Cereal Chemistry*, 67(4), 311–317.
 165. Wójcik, M., Różyło, R., Łysiak, G., Kulig, R., & Cacak-Pietrzak, G. (2021). Textural and sensory properties of wheat bread fortified with nettle (*Urtica dioica* L.) produced by the scalded flour method. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15851. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15851>

166. Xhaferaj, M., Muskovics, G., Schall, E., Bugyi, Z., Tömösközi, S., & Scherf, K. A. (2023). Development of a barley reference material for gluten analysis. *Food Chemistry*, 424, 136414. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136414>
167. Xie, X., zheng, M., Bai, Y., Zhang, Z., Zhang, M., Chen, Z., Hu, X., & Li, J. (2023). Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* fermentation on the multi-scale structure and physicochemical properties of highland barley starch. *Food Bioscience*, 52(November 2022), 102419. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102419>
168. Yildirim-Mavis, C., Yilmaz, M. T., Dertli, E., Arici, M., & Ozmen, D. (2019). Non-linear rheological (LAOS) behavior of sourdough-based dough. *Food Hydrocolloids*, 96, 481–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.055>
169. Zamakhchari, M., Wei, G., Dewhirst, F., Lee, J., Schuppan, D., Oppenheim, F. G., & Helmerhorst, E. J. (2011). Identification of rothia bacteria as gluten-degrading natural colonizers of the upper gastro-intestinal tract. *PLoS ONE*, 6(9), e24455. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024455>
170. 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>
171. Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M. A. P., Harris, H. M. B., Mattarelli, P., O'toole, P. W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G. E., Gänzle, M. G., & Lebeer, S. (2020). A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus beijerinck* 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70, 2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>
172. Zhou, Y., Dhital, S., Zhao, C., Ye, F., Chen, J., & Zhao, G. (2021). Dietary fiber-gluten protein interaction in wheat flour dough: Analysis, consequences and proposed mechanisms. *Food Hydrocolloids*, 111(2), 106203. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106203>
173. Ауэрман, Л. (2005). *Технология хлебопекарного производства*. Санкт-Петербург: издательство «Профессия».

PIELIKUMI / *APPENDICES*

Biežāk pārstāvēto baktēriju ģintis un sugas kailgraudu miežu miltos un trīs kailgraudu miežu spontānā ierauga fermentācijas posmos / *The most represented bacteria genus and species in hull-less barley flour and in spontaneous sourdough three step fermentation*

Baktērija / Bacteria	KM/HBF	KMI1/HBS1	KMI2/HBS2	KMI3/HBS3
<i>Curtobacterium flaccumfaciens</i>	0.012102	0.000018	0.000038	0.000018
<i>Enterobacter hormaechei</i>	–	0.002121	–	–
<i>Enterococcus faecium</i>	0.000173	–	0.105459	0.076303
<i>Enterococcus unclassified</i>	–	0.250723	0.005632	0.003679
<i>Lactococcus lactis</i>	0.000173	0.002209	0.015556	0.005894
<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	0.000096	0.000614	0.000690	0.000053
<i>Lactobacillus unclassified</i>	0.000019	0.000018	–	–
<i>Pantoea agglomerans</i>	0.112708	0.673509	0.154828	0.061407
<i>Pantoea unclassified</i>	0.000365	0.003962	0.001667	0.000411
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	0.000461	0.028540	0.647165	0.824584
<i>Paenibacillus chinensis</i>	0.002421	0.002331	0.000345	0.000089
<i>Pseudomonas unclassified</i>	0.007550	0.000175	0.000057	0.000107
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	0.00257	–	0.000038	0.000036
<i>Weissella cibaria</i>	–	–	0.041513	0.011949
<i>Weissella unclassified</i>	–	0.004891	0.006571	0.002661
<i>unclassified unclassified</i>	0.001575	0.000123	0.000287	0.003019

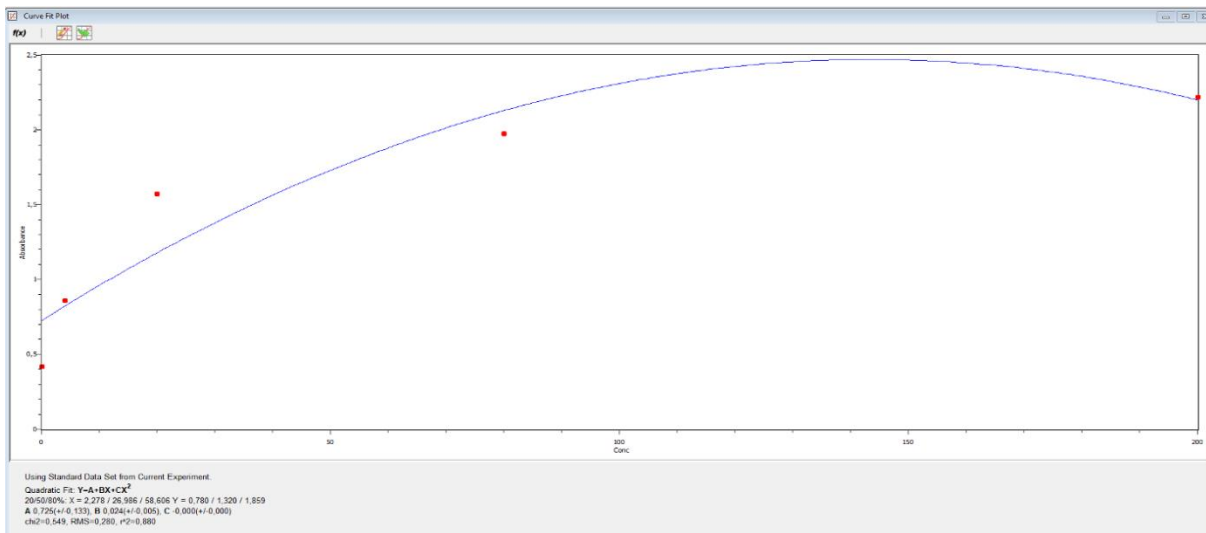
“–”norāda, ka dotie mikroorganismi nav identificēti / *indicates that the microorganisms have not been identified*

Biežāk pārstāvēto mikroskopisko sēņu ģinšu un sugu sekvencēšanas nolāstījumi kailgraudu miežu miltos un kailgraudu miežu spontānajā ierauga fermentācijas trīs posmos /
Proportion of most represented genus and species of fungi in hull-less barley flour and spontaneous sourdough in three steps fermentation

Mikroskopiskās sēnes / Fungi	KM.1/HBF.1	KM.2/HBF.2	KMI1.1/HBS1.	KMI1.2/HBS1.2	KMI2.1/HBS2.1	KMI2.2/HBS2.2	KMI3.1/HBS3.1	KMI3.2/HBS3.2
<i>Alternaria metachromatica</i>	0.155141	–	–	–	0.176869	–	0.118407	–
<i>Alternaria unclassified</i>	0.053582	0.298907	–	–	–	0.271934	0.046287	0.267684
<i>Alternaria rosae</i>	0.013421	–	–	–	–	–	0.013514	–
<i>Aspergillus conicus</i>	–	–	–	–	–	0.013780	–	–
<i>Cladosporium delicatulum</i>	0.059007	–	–	–	0.113889	0.000197	0.149066	–
<i>Cladosporium unclassified</i>	–	–	–	–	–	–	–	0.177454
<i>Debaryomyces hansenii</i>	–	–	–	–	–	0.020671	–	–
<i>Mycosphaerella tassiana</i>	0.059871	–	–	–	0.171216	–	0.246191	0.000253
<i>Phialemoniopsis curvata</i>	0.000221	0.000111	0.332459	–	0.027348	–	0.003172	–
<i>Penicillium unclassified</i>	–	–	0.000268	–	–	–	0.001655	–
<i>Rhodotorula unclassified</i>	–	0.07954	–	–	–	–	–	–
<i>Saccharomyces unclassified</i>	–	–	0.364065	–	0.008941	0.112868	0.004666	0.033484
<i>Sarocladium bacrocephalum</i>	0.279965	0.124696	0.166872	–	0.212607	0.021917	0.175910	0.096908
<i>Sarocladium unclassified</i>	–	0.038919	–	–	–	–	–	–
<i>neklasificēts/ unclassified</i>	0.006329	0.052451	0.043231	0.997961	0.011886	0.335652	0.013353	0.099598
<i>Vishniacozyma heimaeyensis</i>	–	–	–	–	–	0.061356	–	–
<i>Vishniacozyma victoriae</i>	0.097260	0.097129	0.000107	–	0.078232	0,016733	0.058376	0.063582
<i>Vishniacozyma unclassified</i>	0.065215	0.038778	–	–	0.008941	–	–	–

“–”norāda, ka dotie mikroorganismi nav identificēti / *indicates that the microorganisms have not been identified*

3. pielikums / Appendix 3
Kalibrācijas līknes glutēna noteikšanā / Standard curve



Glutēna saturs kailgraudu miežu miltu, ierauga un maizes paraugos / *Gluten content in hull-less barley flour, sourdough and bread*

Nr. / No	Paraugs / <i>Sample</i>	Sausna / <i>dw</i> %	Glutēna saturs / <i>Gluten content</i> 10 ⁴ mg kg ⁻¹ sausnas / <i>dw</i>	Glutēna saturs / <i>Gluten content</i> 10 ⁴ mg kg ⁻¹ sausnas / <i>dw</i>
1.	KM / <i>HBF</i>	89.41	81.03	90.63 ± 6.59 ^a
2.	KMI-S / <i>HBS-S</i>	98.17	80.19	82.41 ± 5.00 ^{ab}
3.	KMI-T / <i>HBS-T</i>	98.52	74.51	75.63 ± 11.78 ^{bc}
4.	KMM-S / <i>HBB-S</i>	98.08	63.33	64.57 ± 4.62 ^c
5.	KMM-T / <i>HBB-T</i>	98.59	69.50	70.49 ± 4.48 ^{bc}
6.	KMM-R / <i>HBB-Y</i>	91.39	83.71	91.60 ± 6.04 ^a
7.	KMI-T(6h) / <i>HBS-T(6h)</i>	98.66	77.41	78.47 ± 9.41 ^d
8.	KMI-T(14h) / <i>HBS-T(14h)</i>	98.91	71.93	72.73 ± 3.17 ^{de}
9.	KMI-T(24h) / <i>HBS-T(24h)</i>	98.84	63.74	64.25 ± 7.55 ^e

KM – kailgraudu miežu milti; KMI-S – kailgraudu miežu spontānais ieraugs; KMI-T – ar tīrkultūrām fermentēts kailgraudu miežu ieraugs; kailgraudu miežu maize: KMM-S – ar kailgraudu miežu spontāno ieraugu; KMM-T – ar tīrkultūrām fermentētu ieraugu; KMM-R – gatavota ar raugu / *HBF* – hull-less barley flour ; *HBS-S* – hull-less barley spontaneous sourdough; *HBS-T* – hull-less barley sourdough fermented with starter cultures; hull-less barley bread: *HBB-S* – prepared with hull-less barley spontaneous sourdough; *HBB-T* – prepared with starter cultures sourdough; *HBB-Y* – prepared with yeast

Paraugiem Nr.1 – 6 ar vienu un to pašu burtu (a – c) un paraugiem 7 – 9 (d – e) apzīmētas vērtības norāda, ka nepastāv būtiskas atšķirības starp rādītājiem $p > 0.05$ / *Values marked with the same letter within the column for samples 1 – 6 and samples 7 - 9 indicate that there is no significant difference between the values ($p > 0.05$)*